

UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nikola B. Mirković

**PRILOG NUMERIČKOJ ANALIZI OSNOVNIH I
DODATNIH TEMPERATURNIH NAPONA U
KONTINUALNO ZAVARENIM ŠINAMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Nikola B. Mirković

**CONTRIBUTION TO NUMERICAL ANALYSIS
OF BASIC AND ADDITIONAL TEMPERATURE
STRESSES IN CONTINUOUSLY WELDED RAILS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

Mentori:

dr Stjepan Lakušić, redovni profesor
Univerzitet u Zagrebu, Građevinski fakultet

dr Marija Nefovska-Danilović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

dr Stjepan Lakušić, redovni profesor
Univerzitet u Zagrebu, Građevinski fakultet

dr Marija Nefovska-Danilović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

dr Jelena Dobrić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

dr Maja Ahac, vanredni profesor
Univerzitet u Zagrebu, Građevinski fakultet

dr Miroslav Marjanović, docent
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Datum odbrane: _____

IZJAVE ZAHVALNOSTI

Pre svega zahvaljujem se mentorima prof. dr Stjepanu Lakušiću i v. prof. dr Mariji Nefovskoj-Danilović na vođenju i usmeravanju tokom izrade doktorske disertacije, kao i na nesebičnom deljenju znanja i iskustva kako bi ova doktorska disertacija imala neophodan kvalitet.

Zahvaljujem se v. prof. dr Jeleni Dobrić i v. prof. dr Maji Ahac na dragocenim savetima tokom izrade doktorske disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Posebno se zahvaljujem dekanu fakulteta prof. dr Vladanu Kuzmanoviću, prodekanu za nauku doc. dr Miroslavu Marjanoviću, kao i prodekanu za nastavu doc. dr Nenadu Fricu. Takođe, zahvaljujem se kolegama sa Katedre za puteve, železnice i aerodrome, kao i kolegama sa Katedre za tehničku mehaniku i teoriju konstrukcija.

Zahvaljujem se firmi Mostprojekt a.d. Beograd na tehničkoj podršci pri izradi doktorske disertacije, kao i firmi ZGOP a.d. Novi Sad na donaciji i tehničkoj podršci pri sprovođenju eksperimentalnih istraživanja.

Zahvaljujem se v. prof. dr Goranu Todoroviću na savetima pri izradi i objavljivanju rada na SCI listi, kao i v. prof. dr Ljiljani Brajović na pomoći prilikom sprovođenja eksperimentalnih merenja. Zahvaljujem se kolegi Nikoli Obradoviću na saradnji i pomoći tokom doktorskih studija.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem mojoj porodici, pre svega mojim roditeljima Branku i Ljiljani, kao i mom bratu Urošu. Posebnu zahvalnost dugujem mojoj supruzi Ani, čija ljubav mi je bila vetar u leđa da istrajem na ovom putu. Hvala vam na ljubavi i strpljenju svih ovih godina.

FINANSIRANJE

Ovo istraživanje podržalo je Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije kroz istraživački projekat br. 200092.

PRILOG NUMERIČKOJ ANALIZI OSNOVNIH I DODATNIH TEMPERATURNIH NAPONA U KONTINUALNO ZAVARENIM ŠINAMA

Rezime: U ovoj doktorskoj disertaciji istraživani su osnovni i dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama primenom numeričke analize zasnovane na metodi konačnih elemenata. Glavni ciljevi istraživanja su: (1) određivanje temperaturnog polja šine i osnovnih temperaturnih napona usled neravnomerne raspodele temperature, (2) kvantifikovanje preraspodele temperature i osnovnih temperaturnih napona usled prenosa toplote između šine i praga, kao i između nožice šine i zastora od tucanika, (3) uporedna analiza osnovnih temperaturnih napona određenih korišćenjem numeričke analize sa osnovnim temperaturnim naponima određenim u skladu sa inženjerskom praksom, (4) kvantifikovanje uticaja parametara koloseka i mosta na dodatne temperaturne napone u kontinualno zavarenim šinama na mostu i definisanje smernica za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta.

Disertacija objašnjava strukturu napona u kontinualno zavarenim šinama, kao i mehanizme formiranja osnovnih i dodatnih temperaturnih napona. Prikazan je merni sistem koji je od strane autora razvijen za potrebe eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine, kao i metodologija koja je razvijena za određivanje temperaturnog polja šine i osnovnih temperaturnih napona. Metodologija se zasniva na primeni eksperimentalno izmerenih površinskih temperatura šine i spregnutoj nestacionarnoj termičko-naponskoj analizi. Dobijeni rezultati eksperimentalnih merenja i numeričke analize kvantifikovali su i potvrdili efekte prenosa toplote, niže temperature i osnovne temperaturne napone u poprečnom preseku šine uz prag, kao i u nožici šine. Osnovne prednosti numeričke analize su uzimanje u obzir istorije zagrevanja šine, kao i efekata toplotne inercije, uz mogućnost kvalitativnog i kvantitativnog uvida u raspodelu napona u šini. U skladu sa tim, primenom numeričke analize, u poređenju sa uobičajenim inženjerskim proračunima, dobijene su niže temperature i osnovni temperaturni naponi unutar šine kada temperatura šine ima tendenciju rasta, kao i više temperature i osnovni temperaturni naponi unutar šine kada temperatura šine ima tendenciju opadanja. Takođe, izvršena je i analiza dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu, usled temperaturnih uticaja u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Prikazana je struktura numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most, kao i uticajni parametri konstrukcija koloseka i mosta. Sprovedena je parametarska analiza za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija sa kontinualno zavarenim šinama i kvantifikovani su uticaji razmatranih parametara. Utvrđeno je da povećanje površine poprečnog preseka šine, kao i smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka, dilatacione dužine mosta i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, dovode do redukcije dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu.

Ključne reči: Železnica, Raspodela temperature, Termičko-naponska analiza, Metod konačnih elemenata, Interakcija kolosek/most, Parametarska analiza.

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uže naučne oblasti: Gornji stroj, građenje i održavanje železnica; Tehnička mehanika i teorija konstrukcija

UDK broj:

CONTRIBUTION TO NUMERICAL ANALYSIS OF BASIC AND ADDITIONAL TEMPERATURE STRESSES IN CONTINUOUSLY WELDED RAILS

Abstract: In this doctoral dissertation basic and additional temperature stresses in continuously welded rails were investigated using numerical analysis based on the finite element method. The main aims of the research are: (1) determination of the rail temperature field and basic temperature stresses due to uneven temperature distribution, (2) quantifying the redistribution of temperature and basic temperature stresses due to heat transfer between the rail and the sleeper, as well as between the rail foot and the ballast, (3) comparative analysis of basic temperature stresses determined by using numerical analysis with the basic temperature stresses determined in accordance with engineering practice, (4) quantifying the influence of track and bridge parameters on the additional temperature stresses in continuously welded rails on the bridge and defining guidelines for the integral design of track and bridge structures.

The dissertation explains the stress structure in continuously welded rails, as well as the formation mechanisms of basic and additional temperature stresses. The measurement system developed by the author for the needs of experimental measurements of rail surface temperatures, as well as the methodology that was developed for determining the rail temperature field and basic temperature stresses were presented. The methodology is based on the usage of experimentally measured rail surface temperatures and coupled transient thermal-stress analysis. The obtained results of experimental measurements and numerical analysis quantified and confirmed the effects of heat transfer, lower temperatures and basic temperature stresses in the rail cross-section next to the sleeper, as well as in the rail foot. The main advantages of numerical analysis are taking into account the heating history of the rail, as well as the effects of thermal inertia, with the possibility of qualitative and quantitative insight into the rail stress distribution. Accordingly, applying numerical analysis, in comparison with common engineering calculations, resulted in lower temperatures and basic temperature stresses inside the rail when the rail temperature tends to rise, as well as higher temperatures and basic temperature stresses inside the rail when the rail temperature tends to fall. Also, analysis of additional temperature stresses in continuously welded rails on the bridge due to temperature influences in the bridge superstructure was performed. The structure of the numerical model for analysis of the track/bridge interaction, as well as the influential parameters of track and bridge structures were presented. A parametric analysis for five representative bridge structures with continuously welded rails was performed and the influence of the considered parameters was quantified. It was determined that increasing the rail cross-sectional area, as well as decreasing the longitudinal track resistance, bridge expansion length, and longitudinal stiffness of the fixed bridge support, lead to reduction of additional temperature stresses in continuously welded rails on the bridge.

Keywords: Railway, Temperature distribution, Thermal-stress analysis, Finite element method, Track/bridge interaction, Parametric analysis.

Scientific field: Civil engineering

Scientific subfields: Railway superstructure, construction and maintenance; Engineering mechanics and theory of structures

UDC number:

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	Kolosek sa kontinualno zavarenim šinama	1
1.2	Predmet i ciljevi istraživanja	6
1.3	Struktura doktorske disertacije	7
2	PREGLED LITERATURE I ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	9
2.1	Istraživanja u oblasti osnovnih temperaturnih napona	9
2.2	Istraživanja u oblasti dodatnih temperaturnih napona	11
3	TEORIJSKA RAZMATRANJA NAPONA U KONTINUALNO ZAVARENIM ŠINAMA	14
3.1	Opšta razmatranja	14
3.2	Osnovni naponi	15
3.2.1	Zaostali naponi	15
3.2.2	Temperaturni naponi	16
3.2.2.1	Neutralna temperatura	17
3.2.2.2	Izvijanje koloseka	19
3.2.2.3	Formiranje zazora pri pucanju šine	21
3.2.3	Naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila	23
3.3	Dodatni naponi	25
3.3.1	Naponi usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta	25
3.3.2	Naponi usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu	28
3.3.3	Naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu	29
3.4	Dozvoljene vrednosti napona	32
4	EKSPERIMENTALNA MERENJA POVRŠINSKIH TEMPERATURA ŠINE	35
4.1	Merni sistem	35
4.1.1	Komponente mernog sistema	35
4.1.2	Kalibracija mernog sistema	37
4.2	Postavka eksperimentalnih merenja	38
4.3	Rezultati eksperimentalnih merenja	40
5	NUMERIČKA ANALIZA OSNOVNIH TEMPERATURNIH NAPONA	45
5.1	Metodologija	45
5.1.1	Diskretizacija nestacionarne jednačine provođenja toplote	48
5.2	Numerički model za analizu temperaturnih uticaja u šini	50
5.2.1	Konačni elementi primenjeni u numeričkom modelu	52
5.3	Rezultati numeričke analize	59
6	NUMERIČKA ANALIZA DODATNIH TEMPERATURNIH NAPONA	73
6.1	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most	73
6.1.1	Konačni elementi i elementi veza primenjeni u numeričkom modelu	74
6.1.2	Parametri konstrukcije koloseka	78
6.1.3	Parametri konstrukcije mosta	82
6.1.4	Razmatrana opterećenja u numeričkom modelu	86
6.2	Kriterijumi interakcije kolosek/most	89
6.3	Metode za analizu dodatnih napona	90

6.3.1	Pojedinačna analiza	90
6.3.2	Kompletna analiza.....	91
6.3.3	Poređenje rezultata pojedinačne i kompletne analize.....	92
6.4	Parametarska analiza dodatnih temperaturnih napona.....	97
6.4.1	Studija slučaja 1: Mostovska konstrukcija tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	98
6.4.2	Studija slučaja 2: Mostovska konstrukcija tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom	115
6.4.3	Studija slučaja 3: Mostovska konstrukcija tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	132
6.4.4	Studija slučaja 4: Mostovska konstrukcija tipa betonskog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom	150
6.4.5	Studija slučaja 5: Mostovska konstrukcija tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom	167
6.5	Smernice za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta	184
7	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA	187
8	LITERATURA	190
	Biografija autora	197
	Izjava o autorstvu	198
	Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	199
	Izjava o korišćenju	200

SPISAK SLIKA

Slika 1.1	Mašina za automatsko elektrootporno zavarivanje šina u koloseku [1].....	1
Slika 1.2	Zavareni šinski spoj (levo) [1] i mehanički šinski spoj (desno) [2]	1
Slika 1.3	Izvijanje koloseka (levo) [3] i formiranje zazora pri pucanju šine (desno) [4].....	2
Slika 1.4	Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 60E1 [5]	3
Slika 1.5	Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 54E2 [5]	3
Slika 1.6	Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 49E1 [5]	4
Slika 1.7	Eksperimentalno određen dijagram napon-dilatacija šinskog čelika klase R260 [6]...5	
Slika 3.1	Šematski prikaz strukture napona u kontinualno zavarenim šinama	14
Slika 3.2	Raspodela zaostalih napona u poprečnom preseku profila šine tipa 60E1 [55], [56]..	15
Slika 3.3	Poprečna i vertikalna raspodela zaostalih napona u glavi korišćene šine sa položajem kontaktnih diskontinuiteta [60]	16
Slika 3.4	Podužna raspodela zaostalih napona usled aluminotermijskog postupka zavarivanja šina [61], [63].....	16
Slika 3.5	Dijagram temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama	17
Slika 3.6	Uticaj neutralne temperature na vrednosti temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama.....	18
Slika 3.7	Šematski prikaz koloseka pre i nakon izvijanja [69], [70]	19
Slika 3.8	Šematski prikaz procesa izvijanja koloseka [69]	19
Slika 3.9	Načini izvijanja koloseka u funkciji od nivoa kvaliteta geometrije i održavanja koloseka [69]	20
Slika 3.10	Preraspodela napona zatezanja usled pucanja šine i formiranja zazora	22
Slika 3.11	Proračunski model za određivanje veličina zazora pri pucanju šine [19], [72]	22
Slika 3.12	Momenti savijanja šine usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila (levo), vertikalno i bočno opterećenje od točka železničkog vozila (desno) [63], [75], [76].....	24
Slika 3.13	Dijagrami dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta.....	25
Slika 3.14	Model interakcije kolosek/most (levo) i element veze (desno) [34]	26
Slika 3.15	Izolovani element šine dužine l_j u lokalnom koordinatnom sistemu [34]	27
Slika 3.16	Dijagrami dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu.....	28
Slika 3.17	Model interakcije kolosek/most za opterećenje od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu [34]	28
Slika 3.18	Dijagram dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu	29
Slika 3.19	Obrtanje kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta [34]	30
Slika 3.20	Naponi pritiska u kontinualno zavarenim šinama koji dovode do izvijanja koloseka [56]	32
Slika 3.21	Smith-ov dijagram za korišćenu (korodiranu) šinu 60E1 (zatezne čvrstoće 900 N/mm ²) [83] i dijagram napona usled zamora šinskog čelika [84], [6], [10], [56] ...	33
Slika 4.1	Merni sistem za merenje površinskih temperatura šine (levo) i njegove osnovne komponente (desno) [10]	35
Slika 4.2	NTC termistori (levo) i dijagram nelinearne veze otpora i temperature (desno) ...	36

Slika 4.3	Montaža termistorskih senzora uz pomoć magneta.....	36
Slika 4.4	Modularni držač termistorskih senzora od PLA materijala	36
Slika 4.5	NTC Thermistor to Voltage Converter Module HIC NTC-V2 [90].....	37
Slika 4.6	Elementi akvizicionog sistema ugrađenog u merni sistem [91], [92]	37
Slika 4.7	Grafički prikaz elemenata konstrukcije test koloseka u zastoru od tucanika [93].....	38
Slika 4.8	Postavka eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine, temperatura zastora i temperature vazduha [10].....	39
Slika 4.9	Položaj mernih preseka i raspored temperaturnih senzora kod eksperimentalnih merenja	39
Slika 4.10	Postavka kontrolnih merenja površinskih temperatura šine, temperature zastora i temperature vazduha	40
Slika 4.11	Položaj mernih preseka i raspored temperaturnih senzora kod kontrolnih merenja .	40
Slika 4.12	Rezultati eksperimentalnih merenja u poprečnom preseku uz prag [10]	41
Slika 4.13	Rezultati eksperimentalnih merenja u srednjem poprečnom preseku između pragova [10].....	41
Slika 4.14	Rezultati kontrolnih merenja u srednjem poprečnom preseku između pragova [10].....	42
Slika 4.15	Pozicija šinskog termometra u skladu sa inženjerskom praksom [99]	43
Slika 4.16	Šematski prikaz zona u kojima se javlja prenos toplote između šine i pragova, kao i između nožice šine i zastora od tucanika [10]	44
Slika 5.1	Teorijska raspodela napona, pomeranja i temperatura u kontinualno zavarenoj šini [10].....	45
Slika 5.2	Diferencijalno mala zapremina šine za analizu provođenja toplote [101].....	47
Slika 5.3	Prikaz numeričkog modela za analizu temperaturnih uticaja u šini i njegove karakteristike [10]	51
Slika 5.4	Granični uslovi u numeričkom modelu za proračun podužnih temperaturnih napona, poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija.....	52
Slika 5.5	Tetraedarski konačni elementi TF4 i TH4 sa stepenima slobode u lokalnom koordinatnom sistemu [101], [106]	52
Slika 5.6	Matrica krutosti za tetraedarski konačni element TH4 [106]	58
Slika 5.7	Raspodela temperatura u 09:00 h (levo) i 10:00 h (desno) [10]	59
Slika 5.8	Raspodela temperatura u 11:00 h (levo) i 12:00 h (desno) [10]	59
Slika 5.9	Raspodela temperatura u 13:00 h (levo) i 14:00 h (desno) [10]	60
Slika 5.10	Raspodela temperatura u 15:00 h (levo) i 16:00 h (desno) [10]	60
Slika 5.11	Raspodela temperatura u 17:00 h (levo) i 18:00 h (desno) [10]	60
Slika 5.12	Raspodela temperaturnih napona u 09:00 h (levo) i 10:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	60
Slika 5.13	Raspodela temperaturnih napona u 11:00 h (levo) i 12:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	61
Slika 5.14	Raspodela temperaturnih napona u 13:00 h (levo) i 14:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	61
Slika 5.15	Raspodela temperaturnih napona u 15:00 h (levo) i 16:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	61
Slika 5.16	Raspodela temperaturnih napona u 17:00 h (levo) i 18:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	61

Slika 5.17	Maksimalni priraštaji poprečnih (levo) i vertikalnih (desno) temperaturnih dilatacija u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10].....	62
Slika 5.18	Vrednosti temperatura u težištima glave, vrata i nožice šine [10].....	62
Slika 5.19	Temperaturni naponi u horizontalnim presecima šine u 12:00 h za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]....	63
Slika 5.20	Temperaturni naponi u vertikalnom preseku šine u 12:00 h za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]..	63
Slika 5.21	Raspodela temperaturnih napona u 09:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	64
Slika 5.22	Raspodela temperaturnih napona u 10:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	64
Slika 5.23	Raspodela temperaturnih napona u 11:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	64
Slika 5.24	Raspodela temperaturnih napona u 12:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	65
Slika 5.25	Raspodela temperaturnih napona u 13:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	65
Slika 5.26	Raspodela temperaturnih napona u 14:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	65
Slika 5.27	Raspodela temperaturnih napona u 15:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	65
Slika 5.28	Raspodela temperaturnih napona u 16:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	66
Slika 5.29	Raspodela temperaturnih napona u 17:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	66
Slika 5.30	Raspodela temperaturnih napona u 18:00 h za $T_n = 17,5\text{ °C}$ (levo) i $T_n = 22,5\text{ °C}$ (desno).....	66
Slika 5.31	Vrednosti temperaturnih napona u težištu glave šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	67
Slika 5.32	Vrednosti temperaturnih napona u težištu vrata šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	67
Slika 5.33	Vrednosti temperaturnih napona u težištu nožice šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	68
Slika 5.34	Vrednosti temperaturnih napona u skladu sa inženjerskom praksom i u težištima glave, vrata i nožice šine za $T_n = 20\text{ °C}$ [10].....	69
Slika 5.35	Vrednosti podužnih temperaturnih sila kod eksperimentalnih i kontrolnih merenja za $T_n = 20\text{ °C}$ [10].....	70
Slika 5.36	Priraštaj poprečnih temperaturnih dilatacija u glavi, vratu i nožici šine u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10].....	71
Slika 5.37	Priraštaj vertikalnih temperaturnih dilatacija u glavi, vratu i nožici šine u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10].....	72
Slika 6.1	Šematski prikaz numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most [115]..	73
Slika 6.2	Konačni elementi i elementi veza u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most [115].....	74
Slika 6.3	Prostorni linijski konačni element sa stepenima slobode u globalnom koordinatnom sistemu [116], [117].....	74

Slika 6.4	Osnovne komponente pomeranja prostornog linijskog konačnog elementa u lokalnom koordinatnom sistemu [117]	75
Slika 6.5	Pomeranja poprečnog preseka prostornog linijskog konačnog elementa [117]..	76
Slika 6.6	Dijagrami otpora podužnom pomeranju koloseka [49], [120]	79
Slika 6.7	Dilatacione dužine mostova različitih statičkih sistema [49]	83
Slika 6.8	Šematski prikaz raspodele ukupnih temperaturnih napona u kontinualno zava- renim šinama na mostu u slučaju ugrađene šinske dilatacione sprave [81]	83
Slika 6.9	Komponente pomeranja mostovskog stuba [49].....	84
Slika 6.10	Podužno i vertikalno pomeranje krajeva mosta usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu [81]	85
Slika 6.11	Karta minimalnih i maksimalnih temperatura vazduha u hladu za teritoriju Republike Srbije i povratni period od 50 godina [125].....	86
Slika 6.12	Veza između temperature vazduha u hladu i ravnomerne komponente tempe- rature mosta [123]	87
Slika 6.13	Šema opterećenja LM71 [51]	88
Slika 6.14	Šema opterećenja SW/0 [51]	88
Slika 6.15	Šema opterećenja SW/2 [51]	88
Slika 6.16	Dijagram sila-deformacija za pojedinačnu analizu [126], [127]	91
Slika 6.17	Dijagram sila-deformacija za kompletnu analizu [126], [127]	91
Slika 6.18	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom [10]	92
Slika 6.19	Poprečni presek numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - beton- ske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.....	92
Slika 6.20	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom	92
Slika 6.21	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi) [10].....	94
Slika 6.22	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi) [10].....	94
Slika 6.23	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi).....	95
Slika 6.24	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi).....	95
Slika 6.25	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi) [10].....	96
Slika 6.26	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi) [10]	96
Slika 6.27	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	98
Slika 6.28	Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	98
Slika 6.29	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	99

Slika 6.30	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	101
Slika 6.31	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	102
Slika 6.32	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	103
Slika 6.33	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	103
Slika 6.34	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	105
Slika 6.35	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	105
Slika 6.36	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	106
Slika 6.37	Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	107
Slika 6.38	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	108
Slika 6.39	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	108
Slika 6.40	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	109
Slika 6.41	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	110
Slika 6.42	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	111
Slika 6.43	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	111
Slika 6.44	Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	112
Slika 6.45	Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	113
Slika 6.46	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	114

Slika 6.47	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	114
Slika 6.48	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	115
Slika 6.49	Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	115
Slika 6.50	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	116
Slika 6.51	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	118
Slika 6.52	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	119
Slika 6.53	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	120
Slika 6.54	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	120
Slika 6.55	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	122
Slika 6.56	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	122
Slika 6.57	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	123
Slika 6.58	Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	124
Slika 6.59	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	125
Slika 6.60	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	125
Slika 6.61	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	126
Slika 6.62	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	127

Slika 6.63	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	127
Slika 6.64	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	128
Slika 6.65	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	129
Slika 6.66	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	129
Slika 6.67	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	130
Slika 6.68	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	130
Slika 6.69	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	131
Slika 6.70	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	132
Slika 6.71	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	133
Slika 6.72	Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	133
Slika 6.73	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	133
Slika 6.74	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	135
Slika 6.75	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	136
Slika 6.76	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	137
Slika 6.77	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	137
Slika 6.78	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	139
Slika 6.79	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	139

Slika 6.80	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	140
Slika 6.81	Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	141
Slika 6.82	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	142
Slika 6.83	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	142
Slika 6.84	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	143
Slika 6.85	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	144
Slika 6.86	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	145
Slika 6.87	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	145
Slika 6.88	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	146
Slika 6.89	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	146
Slika 6.90	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	147
Slika 6.91	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	147
Slika 6.92	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	149
Slika 6.93	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	149
Slika 6.94	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	150
Slika 6.95	Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	150

Slika 6.96	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	151
Slika 6.97	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	153
Slika 6.98	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	153
Slika 6.99	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	154
Slika 6.100	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	155
Slika 6.101	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	156
Slika 6.102	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	157
Slika 6.103	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	157
Slika 6.104	Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	158
Slika 6.105	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	159
Slika 6.106	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	160
Slika 6.107	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	161
Slika 6.108	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	161
Slika 6.109	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	162
Slika 6.110	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	162
Slika 6.111	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	163

Slika 6.112	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	164
Slika 6.113	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	164
Slika 6.114	Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	165
Slika 6.115	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	166
Slika 6.116	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	166
Slika 6.117	Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	167
Slika 6.118	Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.	167
Slika 6.119	Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	168
Slika 6.120	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	170
Slika 6.121	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	170
Slika 6.122	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	171
Slika 6.123	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	172
Slika 6.124	Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	173
Slika 6.125	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	174
Slika 6.126	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	174

Slika 6.127	Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	175
Slika 6.128	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	176
Slika 6.129	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	177
Slika 6.130	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	178
Slika 6.131	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	178
Slika 6.132	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	179
Slika 6.133	Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	180
Slika 6.134	Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	181
Slika 6.135	Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	181
Slika 6.136	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	182
Slika 6.137	Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	183

SPISAK TABELA

Tabela 1.1	Tipovi profila šina obuhvaćeni standardom EN 13674-1 [5]	2
Tabela 1.2	Klase šinskog čelika obuhvaćene standardom EN 13674-1 [5]	4
Tabela 1.3	Usvojene proračunske materijalne karakteristike šinskog čelika klase R260 [5], [6], [7], [8]	5
Tabela 3.1	Granične dozvoljene vrednosti veličine zazora pri pucanju šine [72]	23
Tabela 3.2	Sigurnosna temperaturna promena [55], [56]	32
Tabela 4.1	Rezultati kalibracije temperaturnih senzora [10]	38
Tabela 4.2	Uporedni rezultati površinskih temperatura šine (eksperimentalna merenja) ..	43
Tabela 4.3	Uporedni rezultati površinskih temperatura šine (kontrolna merenja)	44
Tabela 5.1	Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu glave šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	68
Tabela 5.2	Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu vrata šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	68
Tabela 5.3	Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu nožice šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$	69
Tabela 5.4	Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u skladu sa inženjerskom praksom i u težištima glave, vrata i nožice šine za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	70
Tabela 5.5	Maksimalne vrednosti podužnih temperaturnih sila kod eksperimentalnih merenja za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	71
Tabela 5.6	Maksimalne vrednosti podužnih temperaturnih sila kod kontrolnih merenja za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]	71
Tabela 6.1	Karakteristike elementa veze između koloseka i mosta za proračun dodatnih napona i pomeranja [49]	80
Tabela 6.2	Vrednosti koeficijenta redukcije (β) za određivanje dela podužne sile koja se prenosi na nepokretan oslonac mosta [49]	85
Tabela 6.3	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu od $8 \cdot 25\text{ m} = 200\text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom [10]	93
Tabela 6.4	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona i ukupnih dodatnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu [10]	97
Tabela 6.5	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	99
Tabela 6.6	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom ..	102
Tabela 6.7	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	104
Tabela 6.8	Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	104
Tabela 6.9	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	106
Tabela 6.10	Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	107

Tabela 6.11	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	109
Tabela 6.12	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	110
Tabela 6.13	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	112
Tabela 6.14	Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom	113
Tabela 6.15	Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.....	115
Tabela 6.16	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	116
Tabela 6.17	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	119
Tabela 6.18	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	121
Tabela 6.19	Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	121
Tabela 6.20	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	123
Tabela 6.21	Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.....	124
Tabela 6.22	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	126
Tabela 6.23	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	128
Tabela 6.24	Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	131
Tabela 6.25	Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom	132
Tabela 6.26	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	133
Tabela 6.27	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	136

Tabela 6.28	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	138
Tabela 6.29	Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	138
Tabela 6.30	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	140
Tabela 6.31	Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	141
Tabela 6.32	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacije dužine mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	143
Tabela 6.33	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	144
Tabela 6.34	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.....	146
Tabela 6.35	Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	148
Tabela 6.36	Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom	150
Tabela 6.37	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	151
Tabela 6.38	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	154
Tabela 6.39	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	155
Tabela 6.40	Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	156
Tabela 6.41	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.....	158
Tabela 6.42	Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	159
Tabela 6.43	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacije dužine mosta - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	160

Tabela 6.44	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom	163
Tabela 6.45	Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	165
Tabela 6.46	Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom...	167
Tabela 6.47	Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	168
Tabela 6.48	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	171
Tabela 6.49	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	172
Tabela 6.50	Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	173
Tabela 6.51	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	175
Tabela 6.52	Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	176
Tabela 6.53	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	177
Tabela 6.54	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	179
Tabela 6.55	Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	180
Tabela 6.56	Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom	182
Tabela 6.57	Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.....	183

SPISAK OZNAKA

A	oznaka senzora za merenje temperature vazduha
A	površina poprečnog preseka
A_m	koeficijent izvijanja u funkciji podužne sile pritiska i karakteristika koloseka
A_T	temperaturna amplituda
\mathbf{a}	vektor čvornih pomeranja konačnog elementa
\mathbf{a}_g	kinematička matrica
a_j	rastojanje između početaka lokalnog i globalnog koordinatnog sistema
a_m	Fourier-ov koeficijent izvijanja u funkciji otpora bočnom pomeranju koloseka
$\mathbf{a}_s(y,z)$	matrica operatora kompatibilnosti
$a_1 - a_4$	parametri interpolacionih funkcija
\mathbf{B}	matrica izvoda interpolacionih funkcija
B	oznaka senzora za merenje temperature zastorne prizme u srednjem poprečnom preseku između pragova (kontrolna merenja)
$B1$	oznaka senzora za merenje temperature zastorne prizme u poprečnom preseku uz prag
$B2$	oznaka senzora za merenje temperature zastorne prizme u srednjem poprečnom preseku između pragova
b_m	Fourier-ov koeficijent izvijanja u funkciji početne bočne imperfekcije koloseka
$\mathbf{b}(x)$	matrica ravnoteže
$b_1 - b_4$	parametri interpolacionih funkcija
\mathbf{C}	matrica kapacitivnosti
C	koeficijent kolosečne podloge
C_{ij}	elementi matrice kapacitivnosti
c	specifični toplotni kapacitet
c_l	podužna krutost elastične veze između šine i mosta za opterećen kolosek
c_u	podužna krutost elastične veze između šine i mosta za neopterećen kolosek
$c_1 - c_4$	parametri interpolacionih funkcija
\mathbf{D}	konstitutivna matrica za izotropan materijal
\mathbf{D}_t	matrica toplotne provodljivosti
d	veličina zazora pri pucanju šine
d_{ij}	elementi konstitutivne matrice
$d_1 - d_4$	parametri interpolacionih funkcija
E	Young-ov modul elastičnosti
EA	podužna krutost
EI	krutost na savijanje
$\mathbf{e}(x)$	generalizovani vektor deformacija poprečnog preseka konačnog elementa
$F[w(x)]$	funkcija raspodele otpora bočnom pomeranju koloseka
$F_{x,1} - F_{x,4}$	sile u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu x ose
$F_{y,1} - F_{y,4}$	sile u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu y ose
$F_{z,1} - F_{z,4}$	sile u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu z ose
\mathbf{f}	matrica fleksibilnosti
\mathbf{f}_f	vektor ekvivalentnih čvornih sila konačnog elementa
\mathbf{f}_ε	vektor sila konačnog elementa usled početnih dilatacija

H	podužna reakcija oslonca mosta
h	visina konstrukcije gornjeg stroja mosta
$\tilde{\mathbf{h}}$	vektor visina konstrukcije gornjeg stroja mosta u zoni izolovanog elementa šine
\tilde{h}_j	visina konstrukcije gornjeg stroja mosta na mestu čvora j izolovanog elementa šine
\tilde{h}_{j+1}	visina konstrukcije gornjeg stroja mosta na mestu čvora $j+1$ izolovanog elementa šine
h_o	rastojanje od neutralne ose do gornje ivice mosta
\tilde{h}_o	rastojanje od neutralne ose do gornje ivice mosta na mestu nepokretnog oslonca mosta
h_u	rastojanje od neutralne ose do donje ivice mosta
I_{yy}	moment inercije (Y-osa)
I_{zz}	moment inercije (Z-osa)
$I_{zz,2}$	moment inercije (Z-osa) preseka koji čine obe šine
\mathbf{i}	jedinični vektor pravca x ose
\mathbf{j}	jedinični vektor pravca y ose
\mathbf{K}	matrica krutosti
K	podužna krutost oslonca mosta
K_{ij}	elementi matrice krutosti
$\mathbf{K}_m(x,y,z)$	matrica krutosti materijala
$\mathbf{K}_s(x)$	matrica krutosti poprečnog preseka konačnog elementa
\mathbf{k}	jedinični vektor pravca z ose
k_A	podužna krutost opruge koja predstavlja nepokretni oslonac mosta
k_L	koeficijent relativne krutosti šinske podloge u odnosu na šinu u bočnom pravcu
k_V	koeficijent relativne krutosti šinske podloge u odnosu na šinu u vertikalnom pravcu
k_0	podužna krutost opruge koja predstavlja deo šine na zemljanom trupu pruge iznad levog oporca mosta
k_1	podužna krutost opruge koja predstavlja deo šine na zemljanom trupu pruge iznad desnog oporca mosta
L_B	dužina mosta
L_b	dužina dišućeg kraja šine
L_e	dužina konačnog elementa
L_f	dužina srednjeg (fiksno) dela šine
L_r	dužina kontinualno zavarene šine
L_T	dilataciona dužina mosta
l_j	dužina izolovanog elementa šine u lokalnom koordinatnom sistemu
$M_x(x)$	moment torzije oko x ose
$M_y(x)$	moment savijanja oko y ose
$M_z(x)$	moment savijanja oko z ose
$m_{x,2}$	moment torzije oko x ose u čvoru 2 konačnog elementa
$m_{y,1}$	moment savijanja oko y ose u čvoru 1 konačnog elementa
$m_{y,2}$	moment savijanja oko y ose u čvoru 2 konačnog elementa
$m_{z,1}$	moment savijanja oko z ose u čvoru 1 konačnog elementa
$m_{z,2}$	moment savijanja oko z ose u čvoru 2 konačnog elementa
\mathbf{m}_1	vektor momenta u čvoru 1 konačnog elementa

\mathbf{m}_2	vektor momenta u čvoru 2 konačnog elementa
\mathbf{N}	matrica interpolacionih funkcija
N_i	interpolaciona funkcija reprezentativnog čvora i
N_j	interpolaciona funkcija reprezentativnog čvora j
$N_t^n(t)$	linearna interpolaciona funkcija u vremenskom trenutku n
$N_t^{n+1}(t)$	linearna interpolaciona funkcija u vremenskom trenutku $n+1$
$N(x)$	normalna sila u pravcu x ose
$N_1 - N_4$	interpolacione funkcije tetraedarskog konačnog elementa TF4
n	broj čvorova u prostornom domenu Ω
O	centar točka železničkog vozila
P	podužna sila pritiska u koloseku
P_j	podužna sila u čvoru j izolovanog elementa šine
P_{j+1}	podužna sila u čvoru $j+1$ izolovanog elementa šine
P_0	podužna sila u šini na mestu čvora 0 na levom kraju mosta
P_1	podužna sila u šini na mestu čvora 1 na desnom kraju mosta
p	sila ubrzanja/kočenja od železničkog vozila na mostu
p_A	sila ubrzanja od železničkog vozila na mostu
p_B	sila kočenja od železničkog vozila na mostu
$p_{x,2}$	normalna sila u pravcu x ose u čvoru 2 konačnog elementa
\mathbf{p}_1	vektor sila u čvoru 1 konačnog elementa
\mathbf{p}_2	vektor sila u čvoru 2 konačnog elementa
Q_L	bočna sila po točku železničkog vozila
Q_V	vertikalna sila po točku železničkog vozila
Q_x	toplotni fluks koji ulazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu x ose
$Q_{x+\Delta x}$	toplotni fluks koji izlazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu x ose
Q_y	toplotni fluks koji ulazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu y ose
$Q_{y+\Delta y}$	toplotni fluks koji izlazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu y ose
Q_z	toplotni fluks koji ulazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu z ose
$Q_{z+\Delta z}$	toplotni fluks koji izlazi kroz granične površine zapremine šine u pravcu z ose
\mathbf{q}	vektor čvornih sila konačnog elementa
q	otpor podužnom pomeranju koloseka
\mathbf{q}_i	vektor statički nezavisnih veličina konačnog elementa
q_j	otpor podužnom pomeranju koloseka u čvoru j izolovanog elementa šine
q_{j+1}	otpor podužnom pomeranju koloseka u čvoru $j+1$ izolovanog elementa šine
\mathbf{q}_{rp}	vektor čvornih sila konačnog elementa usled opterećenja raspodeljenog duž ose
q_w	merodavan otpor podužnom pomeranju koloseka/šine u zimskim uslovima
q_x	gustina toplotnog fluksa u pravcu x ose
$\mathbf{q}(x,y,z,t)$	vektor gustine toplotnog fluksa

q_y	gustina toplotnog fluksa u pravcu y ose
q_z	gustina toplotnog fluksa u pravcu z ose
q_0	sila osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu
R	oznaka grupe senzora (T1-T16) za merenje površinskih temperatura šine u srednjem poprečnom preseku između pragova (kontrolna merenja)
R	poluprečnik točka železničkog vozila
R1	oznaka grupe senzora (T1-T9) za merenje površinskih temperatura šine u poprečnom preseku uz prag
R2	oznaka grupe senzora (T10-T18) za merenje površinskih temperatura šine u srednjem poprečnom preseku između pragova
S	osetljivost temperaturnog senzora
$\mathbf{s}_q(x)$	vektor čvornih sila poprečnog preseka konačnog elementa usled opterećenja raspodeljenog duž ose
$\mathbf{s}(x)$	vektor unutrašnjih sila poprečnog preseka konačnog elementa
$T_{a,max}$	maksimalna temperatura vazduha u hladu za povratni period od 50 godina
$T_{a,min}$	minimalna temperatura vazduha u hladu za povratni period od 50 godina
$T_{e,max}$	maksimalna ravnomerna komponenta temperature mosta
$T_{e,min}$	minimalna ravnomerna komponenta temperature mosta
TF4	oznaka tetraedarskog konačnog elementa za termičku analizu
TH4	oznaka tetraedarskog konačnog elementa za naponsko-deformacijsku analizu
T_{max}	maksimalna temperatura šine
T_{min}	minimalna temperatura šine
T_n	neutralna temperatura šine
\mathbf{T}_r	vektor temperatura šine
T_r	temperatura šine
$T_{r,e}(t)$	temperatura šine u funkciji vremena aproksimirana na vremenskom elementu
$T_{r,i}$	vremenski zavisna temperatura šine u reprezentativnom čvoru i
$T_{r,j}$	vremenski zavisna temperatura šine u reprezentativnom čvoru j
$\mathbf{T}_r^n(t)$	vektor temperatura šine u vremenskom trenutku n
$\mathbf{T}_r^{n+1}(t)$	vektor temperatura šine u vremenskom trenutku $n+1$
$T_r(x,y,z,t)$	temperaturno polje šine
$T_{r,1} - T_{r,4}$	temperature u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TF4
T_s	površinska temperatura na graničnoj površini šine Γ
T_{sr}	srednja temperatura šine
$T(U)$	linearna veza temperature i izlaznog napona temperaturnog senzora
T_{vazduh}	kriva izmerenih temperatura vazduha
$T_y(x)$	smičuća sila u pravcu y ose
T_{zastor}	kriva izmerenih temperatura zastorne prizme od tucanika
$T_z(x)$	smičuća sila u pravcu z ose
T_0	početna temperatura mosta
T1 - T18	krive izmerenih površinskih temperatura šine
t	vreme
U	modul elastičnosti šinske podloge
\mathbf{u}	vektor pomeranja konačnog elementa
u	dužina prepusta mosta preko nepokretnog oslonca

\tilde{u}	granična deformacija elementa veze između šine i mosta
u_B	podužno pomeranje gornje ivice mosta
u_D	deformacija elementa veze između šine i mosta
u_R	podužno pomeranje šine
$\mathbf{u}_r(x,y,z)$	vektor pomeranja poprečnog preseka konačnog elementa kao krutog tela
$u_{r,x}(x,y,z)$	pomeranje poprečnog preseka konačnog elementa kao krutog tela u pravcu x ose
$u_{r,y}(x,y,z)$	pomeranje poprečnog preseka konačnog elementa kao krutog tela u pravcu y ose
$u_{r,z}(x,y,z)$	pomeranje poprečnog preseka konačnog elementa kao krutog tela u pravcu z ose
\mathbf{u}_s	generalizovani vektor pomeranja poprečnog preseka konačnog elementa
$u(x)$	translacija poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu x ose
$u_{x,2}$	translacija u pravcu x ose u čvoru 2 konačnog elementa
u_0	granično relativno pomeranje praga u odnosu na zastor
u'_0	granično relativno pomeranje šine u odnosu na prag
$u_0(x)$	granično relativno pomeranje šine/koloseka
\mathbf{u}_1	vektor translacija u čvoru 1 konačnog elementa
$u_1 - u_4$	pomeranja u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu x ose
\mathbf{u}_2	vektor translacija u čvoru 2 konačnog elementa
V	zapremina tetraedarskog konačnog elementa
V_T	projektna brzina
\mathbf{v}	vektor deformacijski nezavisnih veličina konačnog elementa
$v(x)$	translacija poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu y ose
$v_1 - v_4$	pomeranja u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu y ose
W	širina konstrukcije gornjeg stroja mosta
W_{yy}	otporni moment (Y-osa)
W_{zz}	otporni moment (Z-osa)
w	bočna deformacija izvijenog koloseka
w'	povećanje početne bočne imperfekcije koloseka
$w_B(x)$	deformacija neutralne ose mosta
$w'_B(x)$	nagib neutralne ose mosta
$w(x)$	translacija poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu z ose
w_0	početna bočna imperfekcija koloseka
$w_1 - w_4$	pomeranja u čvorovima tetraedarskog konačnog elementa TH4 u pravcu z ose
x_g	podužna koordinata izolovanog elementa šine u globalnom koordinatnom sistemu
x_j	podužna koordinata izolovanog elementa šine u lokalnom koordinatnom sistemu
x_s	podužna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ
x_0	koordinata položaja maksimalnih negativnih momenta savijanja šine u odnosu na točak železničkog vozila
y_s	poprečna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ
Z_A	dodatno podužno pomeranje oslonca mosta u tački A
Z_B	dodatno podužno pomeranje gornje ivice mosta
\mathbf{Z}_j	vektor dodatnih podužnih pomeranja izolovanog elementa šine
Z_j	dodatno podužno pomeranje čvora j izolovanog elementa šine
Z_{j+1}	dodatno podužno pomeranje čvora $j+1$ izolovanog elementa šine
Z_N	dodatno podužno pomeranje neutralne ose mosta

z_R	dotatno podužno pomeranje šine
z_s	vertikalna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ
z_0	dotatno podužno pomeranje šine na mestu čvora 0 na levom kraju mosta
z_1	dotatno podužno pomeranje šine na mestu čvora 1 na desnom kraju mosta
α	koeficijent termičkog širenja
α_L	faktor povećanja/smanjenja opterećenja od železničkog saobraćaja
$\alpha_1 - \alpha_4$	konstante koje definišu temperaturno polje konačnog elementa TF4
β	koeficijent redukcije za određivanje dela podužne sile koja se prenosi na nepokretan oslonac mosta
β_t	konstanta vremenske integracije
γ^2	odnos podužne krutosti elastične veze šine i mosta za opterećen kolosek i podužne krutosti šine
γ_u^2	odnos podužne krutosti elastične veze šine i mosta za neopterećen kolosek i podužne krutosti šine
γ_{xy}	klizanje između pravaca x i y
γ_{xz}	klizanje između pravaca x i z
$\gamma_y(x)$	deformacija od smicanja poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu y ose
γ_{yz}	klizanje između pravaca y i z
$\gamma_z(x)$	deformacija od smicanja poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu z ose
ΔS	podužno pomeranje neutralne ose mosta usled obrtanja kraja mosta
ΔT	temperaturna promena
$\Delta T_{A,p}$	temperaturna promena koja odgovara dozvoljenoj vrednosti dodatnih napona pritiska u šini
ΔT_B	temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta
ΔT_N	ukupan opseg ravnomerne komponente temperature mosta
$\Delta T_{N,con}$	temperaturna promena merodavna za proračun skraćanja konstrukcije mosta
$\Delta T_{N,exp}$	temperaturna promena merodavna za proračun izduženja konstrukcije mosta
ΔT_n	promena neutralne temperature kontinualno zavarene šine
ΔT_p	temperatura izvijanja koloseka sa niskim nivoom kvaliteta geometrije koloseka
ΔT_r	temperaturna promena u kontinualno zavarenoj šini
$\Delta T_{r,e}$	temperaturna promena koja odgovara izduženju šine pod uticajem železničkog saobraćaja
$\Delta T_{r,p}$	razlika između maksimalne temperature šine i neutralne temperature šine
ΔT_s	sigurnosna temperaturna promena
ΔT_{TB}	temperaturna promena koja dovodi do izvijanja koloseka
$\Delta T_{TB,max}$	maksimalna temperatura izvijanja koloseka
$\Delta T_{TB,min}$	minimalna temperatura izvijanja koloseka
ΔT_w	maksimalna negativna temperaturna promena u šini u zimskim uslovima
Δt	vremenski interval
Δx	prirast podužne koordinate u pravcu x ose
Δy	prirast poprečne koordinate u pravcu y ose
Δz	prirast vertikalne koordinate u pravcu z ose
δ	ugib kraja šine ispod točka železničkog vozila
$\delta \mathbf{a}$	vektor virtuelnih čvornih pomeranja konačnog elementa
δ_a	relativno pomeranje između gornje i donje ivice ležišta mosta

δ_{abs}	apsolutno podužno pomeranje konstrukcija gornjeg stroja mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu
δ_B	relativni maksimalni ugib mosta u sredini raspona
δ_h	pomeranje vrha stuba mosta usled podužnog pomeranja temelja
δ_i	ukupno podužno pomeranje mosta u nivou ležišta
δ_n	pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca
$\delta_{n,x}$	podužno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca
$\delta_{n,z}$	vertikalno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca
δ_p	pomeranje vrha stuba mosta usled elastične deformacije
$\delta_{p,x}$	podužno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu pokretnog oslonca
δ_{rel}	relativno podužno pomeranje između konstrukcija gornjeg stroja mosta i koloseka usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu
$\delta \mathbf{u}$	vektor virtuelnih pomeranja konačnog elementa
δ_v	vertikalno pomeranje gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila
$\delta \boldsymbol{\varepsilon}$	vektor virtuelnih deformacija konačnog elementa
$\delta_{\theta,h}$	podužno pomeranje između gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta i oporca, tj. između gornjih ivica krajeva dve uzastopne konstrukcije gornjeg stroja mosta usled obrtanja krajeva mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila
δ_φ	pomeranje vrha stuba mosta usled obrtanja temelja ili temeljne ploče
$\boldsymbol{\varepsilon}$	vektor deformacija konačnog elementa
$\varepsilon_G(x)$	aksijalna deformacija poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu x ose
$\boldsymbol{\varepsilon}_r(x,y,z)$	vektor deformacija poprečnog preseka konačnog elementa
$\varepsilon_{T,x}$	podužne temperaturne dilatacije kontinualno zavarene šine
$\varepsilon_{T,y}$	poprečne temperaturne dilatacije kontinualno zavarene šine
$\varepsilon_{T,z}$	vertikalne temperaturne dilatacije kontinualno zavarene šine
ε_x	dilatacija u pravcu x ose
ε_y	dilatacija u pravcu y ose
ε_z	dilatacija u pravcu z ose
$\boldsymbol{\varepsilon}^0$	vektor početnih dilatacija usled temperaturne promene
η	relativni položaj neutralne ose mosta
$\theta_x(x)$	rotacija poprečnog preseka konačnog elementa oko x ose
$\theta_{x,2}$	rotacija oko x ose u čvoru 2 konačnog elementa
$\theta_y(x)$	rotacija poprečnog preseka konačnog elementa oko y ose
$\theta_{y,1}$	rotacija oko y ose u čvoru 1 konačnog elementa
$\theta_{y,2}$	rotacija oko y ose u čvoru 2 konačnog elementa
$\theta_z(x)$	rotacija poprečnog preseka konačnog elementa oko z ose
$\theta_{z,1}$	rotacija oko z ose u čvoru 1 konačnog elementa
$\theta_{z,2}$	rotacija oko z ose u čvoru 2 konačnog elementa
$\boldsymbol{\theta}_1$	vektor rotacija u čvoru 1 konačnog elementa
$\boldsymbol{\theta}_2$	vektor rotacija u čvoru 2 konačnog elementa
λ	toplotna provodljivost
λ_x	toplotna provodljivost u pravcu x ose
λ_y	toplotna provodljivost u pravcu y ose

λ_z	toplotna provodljivost u pravcu z ose
ν	Poisson-ov koeficijent
ρ	gustina materijala
$\boldsymbol{\sigma}$	vektor napona konačnog elementa
σ	standardna devijacija
σ_{AB}	napon usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu
$\sigma_{A,p}$	dozvoljena vrednost dodatnih napona pritiska u šini
$\sigma_{A,t}$	dozvoljena vrednost dodatnih napona zatezanja u šini
σ_a	zatezna čvrstoća
σ_{BT}	napon usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta
σ_f	slobodni naponi sa izračunatom vrednošću napona usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu
σ_f^*	slobodni naponi bez procenjene vrednosti napona usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu
σ_l	donja granična vrednost napona u testovima zamora šinskog čelika
$\boldsymbol{\sigma}_m$	vektor napona poprečnog preseka konačnog elementa
σ_m	srednja vrednost napona u testovima zamora šinskog čelika
σ_Q	napon usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila
$\sigma_{Q,y}$	napon usled savijanja šine pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila u pravcu y ose
$\sigma_{Q,z}$	napon usled savijanja šine pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila u pravcu z ose
σ_R	otpor mehaničkog šinskog spoja
σ_r	zaostali napon
σ_T	temperaturni napon
$\sigma_{T,n}$	nulti napon u šini
$\sigma_{T,p}$	maksimalni napon pritiska u šini
$\sigma_{T,t}$	maksimalni napon zatezanja u šini
σ_u	gornja granična vrednost napona u testovima zamora šinskog čelika
σ_{VB}	napon usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu
σ_x	normalni napon u pravcu x ose
σ_y	normalni napon u pravcu y ose
σ_z	normalni napon u pravcu z ose
τ_{xy}	smičući napon u pravcu y ose za površinu sa normalom u pravcu x ose
τ_{xz}	smičući napon u pravcu z ose za površinu sa normalom u pravcu x ose
τ_{yz}	smičući napon u pravcu z ose za površinu sa normalom u pravcu y ose
τ_0	linearna torziona krutost sistema šinskog pričvršćenja
φ	faktor dinamičkog uvećanja osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu
$\chi_x(x)$	deformacija od torzije poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu x ose
$\chi_y(x)$	deformacija od savijanja poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu y ose
$\chi_z(x)$	deformacija od savijanja poprečnog preseka konačnog elementa u pravcu z ose
Ω	prostorni domen
ω'	ugao obrtanja kraja mosta
$2L_{TB}$	talasna dužina izvijenog koloseka
$2L_0$	talasna dužina početne bočne imperfekcije koloseka

1 UVOD

1.1 Kolosek sa kontinualno zavarenim šinama

Kolosek sa kontinualno zavarenim šinama u teorijskom smislu predstavlja linijsku konstrukciju koja se sastoji od dve „dugačke” paralelno postavljene šine na standardnom rastojanju, koje su sistemom šinskog pričvršćenja povezane sa pragovima. U praksi, kolosek sa kontinualno zavarenim šinama sastoji se od šina određene dužine koje su čeonno zavarene, tako da formiraju neprekidnu voznu površinu na glavi šine.

Dužina pojedinačnih šina tokom vremena i sa razvojem železnice neprestano se povećavala sa težnjom smanjenja broja šinskih spojeva, da bi 1899. godine bilo izvršeno prvo zavarivanje šina sa ciljem ukidanja šinskih spojeva iz koloseka. Postupak čeonog elektrootpornog zavarivanja šina razvijen je 1930. godine i zasnivao se na principu fuzije, odnosno spajanju dva kraja šine bez dodatnih materijala za zavarivanje. S obzirom da su se procesom elektrootpornog zavarivanja šina dobijali zavari visokog kvaliteta sa zanemarljivim narušavanjem strukture šinskog čelika u zoni zavara, ovaj postupak zavarivanja se do danas zadržao na železnici uz permanentno usavršavanje. Poslednjih godina razvijene su mašine sa specijalnom namenom za automatsko elektrootporno zavarivanje šina u koloseku kako bi se dodatno ubrzao sam proces zavarivanja šina i polaganja koloseka (slika 1.1) [1].



Slika 1.1 Mašina za automatsko elektrootporno zavarivanje šina u koloseku [1]

Prednosti koloseka sa kontinualno zavarenim šinama (slika 1.2, levo) u odnosu na kolosek sa mehaničkim šinskim spojevima (slika 1.2, desno) ogledaju se u značajnom smanjenju otpora kotrljanja točka železničkog vozila po šini i poboljšanju voznih karakteristika koloseka, uz istovremeno povećanje brzine i udobnosti vožnje.



Slika 1.2 Zavareni šinski spoj (levo) [1] i mehanički šinski spoj (desno) [2]

Sa druge strane, kod koloseka sa kontinualno zavarenim šinama ne postoje zazori između zavarenih šina koji bi omogućili njihovo podužno temperaturno dilatiranje i iz tog razloga dolazi do formiranja temperaturnih napona (eng. temperature stresses). Kao posledica formiranja temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama može doći do izvijanja koloseka usled ekstremnih letnjih temperatura (slika 1.3, levo), kao i do formiranja zazora pri pucanju šine usled ekstremnih zimskih temperatura (slika 1.3, desno). Oba granična stanja napreznja kontinualno zavarenih šina zavise od sve više prisutnog fenomena globalnog zagrevanja i direktno utiču na bezbednost železničkog saobraćaja.



Slika 1.3 Izvijanje koloseka (levo) [3] i formiranje zazora pri pucanju šine (desno) [4]

Šine sa nožicom, vratom i glavom izumeo je Charles Vignoles 1836. godine i ovakav oblik šina ubrzo je našao primenu na železnici. Evropski standard EN 13674-1 [5] definiše geometrijske i materijalne karakteristike Vignole-ovih železničkih šina mase 46 kg/m i većih masa po dužnom metru koje se koriste na konvencionalnim prugama, kao i prugama za velike brzine. Standardom je obuhvaćeno 23 tipa profila šina, kao i 9 klasa šinskog čelika tvrdoće 200-440 HBW (Hardness Brinell Wolfram carbide). Takođe, standard definiše dve klase tolerancija profila šina, kao i dve klase ravnosti šina.

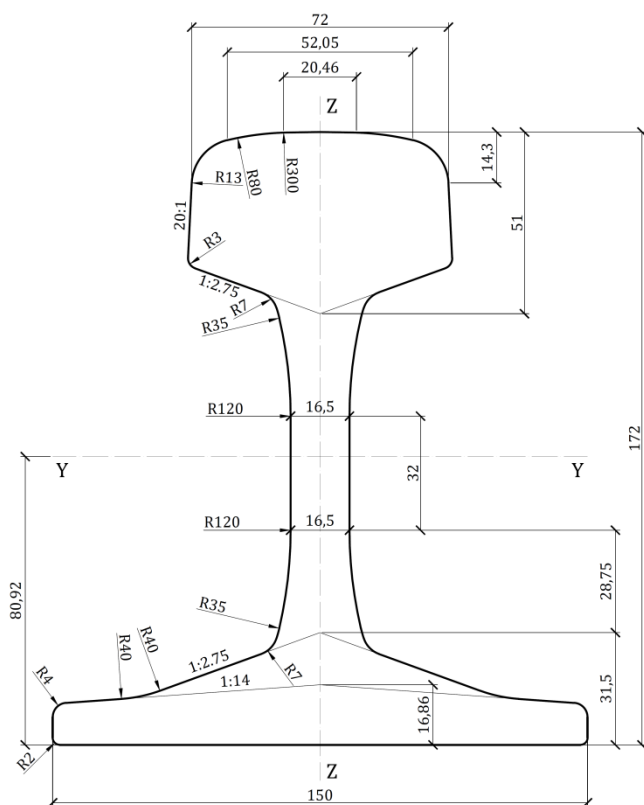
U skladu sa standardom EN 13674-1 [5] železničke šine se definišu sledećim parametrima: tip profila šine, klasa šinskog čelika, klasa tolerancija profila šine, klasa ravnosti šine, dužina šine, nebušeni ili izbušeni krajevi šine i lokacije i dimenzije rupa za zavrtnjeve po potrebi, poseban tretman koji treba primeniti na rupe za zavrtnjeve i odgovarajuće tolerancije rupa za zavrtnjeve (opciono), hladno utiskivanje na izrezanom licu šine (opciono), zahtevi za označavanje bojama (opciono).

U tabeli 1.1 prikazani su tipovi profila šina koji su obuhvaćeni standardom [5] kao i njihove trenutne i prethodne oznake.

Tabela 1.1 Tipovi profila šina obuhvaćeni standardom EN 13674-1 [5]

Oznaka profila	Prethodna oznaka profila
46E1, 46E2, 46E3, 46E4	SBB I, U33, NP 46, 46 UNI
49E1, 49E2, 49E5	DIN S49, S49 T, /
50E1, 50E2, 50E3, 50E4, 50E5, 50E6	U50E, 50EB-T, BV 50, UIC 50, 50 UNI, U 50
52E1	52 RATP
54E1, 54E2, 54E3, 54E4, 54E5	UIC 54, UIC 54 E, DIN S54, /, 54E1AHC
55E1	U55
56E1	BS 113lb BR Variant
60E1, 60E2	UIC 60, /

U okviru doktorske disertacije koriste se profili šina tipa 60E1, 54E2 i 49E1. Na slikama 1.4, 1.5 i 1.6 prikazane su redom geometrijske karakteristike profila šina tipa 60E1, 54E2 i 49E1.



Tip profila šine: 60E1

Karakteristike profila šine

Površina poprečnog preseka:
76,70 cm²

Masa po dužnom metru:
60,21 kg/m

Moment inercije (Y osa):
3038,3 cm⁴

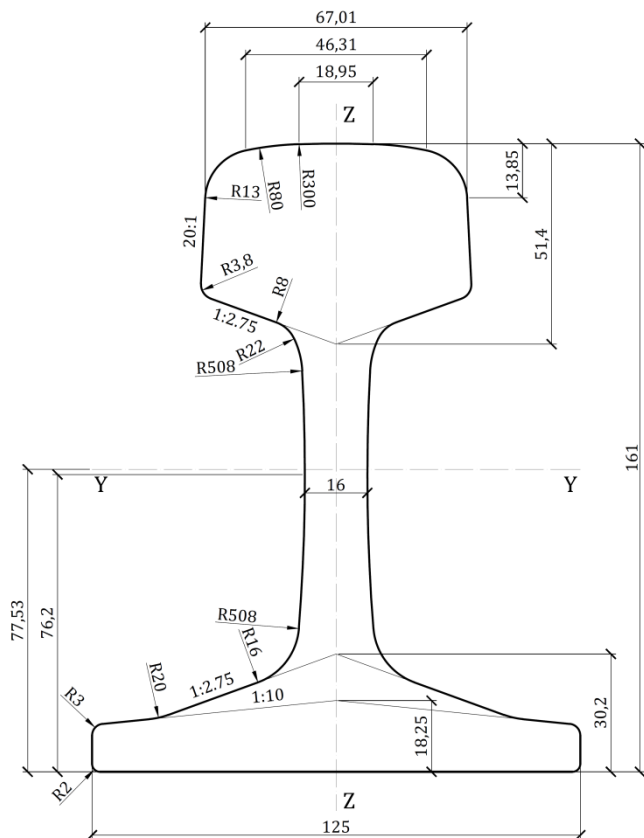
Otporni moment (Y osa) - glava:
333,6 cm³

Otporni moment (Y osa) - nožica:
375,5 cm³

Moment inercije (Z osa):
512,3 cm⁴

Otporni moment (Z osa):
68,3 cm³

Slika 1.4 Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 60E1 [5]



Tip profila šine: 54E2

Karakteristike profila šine

Površina poprečnog preseka:
68,56 cm²

Masa po dužnom metru:
53,82 kg/m

Moment inercije (Y osa):
2307 cm⁴

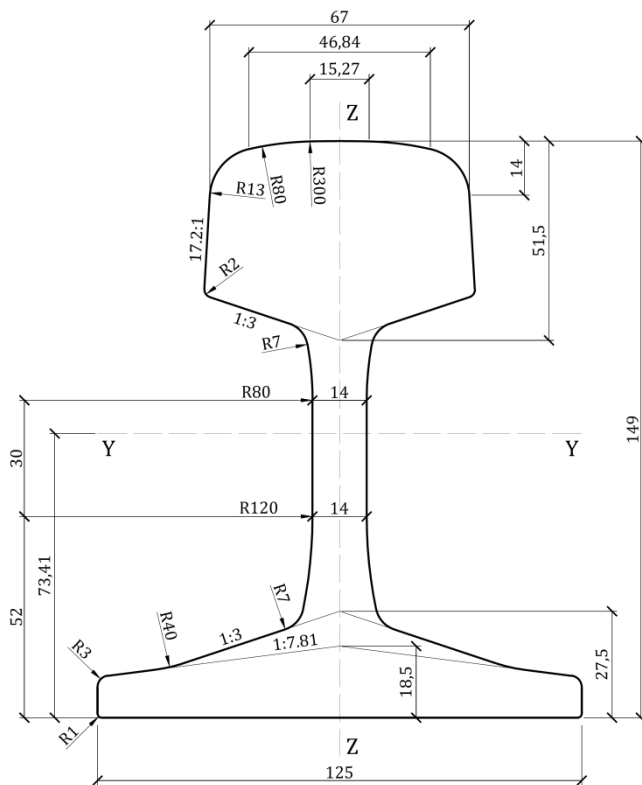
Otporni moment (Y osa) - glava:
276,4 cm³

Otporni moment (Y osa) - nožica:
297,6 cm³

Moment inercije (Z osa):
341,5 cm⁴

Otporni moment (Z osa):
54,6 cm³

Slika 1.5 Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 54E2 [5]



Tip profila šine: 49E1

Karakteristike profila šine

Površina poprečnog preseka:
62,92 cm²

Masa po dužnom metru:
49,39 kg/m

Moment inercije (Y osa):
1816 cm⁴

Otporni moment (Y osa) - glava:
240,3 cm³

Otporni moment (Y osa) - nožica:
247,5 cm³

Moment inercije (Z osa):
319,1 cm⁴

Otporni moment (Z osa):
51,0 cm³

Slika 1.6 Nominalne geometrijske karakteristike profila šine tipa 49E1 [5]

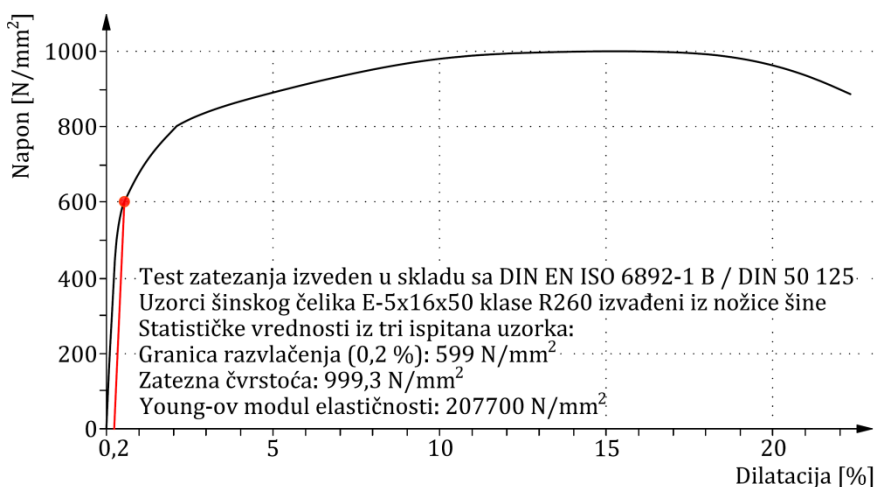
U tabeli 1.2 prikazane su klase šinskog čelika koje su obuhvaćene standardom [5], kao i njihova tvrdoća po Brinell-u, minimalna zatezna čvrstoća, minimalno izduženje, opšti hemijski sastav i tretmani obrade.

Tabela 1.2 Klase šinskog čelika obuhvaćene standardom EN 13674-1 [5]

Klasa čelika		Opseg tvrdoće po Brinell-u [HBW]	Minimalna zatezna čvrstoća [N/mm ²]	Minimalno izduženje [%]	Opis
Ime čelika	Broj čelika				
R200	1.0521	200-240	680	14	Nelegirani (C-Mn) Termički neobrađen
R220	1.0524	220-260	770	12	
R260	1.0623	260-300	880	10	
R260Mn	1.0624	260-300	880	10	
R320Cr	1.0915	320-360	1080	9	Legirani (Cr 1 %) Termički neobrađen
R350HT	1.0631	350-390	1175	9	Nelegirani (C-Mn) Termički obrađen
R350LHT	1.0632	350-390	1175	9	Nisko legirani (C-Mn) Termički obrađen
R370CrHT	1.0992	370-410	1280	9	Legirani (C-Mn) Termički obrađen
R400HT	1.1254	400-440	1280	9	Nelegirani (C-Mn) Termički obrađen

Šinski čelici obuhvaćeni standardom [5] po strukturi su perlitni čelici koji se sastoje od ferita i cementita sa dodatkom ugljenika. Pored ugljenika (C) koji je prisutan u količini od 0,38-1,07 % mase, šinski čelici sadrže i mangan (Mn) koji je prisutan u količini od 0,65-1,35 % mase, osim kod šinskog čelika klase R260Mn gde je mangan prisutan u povećanoj količini od 1,25-1,75 % mase. Visoko prisustvo ugljenika povećava tvrdoću i zateznu čvrstoću šinskog čelika, uz istovremeno smanjuje njegove duktilnosti. Sa druge strane, visoko prisustvo mangana kompenzuje potrebnu duktilnost šinskom čeliku. Takođe, u manjim količinama prisutni su: silicijum (Si) u količini od 0,13-0,62 % mase, osim kod šinskih čelika klasa R320Cr i R370CrHT gde je silicijum prisutan u povećanoj količini od 0,38-1,12 % mase, fosfor (P) u količini od 0,020-0,040 % mase i sumpor (S) u količini od 0,020-0,040 % mase. Silicijum povećava otpornost na habanje šinskog čelika, dok su fosfor i sumpor nus produkti u procesu proizvodnje šinskog čelika koji smanjuju njegovu duktilnost i mogu dovesti do krtog loma. Legiranje šinskih čelika vrši se dodavanjem sledećih elemenata: hrom (Cr) u količini manjoj od 0,15 % mase, osim kod šinskih čelika klasa R350LHT i R400HT gde je hrom prisutan u povećanoj količini manjoj od 0,30 % mase, kao i kod šinskih čelika klasa R370CrHT i R320Cr gde je hrom prisutan u povećanoj količini manjoj od 0,35-0,65 % mase, odnosno 0,75-1,25 % mase, aluminijuma (Al) u količini od 0,004 % mase, vanadijuma (V) u količini od 0,030 % mase, osim kod šinskog čelika klase R320Cr gde je vanadijum prisutan u povećanoj količini od 0,18-0,20 % mase, azota (N) u količini od 0,009-0,010 % mase. Hrom i vanadijum se takođe dodaju šinskom čeliku kako bi se povećava njegova otpornost na habanje [5].

U okviru doktorske disertacije koristi se šinski čelik klase R260 čiji je eksperimentalno određen dijagram napon-dilatacija prikazan na slici 1.7, a usvojene proračunske materijalne karakteristike u tabeli 1.3.



Slika 1.7 Eksperimentalno određen dijagram napon-dilatacija šinskog čelika klase R260 [6]

Eksperimentalno određena zatezna čvrstoća šinskog čelika klase R260 iznosi približno 1000 N/mm² i zadovoljava propisanu minimalnu vrednost od 880 N/mm² iz standarda [5] (slika 1.7 i tabela 1.2), dok vrednost granice razvlačenja iznosi približno 600 N/mm² [6].

Tabela 1.3 Usvojene proračunske materijalne karakteristike šinskog čelika klase R260 [5], [6], [7], [8]

Young-ov modul elastičnosti (E)	210000 N/mm ²
Poisson-ov koeficijent (ν)	0,3
Gustina materijala (ρ)	7850 kg/m ³
Koeficijent termičkog širenja (α)	1,15·10 ⁻⁵ 1/°C
Toplotna provodljivost (λ)	50 W/(m·°C)
Specifični toplotni kapacitet (c)	450 J/(kg·°C)

Usvojene proračunske materijalne karakteristike šinskog čelika odnose se na radne temperature šina u koloseku, što je u skladu sa istraživanjima u okviru doktorske disertacije. Sa porastom temperatura menjaju se i materijalne karakteristike šinskog čelika tako što zatezna čvrstoća, Young-ov modul elastičnosti, toplotna provodljivost i gustina materijala opadaju, dok sa druge strane koeficijent termičkog širenja, specifični toplotni kapacitet i Poisson-ov koeficijent rastu [9].

Nominalne i stvarne dimenzije profila šine ne smeju odstupati više od propisanih tolerancija u skladu sa standardom [5]. Razlikuju se dve klase tolerancija profila šina: klasa X sa strožijim uslovima i manjim odstupanjima u geometriji profila šine i klasa Y sa blažim uslovima i većim odstupanjima u geometriji profila šine.

Takođe, proverava se i podužna ravnost šine, ravnost gornje površine glave šine i profil glave šine, na osnovu čega se definišu dve klase ravnosti šina: klasa A sa strožijim uslovima i manjim odstupanjima u ravnosti šine i klasa B sa blažim uslovima i većim odstupanjima u ravnosti šine. Šine manje mase od 54 kg/m se isporučuju samo sa tolerancijama klase B. One šine koje ne zadovoljavaju propisane tolerancije se odbacuju i kao takve mogu biti predmet ponovnog ravnjanja [5].

Definisanje dužine šina zavisi od uslova na terenu prilikom njihovog transporta i ugradnje. Uobičajena dužina šina koje se kontinualno zavaruju je 120 m. Sa napretkom tehnologije proizvodnje povećavaju se i dužine šina, pa se danas mogu poručiti šine određenih proizvođača dužina od 260 m, kao i od 400 m.

Šine koje se kontinualno zavaruju u koloseku, a koje se u toku montaže privremeno spajaju stegama ne buše se na krajevima. Sa druge strane, na šinama koje se spajaju mehaničkim ili lepljenim šinskim spojevima na krajevima se buše rupe za zavrtnjeve u skladu sa odgovarajućim tolerancijama [5].

1.2 Predmet i ciljevi istraživanja

Temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama mogu se podeliti u dve grupe: osnovni temperaturni naponi i dodatni temperaturni naponi.

Osnovni temperaturni naponi nastaju usled temperaturne promene u kontinualno zavarenim šinama u odnosu na neutralnu temperaturu, tj. temperaturu završnog ugrađivanja i zavarivanja šina. Određivanje osnovnih temperaturnih napona podrazumeva termičko-naponsku analizu kontinualno zavarenih šina usled temperaturnih uticaja u samoj šini. S obzirom da je raspodela temperature u kontinualno zavarenim šinama neravnomerna i tokom vremena promenljiva, javlja se problem njenog preciznog određivanja.

Istraživači širom sveta su korišćenjem različitih laboratorijskih i in-situ metoda pokušali da odrede podužne napone u kontinualno zavarenim šinama. (Polu)destruktivne metode delimično ili potpuno oštećuju šinu u samom postupku ispitivanja, dok sa druge strane, glavni nedostatak nedestruktivnih metoda je taj što su one pretežno površinske.

Dodatni temperaturni naponi nastaju usled interakcije kolosek/most, tj. usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta u odnosu na referentnu temperaturu mosta pri kojoj je izvršeno završno ugrađivanje i zavarivanje šina. Određivanje dodatnih temperaturnih napona podrazumeva termičko-naponsku analizu kontinualno zavarenih šina na mostu usled temperaturnih uticaja u konstrukciji mosta. Analiza se zasniva na sprovođenju iterativnog postupka nelinearnih numeričkih proračuna interakcije kolosek/most.

Glavni nedostatak postojećih proračunskih postupaka kao i trenutno važećih preporuka i standarda koji se bave interakcijom kolosek/most je taj što oni ne daju detaljne smernice za smanjenje i ograničenje vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na

mostu. U slučaju prekoračenja graničnih vrednosti dodatnih napona u šinama na mostu može doći do ugrožavanja bezbednosti železničkog saobraćaja, tako da je ovo pitanje i dalje aktuelno na nivou svetskih istraživanja.

Na osnovu definisanog predmeta istraživanja, kao i nedostataka prethodnih metoda za određivanje osnovnih temperaturnih napona i nedostataka u okviru postojeće tehničke regulative iz oblasti dodatnih temperaturnih napona definisani su sledeći ciljevi istraživanja: (1) razvoj metodologije za određivanje temperaturnog polja šine i osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenoj šini usled neravnomerne raspodele temperature, (2) kvantifikovanje preraspodele temperature i osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenoj šini usled prenosa toplote između šine i praga, kao i između nožice šine i zastora od tucanika primenom razvijene metodologije, (3) uporedna analiza vrednosti osnovnih temperaturnih napona određenih na osnovu razvijene metodologije sa osnovnim temperaturnim naponima određenim na osnovu uobičajenih inženjerskih proračuna, (4) primena parametarske analize u određivanju uticaja elemenata interakcije kolosek/most na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu, kao i definisanje smernica za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta.

U istraživanju u okviru doktorske disertacije primenjen je numerički pristup zasnovan na metodi konačnih elemenata u cilju što preciznijeg i pouzdanijeg određivanja osnovnih i dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama. Razvijena je metodologija za određivanje temperaturnog polja i osnovnih temperaturnih napona, zasnovana na numeričkom rešavanju nestacionarne jednačine provođenja toplote šine na osnovu izmerenih površinskih temperatura šine i primenom spregnute nestacionarne termičko-naponske analize. Pretpostavljeno je da je raspodela temperature u šini neravnomerna i promenljiva tokom vremena, kao i da usled različite zagrejanosti šina, pragova i zastora od tucanika, dolazi do međusobne razmene toplote. Pretpostavljeno je da se temperaturno polje šine može odrediti na osnovu poznatih početnih i graničnih uslova po površinskoj temperaturi šine, a osnovni temperaturni naponi u kontinualno zavarenoj šini na osnovu poznavanja temperaturnog polja šine i odgovarajućih graničnih uslova.

Određivanje dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu podrazumeva primenu numeričke analize i multidisciplinarni pristup koji obuhvata savremena znanja iz oblasti gornjeg stroja železnica, mostovskih konstrukcija, kao i teorije konstrukcija. U tom smislu, razmatran je integralni pristup u projektovanju konstrukcija koloseka i mosta kako bi se izbegla mogućnost prekoračenja graničnih vrednosti dodatnih napona. S obzirom da su dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama na mostu posledica interakcije kolosek/most, pretpostavljeno je da oni zavise od temperaturne promene u konstrukciji mosta, kao i od parametara konstrukcija koloseka i mosta. Takođe, pretpostavljeno je i da se parametarskom analizom elemenata konstrukcija koloseka i mosta može doći do zaključaka kako i u kojoj meri ovi elementi utiču na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu.

1.3 Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija sastoji se od osam poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod, prikazuje geometrijske i materijalne karakteristike Vignole-ovih železničkih šina i objašnjava predmet i ciljeve istraživanja.

Drugo poglavlje odnosi se na pregled literature. U njemu su predstavljena dosadašnja istraživanja iz oblasti osnovnih temperaturnih napona, kao i metode za određivanje temperaturnog polja i neutralne temperature šine. Takođe, predstavljena su i dosadašnja istraživanja iz oblasti dodatnih temperaturnih napona, kao i metode proračuna interakcije kolosek/most.

Treće poglavlje prikazuje strukturu napona u kontinualno zavarenim šinama. U ovom poglavlju teorijski su razmatrani osnovni i dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama. Takođe, sa aspekta dozvoljenih vrednosti napona u kontinualno zavarenim šinama analizirani su još: zaostali naponi, naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila, naponi usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, kao i naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu.

U četvrtom poglavlju prikazana je postavka sprovedenih eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine. Merenja su obavljena uz pomoć razvijenog mernog sistema koji se zasniva na primeni termistorskih senzora. Takođe, izvršena je analiza dobijenih rezultata eksperimentalnih merenja, kao i rezultata kontrolnih merenja sa gušćim rasporedom senzora u cilju provere pouzdanosti sprovedenih merenja.

Peto poglavlje prikazuje numeričku analizu osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama. U okviru ovog poglavlja predstavljena je razvijena metodologija za određivanje temperaturnog polja i osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama. Metodologija se zasniva na rešavanju nestacionarne jednačine provođenja toplote šine, uz poznavanje površinskih temperatura šine, korišćenjem spregnute nestacionarne termičko-naponske analize. Takođe, predstavljeni su rezultati dobijeni primenom razvijene metodologije, kao i uporedna analiza sa rezultatima koji su dobijeni u skladu sa inženjerskom praksom.

U šestom poglavlju prikazana je numerička analiza dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Predstavljeni su rezultati proračuna interakcije kolosek/most za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija uzimajući u obzir uticaje parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona. Takođe, definisane su odgovarajuće smernice za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta sa aspekta interakcije kolosek/most i smanjenja dodatnih temperaturnih napona.

Sedmo poglavlje prikazuje zaključna razmatranja doktorske disertacije, kao i preporuke za dalja istraživanja.

U osmom poglavlju prikazan je spisak korišćene literature.

2 PREGLED LITERATURE I ANALIZA DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1 Istraživanja u oblasti osnovnih temperaturnih napona

Pri određivanju osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama najznačajniji ulazni parametar je temperatura šine [10]. U laboratorijskim ispitivanjima koje je sproveo Ryan [11] pokazano je da su površinske temperature šine u posmatranom poprečnom preseku različite i da zavise od ugla pod kojim se šina zagreva. U in-situ istraživanju koje su sproveli Chapman, Thornes i White [12] eksperimentalna merenja su pokazala da su površinske temperature šine promenljive duž koloseka zbog uticaja lokalne mikrokline. Prema preglednoj studiji koju su sproveli Wu i grupa autora [13], temperatura šine se može odrediti na osnovu empirijskih metoda i metoda modeliranja. Razlika između empirijskih metoda i metoda modeliranja je u tome što se kod empirijskih metoda koriste izmereni podaci za formulaciju i validaciju temperature šine, dok se kod metoda modeliranja koriste zakoni fizike i matematike za formulaciju, a izmereni podaci za validaciju temperature šine.

Najjednostavnije empirijske jednačine za određivanje temperature šine razvili su Hunt [14] i Esveld [15] koristeći samo izmerenu temperaturu vazduha kao ulaznu veličinu. Sa druge strane, u istraživanju koje su sproveli Chapman i grupa autora [16] primenjena je metoda modeliranja na geometrijski uprošćenom modelu šine. Izvršeno je prikupljanje meteoroloških podataka i primenjena je jednačina energetskeg bilansa za proračun razmene toplote između šine i vazduha. Pretpostavljeno je da ne postoji prenos toplote između nožice šine i okoline, kao i da nema provodljivosti toplote sa donje strane nožice šine. U istraživanju koje su sproveli Zhang i Lee [17], takođe je pretpostavljeno da ne postoji prenos toplote između šine i praga, niti između šine i zastora od tucanika. Istraživanje koje su sproveli Hong i grupa autora [18] predstavilo je novi model predviđanja temperature šine zasnovan na jednačini energetskeg bilansa, uzimajući u obzir položaj sunca.

Metode zasnovane na praćenju meteoroloških parametara za određivanje temperature šine, kao i usvojene fizičke pretpostavke da ne postoji prenos toplote između šine i okoline (pragova i zastora od tucanika) nisu realne i ne pružaju stvarnu raspodelu temperature u šinama [10]. Zbog toga, pristup zasnovan na merenju površinskih temperatura šine [12], [19], [20] se sve više koristi u inženjerskoj praksi za praćenje stanja koloseka sa kontinualno zavarenim šinama [10].

Pored prethodno navedenih metoda koje se zasnivaju na određivanju temperature šine, osnovni temperaturni naponi se mogu odrediti i na osnovu principa da šinski čelik ima različite akustične i elektromagnetne karakteristike u različitim stanjima (nivoima) naprezanja. U istraživanju koje je sproveo Hurlebaus [21] sa ciljem da se odrede temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama korišćena je metoda polarizacija Rayleigh-evih površinskih talasa. Ovakav pristup podrazumeva nedestruktivni postupak koji se zasniva na akustično-elastičnom efektu ultrazvučnih talasa. U tu svrhu razvijeni su analitički modeli da bi se objasnila veza između polarizacije Rayleigh-evih talasa i naprezanja kontinualno zavarenih šina. U studiji koju su sproveli Nucera i Lanza di Scalea [22] predstavljen je nedestruktivni postupak i merni sistem Rail-NT zasnovan na nelinearnim ultrazvučnim talasima. Teorijski deo studije u ovom istraživanju podrazumevao je razvoj konstitutivnog modela kako bi se objasnio nastanak nelinearnih efekata usled termičkog širenja šine. Numerički deo studije razvijen je za predviđanje unutrašnje rezonancije nelinearnih ultrazvučnih talasa.

Za razliku od akustičnih principa koji su korišćeni u prethodnim istraživanjima, Hayes [23] predstavio je novu tehnologiju za kontrolu napona u kontinualno zavarenim šinama - MAPS™.

Ova tehnologija se koristi za nedestruktivno merenje napona i može se primeniti na sve materijale koji pokazuju feromagnetno ponašanje uključujući feritne čelike, liveno gvožđe i nerđajuće čelike. Takođe, razvijen je i novi uređaj MAPS-SFT za nedestruktivno merenje neutralne temperature šine. U istraživanju koje su sproveli Shust, Read i Jury [24] predstavljen je uređaj koji je osmišljen da na osnovu promena u vibracijama šina između sistema šinskih pričvršćenja pruži nedestruktivnu procenu neutralne temperature.

Tunna [25] predstavio je u svom izveštaju VERSE® metodu (Vertical Rail Stress Equipment), koja je našla komercijalnu primenu u inženjerskoj praksi pri nedestruktivnom određivanju neutralne temperature šine. Primena ove metode podrazumeva oslobađanje šine na kratkoj dužini od sistema šinskih pričvršćenja, podizanje šine na dva oslonca i njeno savijanje pomoću VERSE opreme. Metoda se zasniva na merenju aplicirane sile i pomeranja šine. Primenom ovog postupka, uz poznavanje temperature šine u trenutku merenja, može se direktno proceniti neutralna temperatura šine.

Peng i Ding [26] prikazali su u svom istraživanju sistem za nedestruktivno određivanje osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama koji se zasniva na akustično-elastičnoj teoriji i primeni LCR (Longitudinal Critically Refracted) talasa. Takođe, predstavljeni su principi rada ultrazvučne sonde i merenja vremena prolaska LCR talasa kroz šinu. U istraživanju koje je sproveo Gokhale [27] razvijen je postupak za određivanje napona u kontinualno zavarenim šinama korišćenjem akustično-elastičnog efekta ultrazvučnih talasa. Razvijeni su analitički modeli koji predviđaju akustično-elastičan efekat za različite vrste talasa, kao i numeričke simulacije modela u cilju određivanja krivih brzine talasa u zavisnosti od napona.

Wang i grupa autora [28] su u svom istraživanju prikazali MBN metodu (Magnetic Barkhausen Noise) kao i njenu primenu pri merenju napona u kontinualno zavarenim šinama. Analizirane su karakteristike MBN signala, uključujući srednji kvadrat, prosečnu amplitudu i broj impulsa, a uvedena je i nova karakteristika tj. odnos vršne vrednosti i širine na polovini maksimuma. Sve ove karakteristike MBN signala opadaju sa povećanjem napona pritiska, s tim da odnos vršne vrednosti i širine na polovini maksimuma ima najbržu stopu opadanja što dovodi do zaključka da ova karakteristika ima znatno bolju osetljivost pri merenju napona.

U istraživanju koje su sproveli Liu i grupa autora [29] predstavljena je nova metoda za određivanje temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama korišćenjem mernih traka postavljenih u dva međusobno ortogonalna pravca, kao i uređaj za monitoring naprezanja šine, zasnovan na predstavljenoj metodi.

Kish i Read [30] su u svom istraživanju razvili bežični modul koji je zasnovan na primeni mernih traka za monitoring temperaturnih napona. Ovaj uređaj se fiksira na vrat šine i u određenim vremenskim intervalima beleži podatke koji se zatim prenose na računar gde se mogu pregledati i dalje analizirati.

U istraživanju koje su sproveli Zhu, Lanza di Scalea i Fateh [31] predstavljena je HDM metoda (Hole-Drilling Method) sa novim setom koeficijenata kalibracije za određivanje polja rasterećenog naprezanja šine primenom metode konačnih elemenata. Temperaturni naponi u šini primenom ove metode procenjuju su nakon kompenzacije komponenata rezidualnih napona, na osnovu eksperimentalno određenih statističkih relacija između podužnih i vertikalnih komponenti rezidualnih napona.

Pan i grupa autora [32] su u svom istraživanju, primenom metode konačnih elemenata, uzimajući u obzir otpore sistema šinskog pričvršćenja, izvršili proračun temperaturnih napona u šini. Korišćeni su granični uslovi za kontrolu promene temperature okoline, kako bi se dobila raspodela temperaturnih napona u šini. Analizirana su pomeranja, kao i podužna, poprečna i vertikalna komponenta temperaturnog naprezanja šine. Rezultati istraživanja su

pokazali da je na mestu kontakta sistema šinskog pričvršćenja i šine izražena koncentracija temperaturnog naprezanja.

S obzirom da su prethodno prikazane laboratorijske i in-situ metode za određivanje osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama uglavnom indirektno i vrlo kompleksne sa aspekta primene različitih fizičkih principa i samog postupka izvođenja, kao takve nisu našle široku primenu u inženjerskoj praksi. Sa druge strane, nameće se rešenje sa primenom numeričkih metoda modeliranja koje se oslanjaju na eksperimentalno određene ulazne veličine. Na taj način se dobija pouzdana metodologija za određivanje i praćenje stanja naprezanja kontinualno zavarenih šina koja pruža znatno realniju raspodelu temperatura i temperaturnih napona unutar šine.

2.2 Istraživanja u oblasti dodatnih temperaturnih napona

Određivanje dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama podrazumeva proračun interakcije kolosek/most usled temperaturnih uticaja u konstrukciji mosta. Fryba [33] je u svom istraživanju predstavio analitički pristup u rešavanju temperaturne interakcije kolosek/most. Prikazana je teorijska formulacija kontinualno zavarenih šina na mostu izloženih temperaturnim uticajima uzimajući u obzir linearnu podužnu krutost veze između koloseka i mosta. Analitički pristup je upoređen sa sprovedenim eksperimentalnim istraživanjima i predložene su dozvoljene dilatacionine dužine železničkih mostova sa kontinualno zavarenim šinama.

Ruge i Birk [34] su u svom istraživanju po prvi put analizirali podužne sile u kontinualno zavarenim šinama na mostu usled nelinearne formulacije interakcije kolosek/most. Uzeta je u obzir istorija deformacija, a nelinearne formulacije krutosti izvedene su za temperaturnu promenu u konstrukciji mosta, kao i za horizontalna i vertikalna opterećenja od železničkog vozila. U istraživanju koje su sproveli Ruge i grupa autora [35] zaključeno je da naprezanje kontinualno zavarenih šina na mostu u velikoj meri zavise od ostvarene veze između koloseka i mosta u podužnom pravcu. Ovu vezu karakteriše nelinearna podužna krutost i značajna zavisnost od toga da li je kolosek neopterećen ili opterećen. Efekat sekvence „neopterećen-opterećen-neopterećen“ kolosek tokom prelaska železničkog vozila preko mosta razmatra se statički i dinamički sa uzimanjem u obzir istorije deformacija pri proračunu naprezanja kontinualno zavarenih šina.

Cai [36] je u svom istraživanju predstavio integralni model koloseka i mosta formiran primenom metode konačnih elemenata za analizu dodatnih podužnih sila u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Razmatrana je raspodela dodatnih podužnih sila usled temperaturnih uticaja, savijanja konstrukcije gornjeg stroja mosta, kočnja železničkog vozila na mostu, kao i usled pucanja šine na mostu. U istraživanju koje su sproveli Okelo i Olabimta [37] predstavljen je proračun interakcije kolosek/most za kolosek na čvrstoj podlozi (betonskoj ploči). Interakcija između kontinualno zavarenih šina i mostovske konstrukcije ostvarena je preko sistema šinskih pričvršćenja koji imaju nelinearni odnos sila/pomeranje. Da bi se bolje razumeo mehanizam interakcije kolosek/most sprovedena je trodimenzionalna analiza primenom metode konačnih elemenata, kako bi se dobio sveobuhvatan uvid u sile interakcije kolosek/most.

Zhang, Wu i Li [38] su u svom istraživanju analizirali interakciju kolosek/most kako bi odredili podužna naprezanja i pomeranja sistema pri različitim temperaturnim uticajima i opterećenjima od železničkog vozila sa aspekta upotrebljivosti i bezbednosti konstrukcije koloseka. Laboratorijski eksperimenti su sprovedeni da bi se utvrdile tačne nelinearne karakteristike određenih vrsta sistema šinskih pričvršćenja. Rezultati dobijeni korišćenjem eksperimentalnih krivih pomeranje/podužni otpor sistema šinskih pričvršćenja su upoređeni sa onima iz evropskih standarda. Utvrđeno je da metode proračuna i usvojene krive

pomeranje/podužni otpor sistema šinskih pričvršćenja imaju značajan uticaj na tačnost dobijenih vrednosti dodatnih podužnih naprežanja kontinualno zavarenih šina i relativnih podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta. U istraživanju koje su sproveli Strauss i grupa autora [39] zaključeno je da na naprežanje kontinualno zavarenih šina na mostu ne utiče samo deformacija mostovske konstrukcije usled temperaturnih uticaja, već i karakteristike sistema šinskih pričvršćenja. U ovom istraživanju su predstavljeni alternativni načini modeliranja veze između koloseka i mosta na bazi kompozitnih materijala koji mogu prevazići nedostatke modela opruge. Razvijen je nelinearni model čitavog sistema za kolosek u zastoru i kolosek na čvrstoj podlozi.

Yun i grupa autora [40] su u svom istraživanju razvili trodimenzionalni numerički model za sprovođenje nelinearne analize i izračunavanje graničnih vrednosti dodatnih napona pritiska uzimajući u obzir različite uslove stanja koloseka. Prema dobijenim rezultatima, zaključeno je da propisane vrednosti dodatnih napona pritiska treba umanjiti kada kolosek ima relativno male vrednosti bočnog otpora. U istraživanju koje su sproveli De Backer i grupa autora [41] detaljno je istražena mogućnost izostavljanja šinskih dilatacionih sprava u koloseku sa kontinualno zavarenim šinama na mostu. Interakcija kolosek/most analizirana je korišćenjem metode konačnih elemenata. Sprovedena je parametarska analiza kako bi se procenila dodatna naprežanja šine usled temperaturnih uticaja, kao i od železničkog vozila na mostu.

Zhang i grupa autora [42] su sproveli istraživanje koje je imalo za cilj da predloži odgovarajući model interakcije kolosek/most kako bi se olakšalo projektovanje mostovskih konstrukcija velikih raspona sa kontinualno zavarenim šinama. Razvijen je model frikcione opruge za formulaciju podužnog otpora sistema šinskih pričvršćenja na osnovu eksperimenatalno određenih ulaznih veličina. Primenom metode konačnih elemenata formiran je model interakcije kolosek/most i na osnovu dobijenih rezultata uočena su poklapanja izmerenih i izračunatih rezultata, što opravdava primenu ovakvog modela u daljim istraživanjima.

Kumar i Upadhyay [43] su u svom istraživanju po prvi put analizirali uticaj temperaturnog gradijenta mosta na rezultate proračuna interakcije kolosek/most, razmatrajući reakcije oslonaca mosta, naprežanja u kontinualno zavarenim šinama i stabilnost koloseka. Sprovedena analiza pokazala je da temperaturni gradijent mosta utiče na vrednosti reakcija u osloncima mosta, ali da nema značajniji uticaj na vrednosti napona u kontinualno zavarenim šinama, kao i na stabilnost koloseka.

U istraživanju koje su sproveli Liu i grupa autora [44] analizirane su vrednosti dodatnih podužnih sila u kontinualno zavarenim šinama na integralnoj (ramovskoj) konstrukciji mosta usled interakcije kolosek/most. Formulirane su odgovarajuće diferencijalne jednačine napona i pomeranja šine i detaljno su analizirani uticaji različitih projektnih parametara koloseka i mosta. Takođe, razmatrani su i odgovarajući sistemi šinskih pričvršćenja, raspored susednih mostovskih konstrukcija i odgovarajuće krutosti stubova mosta.

Yang i Jang [45] su u svom istraživanju predstavili numerički model za analizu interakcije kolosek/most uzimajući u obzir istoriju opterećenja. Ispitivanja podužnih otpora sistema šinskih pričvršćenja sprovedena su kako bi se utvrdile promene podužne krutosti koloseka koje se javljaju u trenutku prelaska železničkog vozila preko mosta. Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeni su zakoni promene podužne krutosti koloseka na čvrstoj podlozi za različite slučajeve opterećenja.

Dai i Liu [46] su u svom istraživanju razvili integralni prostorni model interakcije kolosek/most/stub/temelj primenom metode konačnih elemenata. Sprovedena je uporedna analiza dodatnih podužnih sila u kontinualno zavarenim šinama korišćenjem uobičajenih sistema šinskih pričvršćenja, kao i sistema šinskih pričvršćenja sa smanjenim podužnim otporom. Rezultati analize pokazali su da dodatne sile pritiska i zatezanja mogu biti drastično

smanjene nakon usvajanja sistema šinskih pričvršćenja sa manjim podužnim otporom, što sa druge strane za posledicu ima veću vrednost zazora pri pucanju šine.

Yan, Wu i Li [47] su u svom istraživanju predstavili trodimenzionalni model za proračun temperaturnog polja konstrukcije mosta koji uzima u obzir efekat senke i promene u intenzitetu sunčevog zračenja tokom dana. Eksperimenti na terenu su sprovedeni kako bi se proverila tačnost numeričkog modela. Dobijeni rezultati su pokazali nelinearnu raspodelu temperature u konstrukciji mosta.

U istraživanju koje su sprovedeli Dai i grupa autora [48] analitički je razmatrana interakcija kolosek/most na čeličnim mostovima velikog raspona usled delovanja temperaturnih uticaja. Rezultati proračuna pokazali su da predloženi analitički algoritam može postići skoro istu tačnost kao metod konačnih elemenata. Takođe, predložena je formula za izračunavanje podužne sile u kontinualno zavarenoj šini u sredini mostovske konstrukcije.

Sa aspekta tehničke regulative, preporuke UIC Code 774-3 [49] objašnjavaju interakciju kolosek/most i predlažu granične vrednosti koje treba zadovoljiti u pogledu dodatnih napona i pomeranja kod kontinualno zavarenih šina na mostu. Pored teorijskih objašnjenja interakcije kolosek/most, preporuke [49] takođe predstavljaju i smernice za sprovođenje numeričkih proračuna dodatnih napona i pomeranja. Takođe, preporuke UIC Code 776-2 [50] definišu smernice za projektovanje železničkih mostova sa aspekta interakcije vozilo/kolosek/most. Evropski komitet za standardizaciju CEN (European Committee for Standardization) objavio je standard EN 1991-2 [51] koji jednim svojim delom obuhvata uticaje merodavne za proračun železničkih mostova, kao i za proračun interakcije kolosek/most u skladu sa preporukama [49]. Institut za standardizaciju Srbije ISS (Institute for Standardization of Serbia) objavio je na srpskom jeziku standard SRPS EN 1991-2 [52], kao i nacionalni aneks SRPS EN 1991-2/NA [53].

U skladu sa prethodno navedenim istraživanjima drugih autora, kao i važećom tehničkom regulativom iz oblasti interakcije kolosek/most, može se zaključiti da je proračun dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu i dalje aktuelna tema i da zahteva neprestano unapređenje kako sa aspekta istraživanja, tako i sa aspekta tehničke regulative. Numeričke metode su se pokazale kao dosta pouzdaniji i precizniji način proračuna interakcije kolosek/most u poređenju sa analitičkim metodama. Sa druge strane, neophodne su detaljnije smernice za sprovođenje proračuna interakcije kolosek/most u cilju smanjenja dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu do kojih se može doći u sveobuhvatnoj parametarskoj analizi razmatrajući uticajne parametre konstrukcija koloseka i mosta.

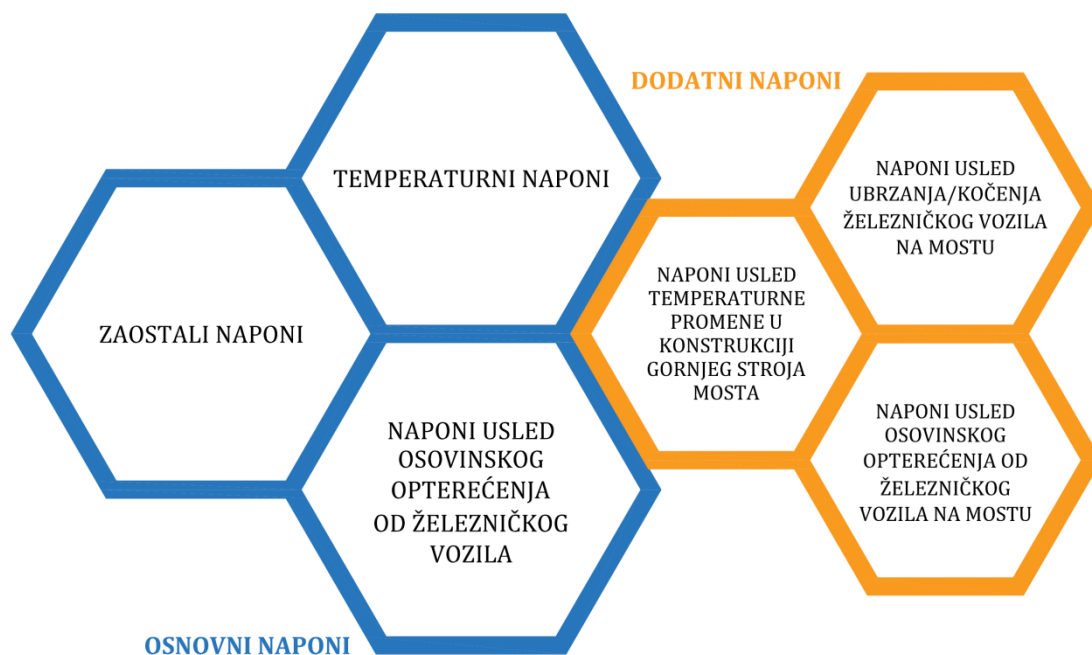
3 TEORIJSKA RAZMATRANJA NAPONA U KONTINUALNO ZAVARENIM ŠINAMA

U ovom poglavlju prikazana je struktura napona u kontinualno zavarenim šinama. Teorijski su razmatrani: zaostali naponi, temperaturni naponi, naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila, naponi usled temperature promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, naponi usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, kao i naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. Objasnjen je pojam neutralne temperature, kao i formiranje osnovnih temperaturnih napona pritiska i zatezanja u kontinualno zavarenim šinama. Prikazana je formulacija bočne stabilnosti koloseka i proces formiranja zazora pri pucanju šine. Takođe, predstavljena je matematička formulacija interakcije kolosek/most za uticaje od temperature, kao i za uticaje od železničkog vozila.

3.1 Opšta razmatranja

Naponi u kontinualno zavarenim šinama po svom poreklu mogu biti vrlo različiti. Još u procesu proizvodnje šina dolazi do formiranja zaostalih (rezidualnih) napona. Usled klimatskih uticaja, zagrevanja i hlađenja kontinualno zavarenih šina u odnosu na neutralnu temperaturu, tj. temperaturu završnog ugrađivanja i zavarivanja šina, nastaju temperaturni naponi. Pod saobraćajnim opterećenjem u toku eksploatacije koloseka, dolazi do savijanja šina u vertikalnoj ravni i formiranja napona usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila. Na mostovima, usled interakcije kolosek/most nastaju naponi u kontinualno zavarenim šinama koji su posledica temperature promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i uticaja od ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu.

Svi prethodno pomenuti naponi u kontinualno zavarenim šinama mogu se svrstati u dve grupe: osnovni i dodatni naponi. Na slici 3.1 prikazana je struktura napona u kontinualno zavarenim šinama, gde su plavom bojom uokvireni osnovni naponi, a narandžastom bojom dodatni naponi.



Slika 3.1 Šematski prikaz strukture napona u kontinualno zavarenim šinama

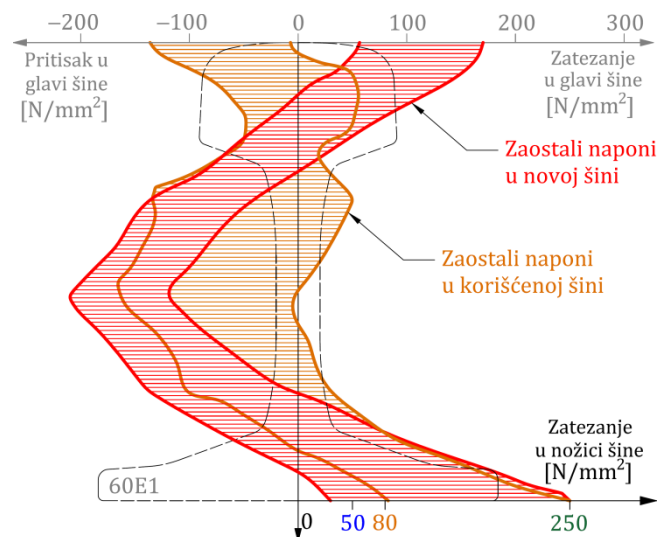
3.2 Osnovni naponi

Osnovni naponi u kontinualno zavarenim šinama predstavljaju grupu napona koji su prisutni stalno ili tokom dužeg vremenskog perioda eksploatacije koloseka. Njihove vrednosti su dominantne u odnosu na vrednosti dodatnih napona i promenljive su tokom vremena u zavisnosti od temperaturnih uticaja, kao i nivoa saobraćajnog opterećenja. U osnovne napone u kontinualno zavarenim šinama spadaju:

- zaostali naponi (σ_r),
- temperaturni naponi (σ_T),
- naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila (σ_Q).

3.2.1 Zaostali naponi

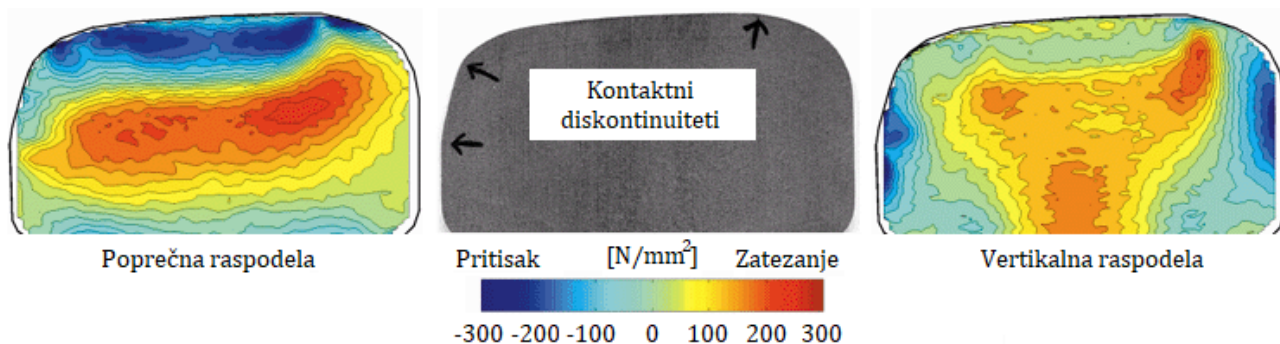
Zaostali naponi (σ_r) predstavljaju deo osnovnih napona u šinama koji postoje bez delovanja spoljašnjeg opterećenja. Nastaju u procesu proizvodnje šina, usled toplog valjanja i neravnomernog hlađenja šinskog čelika, kao i usled ravnjanja i nivelisanja profila šina. Kod Vignole-ovih železničkih šina [5], masa je koncentrisana u glavi šine, kao i u sredini nožice šine, tako da u tim zonama proces hlađenja traje duže nego u ostatku profila šine. Prema standardu [5] zaostali naponi u nožici šine mogu imati maksimalnu vrednost od 250 N/mm^2 , dok se u inženjerskoj praksi kao uobičajena vrednost zaostalih napona u nožici šine koristi vrednost od 80 N/mm^2 [54]. Proizvođači šina usled zahteva tržišta da proizvedu šinu što veće tvrdoće, uz zadržavanje njene duktilnosti, stvaraju širok spektar vrednosti zaostalih napona u šinama. U skladu sa tim, sa razvojem proizvodnih procesa teži se i smanjenju vrednosti zaostalih napona u šinama. Optimizacijom procesa toplog valjanja, hlađenja i ravnjanja profila šine zaostali naponi mogu se smanjiti ispod 50 N/mm^2 u nožici šine [6]. Na slici 3.2 prikazana je raspodela zaostalih napona u poprečnom preseku profila šine tipa 60E1, gde su crvenom bojom označeni zaostali naponi za novu, a oker bojom zaostali naponi za korišćenu šinu u skladu sa [55], [56].



Slika 3.2 Raspodela zaostalih napona u poprečnom preseku profila šine tipa 60E1 [55], [56]

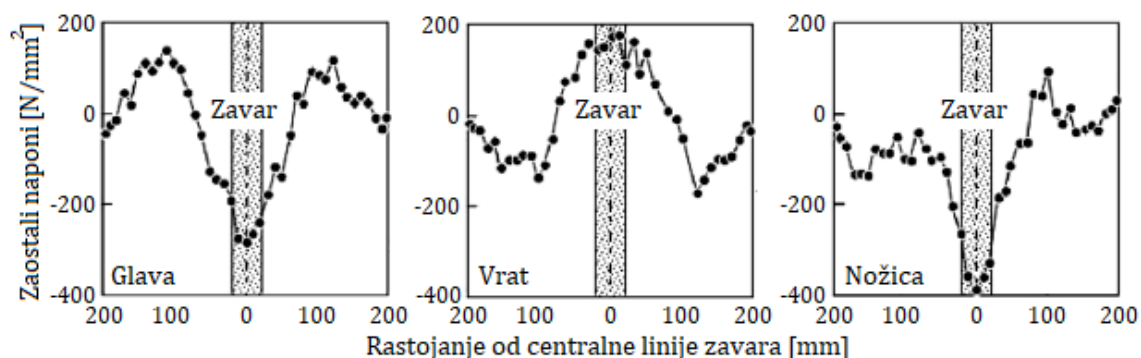
Prikazana raspodela zaostalih napona u poprečnom preseku profila šine nepovoljna je jer u uslovima eksploatacije naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila dodatno povećavaju vrednosti napona zatezanja u nožici šine. Sa druge strane, glava šine izložena je cikličnom naprezanju usled kotrljanja točkova železničkih vozila što može dovesti do plastične deformacije šinskog čelika usled zamora u zoni vozne površine i izmeniti polje zaostalih napona unutar glave šine [57]. Na slici 3.3 prikazana je raspodela zaostalih napona u glavi korišćene (istrošene) šine, gde se mogu uočiti propagacije zaostalih napona zatezanja iz

unutrašnjeg dela glave šine ka površini [58]. Ove propagacije su povezane sa položajem kontaktnih diskontinuiteta na površini glave šine u kontaktu točka železničkog vozila i šine, i upravo u tim zonama javljaju se šinski defekti usled zamora šinskog čelika [59], [60].



Slika 3.3 Poprečna i vertikalna raspodela zaostalih napona u glavi korišćene šine sa položajem kontaktnih diskontinuiteta [60]

Pored zaostalih napona koji nastaju u procesu proizvodnje, u šinama se javljaju i zaostali naponi koji nastaju u procesu zavarivanja. Njih karakterišu naponi pritiska u gornjem delu glave šine i u centru nožice šine, dok se u vratu šine javljaju naponi zatezanja [61]. Raspodela i vrednosti zaostalih napona koji nastaju u procesu zavarivanja šina zavise od primenjenog postupka zavarivanja (aluminotermijsko, elektrootporno, elektrolučno i autogeno), kao i od materijalnih karakteristika šinskog čelika i brzine hlađenja materijala [62], [63]. Na slici 3.4 prikazana je podužna raspodela zaostalih napona u glavi, vratu i nožici šine usled aluminotermijskog zavarivanja šina.

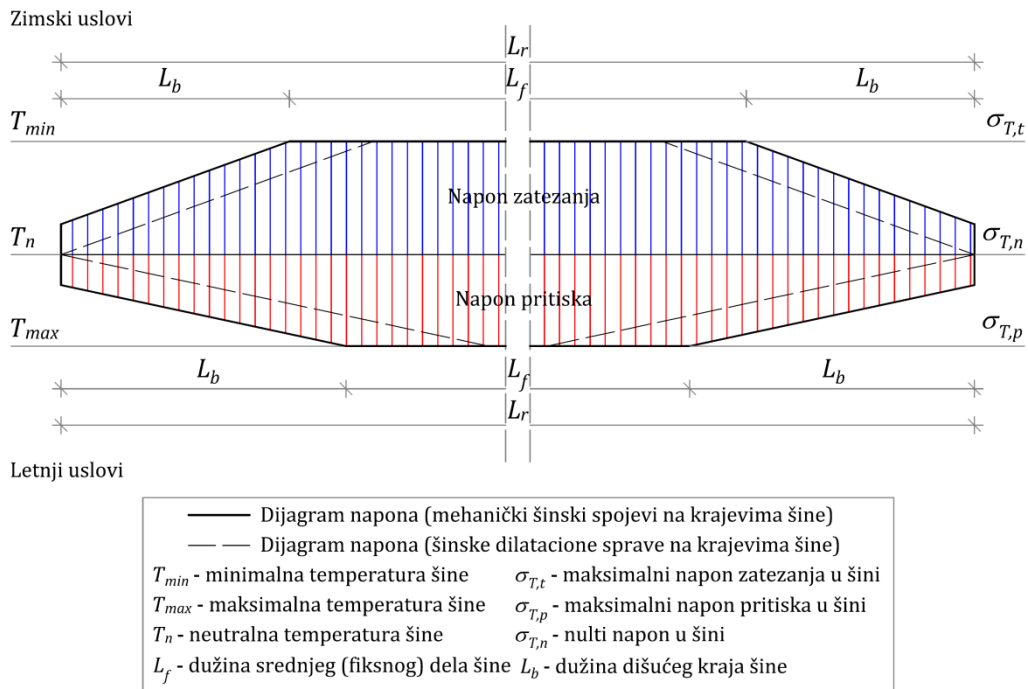


Slika 3.4 Podužna raspodela zaostalih napona usled aluminotermijskog postupka zavarivanja šina [61], [63]

Materijalne karakteristike šinskog čelika u procesu proizvodnje i zavarivanja šina su temperaturno zavisne i promenljive, dok stepen promene zavisi od klase šinskog čelika. Šinski čelik izložen visokim temperaturama podleže promenama u mikrostrukтури koje mogu imati važan uticaj na konačnu raspodelu zaostalih napona u šinama.

3.2.2 Temperaturni naponi

Temperaturni naponi (σ_T) predstavljaju deo osnovnih napona u kontinualno zavarenim šinama i nastaju usled sprečenog podužnog dilatiranja srednjeg (fiksno) dela šine na dužini L_f . Razlika između temperature šine (T_r) i neutralne temperature (T_n) dovodi do formiranja temperaturnih napona u šini. Na slici 3.5 crvenom bojom označeni su naponi pritiska, dok su plavom bojom označeni naponi zatezanja. U slučaju maksimalne pozitivne temperaturne promene ($T_{max} - T_n$) u letnjim uslovima nastaju maksimalni naponi pritiska ($\sigma_{T,p}$), dok u slučaju maksimalne negativne temperaturne promene ($T_{min} - T_n$) u zimskim uslovima nastaju maksimalni naponi zatezanja ($\sigma_{T,t}$). Sa druge strane, duž tzv. „dišućih” krajeva šine na dužini L_b temperaturni naponi opadaju zbog dopuštenih podužnih dilatairanja krajeva šine (slika 3.5).



Slika 3.5 Dijagram temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama

Na osnovu sledećih jednačina mogu se izračunati maksimalni temperaturni naponi pritiska i zatezanja u kontinualno zavarenim šinama:

$$\sigma_{T,p} = E \cdot \alpha \cdot (T_{max} - T_n) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{T,t} = E \cdot \alpha \cdot (T_{min} - T_n) \quad (3.2)$$

gde je:

E - Young-ov modul elastičnosti šinskog čelika,
 α - koeficijent termičkog širenja šinskog čelika.

3.2.2.1 Neutralna temperatura

U skladu sa Pravilnikom o tehničkim uslovima i održavanju gornjeg stroja železničkih pruga [64] srednja temperatura (T_{sr}) predstavlja srednju aritmetičku vrednost ekstremnih maksimalnih (T_{max}) i minimalnih (T_{min}) temperatura šine koje važe za određeno klimatsko područje i koje se određuju višegodišnjim praćenjem i merenjem. Sa druge strane, neutralna temperatura (T_n) predstavlja potrebnu temperaturu pri kojoj se vrši završno ugrađivanje i zavarivanje šina u koloseku. Razlika ekstremnih vrednosti izmerenih temperatura šine predstavlja temperaturnu amplitudu (A_T).

$$T_{sr} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3.3)$$

$$A_T = T_{max} - T_{min} \quad (3.4)$$

U zavisnosti od veličine temperaturne amplitude (A_T), neutralna temperatura (T_n) računa se preko jedne od sledećih jednačina [64]:

$$A_T > 100 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_n = T_{sr} + 8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$85 \text{ } ^\circ\text{C} < A_T < 100 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_n = T_{sr} + 5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

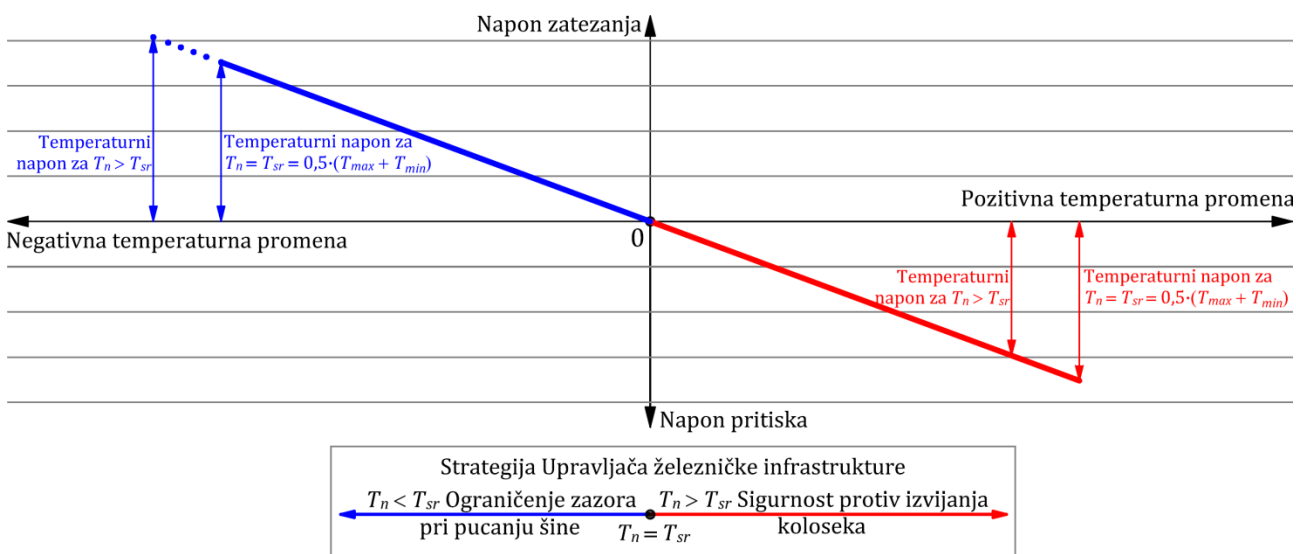
$$A_T < 85 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow T_n = T_{sr} \quad (3.7)$$

Pravilnik o tehničkim uslovima i održavanju gornjeg stroja železničkih pruga [64] daje sledeće odredbe kojih se treba pridržavati:

- zavarivanje šina izbegavati pri ekstremnim letnjim i zimskim temperaturama. Zavarivanje šina obavljati tokom proleća i jeseni pri umerenim temperaturama,
- merenje temperature šine obavljati korišćenjem šinskih termometara koji mogu biti cevasti i magnetni. U slučaju korišćenja cevastog šinskog termometra, tip mernog profila šine treba da odgovara tipu ugrađenog profila šine u koloseku i treba da bude izložen istim uslovima okoline. U slučaju korišćenja magnetnog termometra, potrebno je postaviti ga na vrat šine u koloseku i to na strani koja nije izložena direktnom sunčevom zračenju,
- ukoliko se ne raspolaže sa vrednostima temperatura šine za uže klimatsko područje na teritoriji Republike Srbije, za proračune koristiti sledeće vrednosti temperatura: $T_{min} = -30$ °C, $T_{max} = +65$ °C, $T_{sr} = +17,5$ °C i $T_n = +22,5$ °C.

Ukoliko se usvoji neutralna temperatura $T_n = +22,5$ °C maksimalni temperaturni naponi pritiska koji se mogu javiti u kontinualno zavarenim šinama u letnjim uslovima iznose približno $\sigma_{T,p} = -103$ N/mm², dok maksimalni temperaturni naponi zatezanja koji se mogu javiti u kontinualno zavarenim šinama u zimskim uslovima iznose približno $\sigma_{T,t} = +127$ N/mm².

Na slici 3.6 prikazan je uticaj neutralne temperature na vrednosti temperaturnih napona pritiska (crvena linija, slika 3.6) i zatezanja (plava linija, slika 3.6) u kontinualno zavarenim šinama. S obzirom da Upravljač železničke infrastrukture određuje vrednost neutralne temperature u skladu sa klimatskim područjem, samim tim direktno utiče i na bezbednost železničkog saobraćaja, kao i na troškove održavanja železničke infrastrukture. U slučaju kada je vrednost neutralne temperature jednaka vrednosti srednje temperature ($T_n = T_{sr}$), tada se pri ekstremnim temperaturama u zimskim i letnjim uslovima javljaju jednaki naponi zatezanja i pritiska. U slučaju kada je neutralna temperatura veća od srednje temperature ($T_n > T_{sr}$) tada je napon pritiska pri ekstremnim letnjim temperaturama manji od napona zatezanja pri ekstremnim zimskim temperaturama, što za posledicu ima veću sigurnost protiv izvijanja koloseka. Sa druge strane, u slučaju kada je neutralna temperatura manja od srednje temperature ($T_n < T_{sr}$) tada je napon zatezanja pri ekstremnim zimskim temperaturama manji od napona pritiska pri ekstremnim letnjim temperaturama, što za posledicu ima manju veličinu zazora pri pucanju šine (slika 3.6) [19], [65].



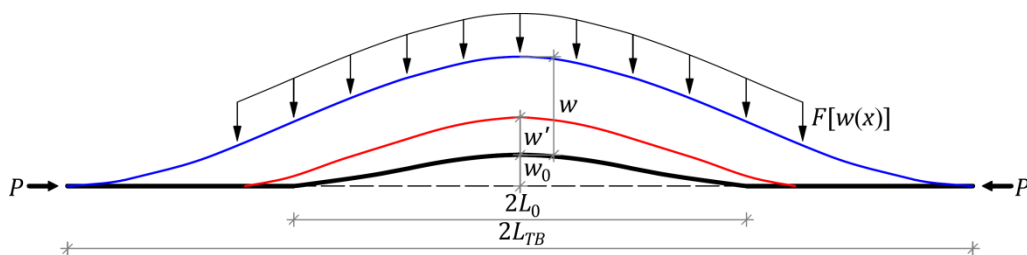
Slika 3.6 Uticaj neutralne temperature na vrednosti temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama

Takođe, treba uzeti u obzir i činjenicu da se neutralna temperatura menja tokom vremena i eksploatacije koloseka i da na njenu promenu utiče mnogo faktora. Usled osovinskog

opterećenja od železničkog vozila dolazi do deformisanja glave šine u zoni vozne površine, što izaziva promenu neutralne temperature [66]. U slučaju zamene dela šine, usled njenog oštećenja ili pucanja u zimskim uslovima, takođe dolazi do promene neutralne temperature [63]. Svako pomeranje koloseka izazvano ubrzanjem/kočenjem železničkog vozila [67], kao i ciklično smrzavanje/odmrzavanje zastorne prizme, utiču na promenu neutralne temperature [68]. U skladu sa prethodno navedenim, usvajanje inicijalne vrednosti neutralne temperature od strane Upravljača železničke infrastrukture, kao i procena njene promene tokom eksploatacije koloseka, predstavljaju veoma bitne ulazne parametre pri određivanju temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama.

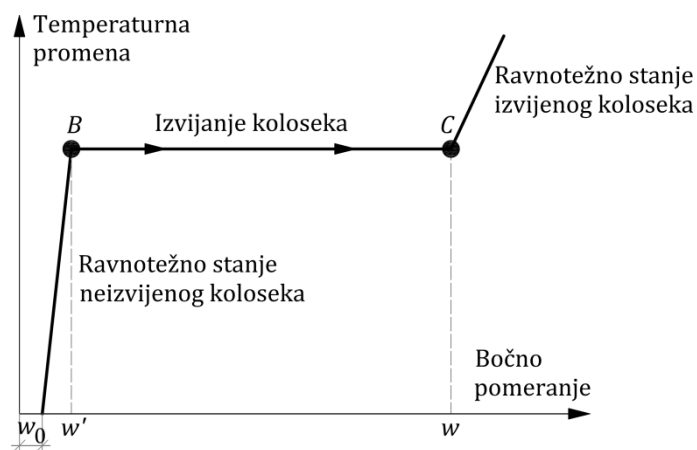
3.2.2.2 Izvijanje koloseka

U ekstremnim letnjim uslovima, usled prekoračenja nosivosti na pritisak, kao i otpora bočnom pomeranju koloseka $F[w(x)]$, može doći do narušavanja bočne stabilnosti koloseka i njegovog izvijanja u horizontalnoj ravni. Na slici 3.7 crnom linijom šematski je prikazan kolosek sa kontinualno zavarenim šinama sa malom početnom bočnom sinusoidnom imperfekcijom (w_0) talasne dužine $2L_0$. Dodatni porast temperature šine, kao i odgovarajuće sile pritiska (P) do maksimalne kritične vrednosti mogu povećati početnu bočnu imperfekciju za vrednost (w') i izazvati nestabilan ravnotežni položaj koloseka (crvena linija, slika 3.7). U ovom stanju, kolosek može iznenada da se izviji i zauzme novi bočni položaj (w) talasne dužine $2L_{TB}$ (plava linija, slika 3.7). Magnituda (w) je reda veličine 15-75 cm, dok talasna dužina izvijenog dela koloseka $2L_{TB}$ može biti u opsegu veličine 12-24 m u skladu sa [69].



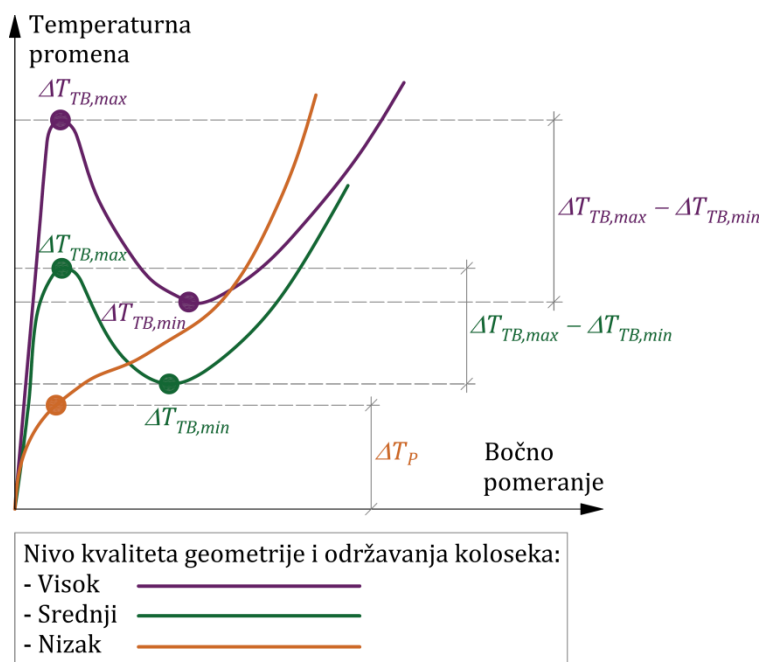
Slika 3.7 Šematski prikaz koloseka pre i nakon izvijanja [69], [70]

Na slici 3.8 grafički je prezentovana ravnotežna kriva koja kvantifikuje bočna pomeranja tokom izvijanja koloseka usled priraštaja temperaturne promene u odnosu na neutralnu temperaturu. Temperaturna promena do tačke B odgovara ravnotežnom stanju neizvijenog koloseka. Temperaturna promena u tački B se naziva temperaturna promena pri izvijanju koloseka, dok se pomeranje w' naziva pomeranje neposredno pre izvijanja koloseka. Sa druge strane, pomeranje w predstavlja pomeranje neposredno posle izvijanja koloseka, kada se kolosek nalazi u novom ravnotežnom stanju izvijenog koloseka [69].



Slika 3.8 Šematski prikaz procesa izvijanja koloseka [69]

Slika 3.9 komparativno ilustruje modele izvijanja koloseka u funkciji od specifičnih parametara geometrije i uslova održavanja koloseka. Kolosek sa visokim nivoom kvaliteta geometrije i održavanja (ljubičasta linija, slika 3.9) imaće veliku razliku između maksimalne ($\Delta T_{TB,max}$) i minimalne ($\Delta T_{TB,min}$) temperature izvijanja. U slučaju srednjeg nivoa kvaliteta geometrije i održavanja koloseka (zeleno linija, slika 3.9) smanjuju se $\Delta T_{TB,max}$ i $\Delta T_{TB,min}$ kao i njihova međusobna razlika ($\Delta T_{TB,max} - \Delta T_{TB,min}$). Konačno, za kolosek sa niskim nivoom kvaliteta geometrije i održavanja (narandžasta boja, slika 3.9) razlika između $\Delta T_{TB,max}$ i $\Delta T_{TB,min}$ može da bude jednaka nuli i odgovara vrednosti u tački ΔT_p . Takav kolosek će se postepeno izvijati sa porastom temperature šine (tj. bez naglog izvijanja) [69].



Slika 3.9 Načini izvijanja koloseka u funkciji od nivoa kvaliteta geometrije i održavanja koloseka [69]

Na bočnu stabilnost koloseka utiču sledeći parametri: neutralna i maksimalna temperatura šine, početna bočna imperfekcija koloseka, tip profila šine, tip sistema šinskog pričvršćenja (torzioni otpor sistema šinskog pričvršćenja), tip praga (koeficijent trenja između praga i zastora od tucanika), sopstvena težina koloseka (uključujući sopstvenu težinu šina, sistema šinskih pričvršćenja i pragova), oblik i zbijenost zastorne prizme, otpor podužnom pomeranju koloseka, otpor bočnom pomeranju koloseka, uslovi održavanja koloseka [69].

Izvijanje koloseka u pravcu u zoni izvijanja ($0 \leq x \leq L_{TB}$) definiše se preko sledeće diferencijalne jednačine u skladu sa [69], [70]:

$$E \cdot I_{zz,2} \cdot \frac{d^4 w}{dx^4} + (P - \tau_0) \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} = -F[w(x)] - P \cdot \frac{d^2 w_0}{dx^2} \quad (3.8)$$

gde je:

- $I_{zz,2}$ - moment inercije (Z-osa) preseka koji čine obe šine,
- P - podužna sila pritiska u koloseku,
- $F[w(x)]$ - funkcija raspodele otpora bočnom pomeranju koloseka,
- τ_0 - linearna torziona krutost sistema šinskog pričvršćenja,
- w_0 - početna bočna imperfekcija koloseka,
- w - bočna deformacija izvijenog koloseka.

Bočna deformacija, početna raspodela bočne imperfekcije, kao i funkcija raspodele otpora bočnom pomeranju koloseka mogu se prikazati u obliku trigonometrijskih redova [69], [70]:

$$w(x) = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} A_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot L_{TB}}\right) \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} b_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot L_{TB}}\right) \quad (3.10)$$

$$F[w(x)] = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} a_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot L_{TB}}\right) \quad (3.11)$$

gde je:

$$A_m = \frac{-(a_m + P \cdot b_m)}{E \cdot I_{zz,2} \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{2 \cdot L_{TB}}\right)^4 - (P - \tau_0) \cdot \left(\frac{m \cdot \pi}{2 \cdot L_{TB}}\right)^2} \quad (3.12)$$

$$a_m = \frac{2}{L_{TB}} \cdot \int_0^{L_{TB}} F[w(x)] \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot L_{TB}}\right) dx \quad (3.13)$$

$$b_m = \frac{2}{L_{TB}} \cdot \int_0^{L_{TB}} \frac{d^2 w_0}{dx^2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot L_{TB}}\right) dx \quad (3.14)$$

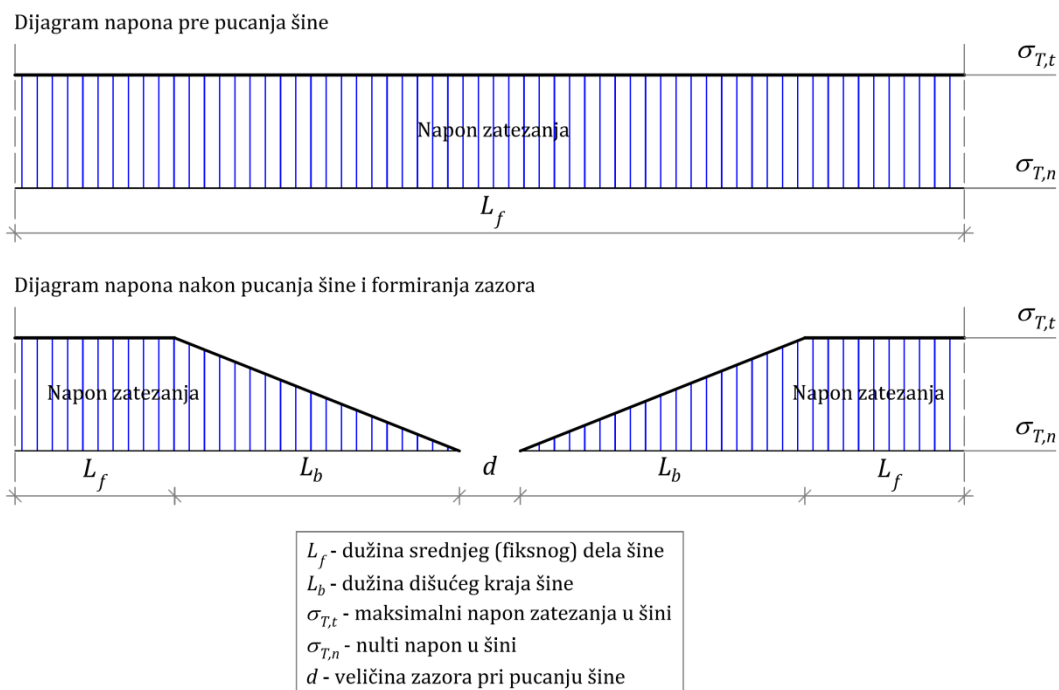
Prethodni izrazi zadovoljavaju zahteve nulte deformacije i momenta na krajevima zone izvijanja. Takođe, uslov nultog nagiba na krajevima zone izvijanja koloseka biće zadovoljen ispunjavanjem sledećeg uslova koji daje odnos između dužine izvijanja i sile pritiska [69], [70]:

$$\sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} m \cdot A_m \sin\left(\frac{m \cdot \pi}{2}\right) = 0 \quad (3.15)$$

Na koju će se stranu izviti kolosek u pravcu zavisi od položaja početne bočne imperfekcije, kao i strane sa manjim bočnim otporom podužnom pomeranju koloseka. Sa druge strane, kolosek u krivini izvija se uvek ka spoljašnjoj strani krivine zbog postojanja početne zakrivljenosti. Takođe, kolosek u krivini ima tendenciju progresivnog izvijanja i to posebno kod malih poluprečnika krivina sa oslabljenim bočnim otporom podužnom pomeranju koloseka [69].

3.2.2.3 Formiranje zazora pri pucanju šine

U ekstremnim zimskim uslovima, usled prekoračenja nosivosti šine na zatezanje može doći do pucanja šine. U takvim situacijama oslobađaju se velike aksijalne sile iz šine i formira se zazor određene veličine. Pri dimenzionisanju elemenata gornjeg stroja železničke pruge treba voditi računa o veličini zazora pri pucanju šine, kako se ne bi ugrozila bezbednost železničkog saobraćaja [64]. Na slici 3.10 prikazani su dijagrami napona zatezanja pre i posle pucanja šine u koloseku. Do pucanja šine najčešće dolazi na mestima sa maksimalnim naponom zatezanja, a to je u srednjoj (fiksnoj) zoni koloseka sa kontinualno zavarenim šinama. Na mestu pucanja šine dolazi do formiranja tzv. „dišućih” krajeva i napon je jednak nuli. U zavisnosti od veličine zazora, treba preduzeti odgovarajuće mere radi osiguranja bezbednosti železničkog saobraćaja, pre nego što se oštećenje šine sanira i kolosek vrati u prvobitno stanje.



Slika 3.10 Preraspodela napona zatezanja usled pucanja šine i formiranja zazora

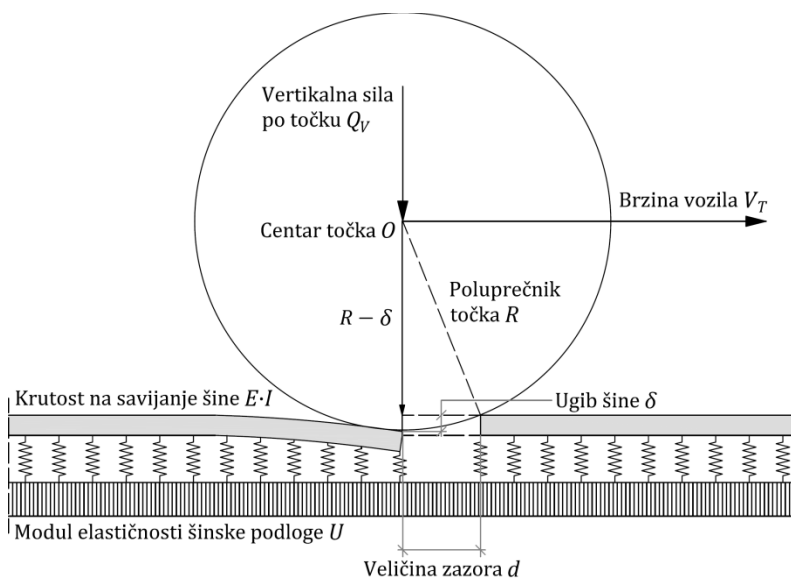
Veličina zazora pri pucanju šine (d) u zimskim uslovima (kada je kolosek neopterećen) određuje se na osnovu sledećeg izraza [71]:

$$d = \frac{E \cdot A \cdot \alpha^2 \cdot \Delta T_w^2}{q_w} \quad (3.16)$$

gde je:

- A - površina poprečnog preseka profila šine,
- ΔT_w - maksimalna negativna temperaturna promena u zimskim uslovima,
- q_w - merodavan otpor podužnom pomeranju koloseka/šine u zimskim uslovima.

Na slici 3.11 prikazan je proračunski model za određivanje veličine zazora pri pucanju šine (d) u zimskim uslovima (kada je kolosek opterećen) u funkciji od poluprečnika točka i ugiba šine pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila.



Slika 3.11 Proračunski model za određivanje veličina zazora pri pucanju šine [19], [72]

Veličina zazora pri pucanju šine (d) u funkciji od poluprečnika točka i ugiba šine pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila određuje se na osnovu sledećih izraza [72]:

$$d = \sqrt{R^2 - (R - \delta)^2} \quad (3.17)$$

$$\delta = \frac{Q_V}{2 \cdot E \cdot I_{yy} \cdot k_V^3} \cdot e^{-k_V \cdot x} \cdot k_V \cdot x \quad (3.18)$$

$$k_V = \sqrt[4]{\frac{U}{4 \cdot E \cdot I_{yy}}} \quad (3.19)$$

gde je:

- R - poluprečnik točka železničkog vozila,
- δ - ugib kraja šine ispod točka železničkog vozila,
- Q_V - vertikalna sila po točku železničkog vozila,
- I_{yy} - moment inercije (Y-osa) preseka profila šine,
- k_V - koeficijent relativne krutosti šinske podloge u odnosu na šinu u vertikalnom pravcu,
- U - modul elastičnosti šinske podloge.

Granična dozvoljena proračunska vrednost zazora pri pucanju šine u ekstremnim zimskim uslovima iznosi 100 mm u skladu sa [64]. U slučaju veličine zazora pri pucanju šine do 50 mm, preduzima se mera montaže privremenih vezica i privremeno se smanjuje brzina vožnje, dok se u slučaju veličine zazora od preko 50 mm preduzima mera zatvaranja pruge, isecanja dela šine i obostranog zavarivanja nove šine na licu mesta.

U tabeli 3.1 prikazane su granične dozvoljene proračunske vrednosti zazora pri pucanju šine u skladu sa međunarodnom regulativom.

Tabela 3.1 Granične dozvoljene vrednosti veličine zazora pri pucanju šine [72]

Prema američkim standardima [73]		Prema japanskim standardima [74]	
Poluprečnik točka (R)	Veličina zazora (d)	Uslovi	Veličina zazora (d)
$\leq 0,4$ m	50 mm	Tip profila šine: 60E1 Sila pri izvijanju šine: 1000 kN/šini	69 mm
$> 0,4$ m	100 mm		

3.2.3 Naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila

Naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila (σ_Q) predstavljaju deo osnovnih napona u kontinualno zavarenim šinama. Nastaju usled savijanja šine pod železničkim vozilom i sastoje se od vertikalne i bočne komponente opterećenja (slika 3.12). Momenti savijanja šine (M_y i M_z) određuju se na osnovu sledećih jednačina u skladu sa teorijom koju je razvio Zimmermann [75]:

$$M_y(x) = \frac{Q_V}{4 \cdot k_V} \cdot (\cos k_V \cdot x - \sin k_V \cdot x) \cdot e^{-k_V \cdot x} \quad (3.20)$$

$$M_z(x) = \frac{Q_L}{4 \cdot k_L} \cdot (\cos k_L \cdot x - \sin k_L \cdot x) \cdot e^{-k_L \cdot x} \quad (3.21)$$

gde je:

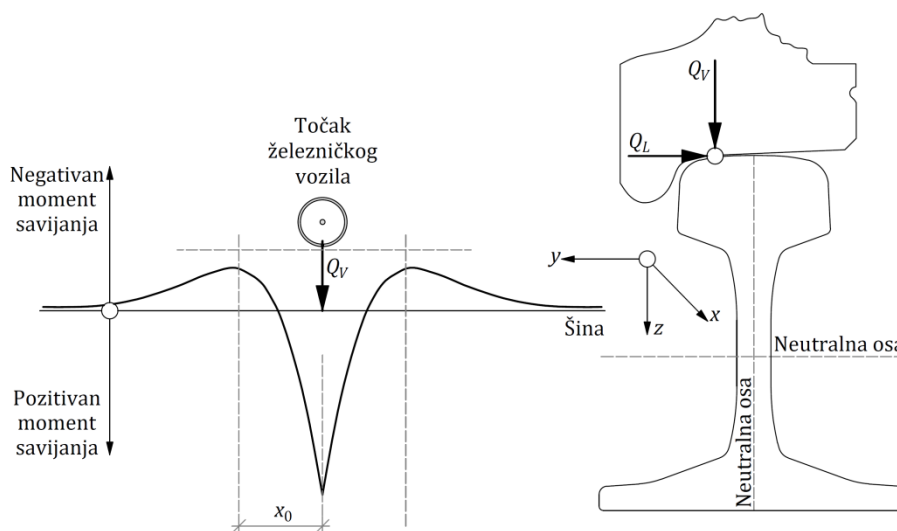
- Q_L - bočna sila po točku železničkog vozila,
- k_L - koeficijent relativne krutosti šinske podloge u odnosu na šinu u bočnom pravcu.

Vrednost koeficijenta relativne krutosti šinske podloge u odnosu na šinu u bočnom pravcu (k_L) može se odrediti u skladu sa sledećim izrazom [75], [76]:

$$k_L = \sqrt[4]{\frac{0,85 \cdot U}{4 \cdot E \cdot I_{zz}}} \quad (3.22)$$

gde je:

I_{zz} - moment inercije (Z-osa) preseka profila šine.



Slika 3.12 Momenti savijanja šine usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila (levo), vertikalno i bočno opterećenje od točka železničkog vozila (desno) [63], [75], [76]

Na slici 3.12 vidi se da se maksimalni pozitivni moment savijanja šine javljaju ispod točka železničkog vozila, dok se maksimalni negativni momenti savijanja šine javljaju neposredno ispred i iza točka vozila na rastojanju x_0 koje se određuje na osnovu sledećeg izraza [63], [75], [76]:

$$x_0 = \frac{\pi}{2 \cdot k_V} \quad (3.23)$$

Poznavanjem momenta savijanja šine (M_y i M_z), naponi usled savijanja šine pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila ($\sigma_{Q,y}$ i $\sigma_{Q,z}$) mogu se odrediti na osnovu sledećih izraza [75]:

$$\sigma_{Q,y} = \frac{M_y(x)}{W_{yy}} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{Q,z} = \frac{M_z(x)}{W_{zz}} \quad (3.25)$$

gde je:

W_{yy} - otporni moment (Y-osa) preseka profila šine,

W_{zz} - otporni moment (Z-osa) preseka profila šine.

Maksimalna proračunska vrednost napona zatezanja usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila iznosi $\sigma_Q = 158 \text{ N/mm}^2$ i određena je na osnovu sledećih tehničkih karakteristika gornjeg stroja železničke pruge [6], [56]:

- profil šine tipa 60E1,
- betonski pragovi tipa B70 na međusobnom rastojanju do 65 cm,

- elastični sistemi šinskih pričvršćenja,
- dobro stanje kolosečne podloge (koeficijent kolosečne podloge $C = 0,1 \text{ N/mm}^3$).

Proračun je izvršen za lake putničke vozove, kao i za teške teretne vozove, koristeći referentnu kombinaciju, što podrazumeva brzine vozova do 200 km/h [6], [56].

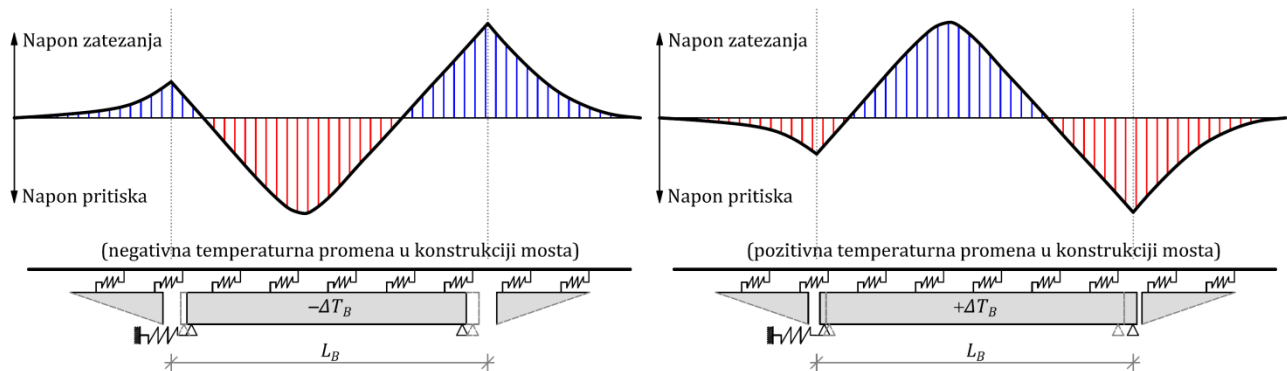
3.3 Dodatni naponi

Dodatni naponi u kontinualno zavarenim šinama predstavljaju grupu napona koji se javljaju na mestima mostovskih konstrukcija na trasi železničke pruge i nastaju usled interakcije kolosek/most. Iako su vrednosti ovih napona znatno manje u odnosu na vrednosti osnovnih napona, oni su kritični sa aspekta prekoračenja graničnih vrednosti dodatnih napona u šinama na mostu i mogu ugroziti bezbednost železničkog saobraćaja. U dodatne napone u kontinualno zavarenim šinama spadaju:

- naponi usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (σ_{BT}),
- naponi usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (σ_{AB}),
- naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (σ_{VB}).

3.3.1 Naponi usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta u odnosu na referentnu temperaturu mosta pri kojoj je izvršeno završno ugrađivanje i zavarivanje šina izaziva dodatne temperaturne napone u šinama. U slučaju negativne temperaturne promene ($-\Delta T_B$) u zimskim uslovima, slika 3.13 (levo), dolazi do skraćenja konstrukcije gornjeg stroja mosta i do pojave dodatnih napona zatezanja u šinama iznad pokretnog oslonca mosta. Sa druge strane, u slučaju pozitivne temperaturne promene ($+\Delta T_B$) u letnjim uslovima, slika 3.13 (desno), dolazi do izduženja konstrukcije gornjeg stroja mosta i do pojave dodatnih napona pritiska u šinama iznad pokretnog oslonca mosta.



Slika 3.13 Dijagrami dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

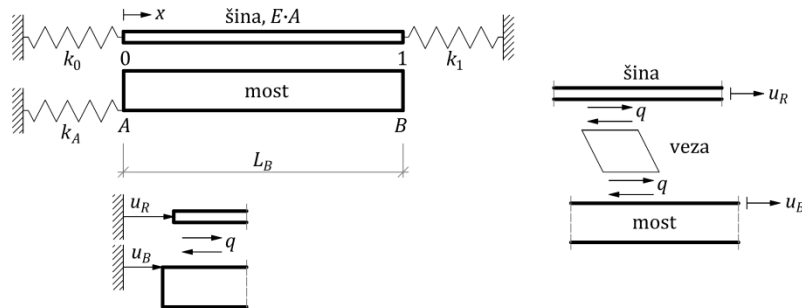
U skladu sa nelinearnom formulacijom interakcije kolosek/most koju su razvili Ruge i Birk [34], na slici 3.14 (levo) prikazan je model koji se sastoji od šine podužne krutosti $E \cdot A$ i mosta dužine L_B . Konstrukcija mosta na mestu levog oporca (tačka A) ima oprugu podužne krutosti k_A , koja ograničava podužno pomeranje mosta. Sa druge strane, konstrukcija mosta na mestu desnog oporca (tačka B) ima podužno pokretan oslonac koji joj omogućava nesmetano podužno pomeranje. Dve opruge podužne krutosti $k_0 = k_1 = \sqrt{E \cdot A \cdot c_u}$ predstavljaju deo šine koji se nalazi na zemljanom trupu pruge. Veza između šine i mosta ostvaruje se preko merodavne elastične veze čija podužna krutost zavisi od toga da li je kolosek neopterećen (c_u) ili opterećen (c_l) i da li proklizava po zastoru od tucanika ili po sistemu šinskog pričvršćenja. Na slici 3.14 (desno) prikazan je element veze šine i mosta sa razlikom pomeranja u_D [34]:

$$u_D = u_R - u_B \text{ za } |u_R - u_B| < \tilde{u} \quad (3.26)$$

$$u_D = \text{sign}(u_R - u_B) \cdot \tilde{u} \text{ za } |u_R - u_B| \geq \tilde{u} \quad (3.27)$$

gde je:

u_R - podužno pomeranje šine,
 u_B - podužno pomeranje gornje ivice mosta.



Slika 3.14 Model interakcije kolosek/mosta (levo) i element veze (desno) [34]

Bitna karakteristika sistema šine i mosta je ograničenje deformacije elementa veze na kritičnu vrednost \tilde{u} . Ispod ove vrednosti važi linearna zavisnost između razlike pomeranja u_D i otpora podužnom pomeranju q , koja je definisana narednim izrazom [34]:

$$q = -c_u \cdot u_D \quad (3.28)$$

Za relativna granična pomeranja veća od \tilde{u} šina proklizava i važi nelinearna zavisnost između razlike pomeranja u_D i otpora podužnom pomeranju q . U ovom slučaju otpor podužnom pomeranju q je konstantan i određuje se u skladu sa sledećim izrazom [34]:

$$q = -c_u \cdot \text{sign}(u_R - u_B) \cdot \tilde{u} \text{ za } |u_R - u_B| \geq \tilde{u} \quad (3.29)$$

Prethodna jednačina odnosi se na nedeformisan sistem šine i mosta. U slučaju kada se u obzir uzima istorija prethodnih opterećenja i deformacija, otpor podužnom pomeranju q određuje se u skladu sa sledećim izrazima [34]:

$$q = (u_D - \tilde{u}) \cdot c_u \text{ za } z_R - z_B \geq 0 \quad (3.30)$$

$$q = (u_D + \tilde{u}) \cdot c_u \text{ za } z_R - z_B < 0 \quad (3.31)$$

gde je:

z_R - dodatno podužno pomeranje šine,
 z_B - dodatno podužno pomeranje gornje ivice mosta.

Dodatno podužno pomeranje gornje ivice mosta (z_B) usled temperaturne promene određuje se na osnovu sledećeg izraza [34]:

$$z_B = z_A + \alpha \cdot \Delta T_B \cdot x \quad (3.32)$$

gde je:

z_A - dodatno podužno pomeranje oslonca mosta u tački A,
 α - koeficijent termičkog širenja mosta,
 ΔT_B - temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta.

S obzirom da se duž šine na mostu u zavisnosti od stepena naprezanja javljaju naizmenične zone sa elastičnim i plastičnim ponašanjem elementa veze, u razmatranje treba uzeti oba stanja [34].

U skladu sa prethodno navedenim, dodatno podužno pomeranje mosta usled temperaturne promene izaziva dodatna podužna pomeranja šine, koja su u slučaju elastičnog ponašanja elementa veze definisana sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' - c_u \cdot (z_R - z_B) = 0 \quad (3.33)$$

Rešavanjem prethodne jednačine na izolovanom elementu šine dužine l_j u lokalnom koordinatnom sistemu x_j (slika 3.15) dobijaju se izrazi za podužne sile (P_j i P_{j+1}) u čvorovima j i $j+1$ elementa [34]:

$$P_j = \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \left[-\coth \gamma_u \cdot l_j \quad \frac{1}{\sinh \gamma_u \cdot l_j} \quad \tanh \frac{\gamma_u \cdot l_j}{2} \right] \cdot \mathbf{z}_j + \alpha \cdot \Delta T_B \cdot l_j \cdot \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \left(\frac{1}{\gamma_u \cdot l_j} - \frac{1}{\sinh \gamma_u \cdot l_j} \right) + \alpha \cdot \Delta T_B \cdot a_j \cdot \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \tanh \frac{\gamma_u \cdot l_j}{2} \quad (3.34)$$

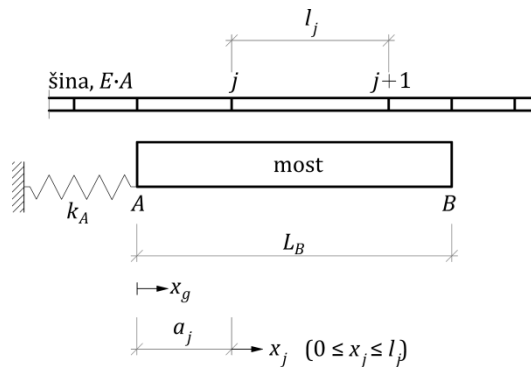
$$P_{j+1} = \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \left[\frac{-1}{\sinh \gamma_u \cdot l_j} \quad \coth \gamma_u \cdot l_j \quad -\tanh \frac{\gamma_u \cdot l_j}{2} \right] \cdot \mathbf{z}_j + \alpha \cdot \Delta T_B \cdot l_j \cdot \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \left(-\frac{1}{\gamma_u \cdot l_j} + \coth \gamma_u \cdot l_j \right) + \alpha \cdot \Delta T_B \cdot a_j \cdot \sqrt{c_u \cdot E \cdot A} \cdot \tanh \frac{\gamma_u \cdot l_j}{2} \quad (3.35)$$

gde je:

$$\gamma_u = \sqrt{\frac{c_u}{E \cdot A}} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{z}_j = \begin{bmatrix} z_j \\ z_{j+1} \\ z_A \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

a_j - rastojanje između početaka lokalnog i globalnog koordinatnog sistema,
 z_j - dodatno podužno pomeranje čvora j ,
 z_{j+1} - dodatno podužno pomeranje čvora $j+1$.



Slika 3.15 Izolovani element šine dužine l_j u lokalnom koordinatnom sistemu [34]

Sa druge strane, u slučaju plastičnog ponašanja elementa veze, dodatna podužna pomeranja šine definisana su sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' = -q(x) \quad (3.38)$$

U zonama gde je prethodni slučaj opterećenja tekao elastično, a trenutni plastično, otpor podužnom pomeranju q prati nepoznatu krivu [34]:

$$-2 \cdot \tilde{u} \cdot c_u \leq q(x) \leq 2 \cdot \tilde{u} \cdot c_u \text{ za } |u_D| \leq \tilde{u} \quad (3.39)$$

Iz tog razloga se vrši linearna interpolacija između vrednosti otpora podužnom pomeranju q_j i q_{j+1} u čvorovima elementa u skladu sa [34]:

$$q(x_j) = \frac{q_{j+1} - q_j}{l_j} \cdot x_j + q_j \quad (3.40)$$

U prethodnom slučaju opterećenja u zonama gde je šina proklizavala u odnosu na element veze u trenutnom slučaju opterećenja otpor podužnom pomeranju q je konstantan [34]:

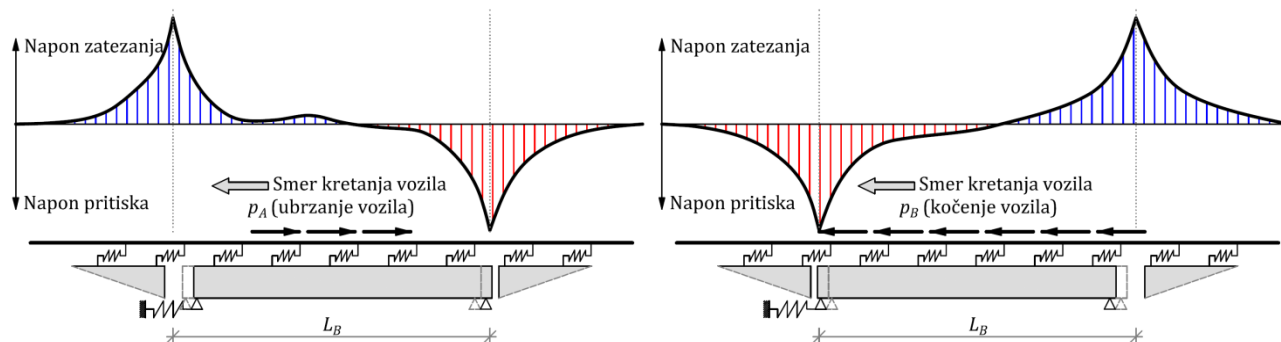
$$q = \begin{cases} -2 \cdot \tilde{u} \cdot c_u \\ 0 \\ +2 \cdot \tilde{u} \cdot c_u \end{cases} \quad (3.41)$$

Rešavanjem prethodne jednačine za dodatna podužna pomeranja šine na izolovanom elementu šine dužine l_j u lokalnom koordinatnom sistemu x_j (slika 3.15) dobijaju se izrazi za podužne sile (P_j i P_{j+1}) u čvorovima j i $j+1$ elementa [34]:

$$\begin{bmatrix} P_j \\ -P_{j+1} \end{bmatrix} = -\frac{E \cdot A}{l_j} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_j \\ z_{j+1} \end{bmatrix} + \frac{q_j \cdot l_j}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{q_{j+1} \cdot l_j}{6} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

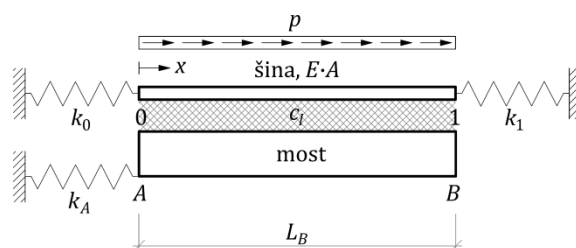
3.3.2 Naponi usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu

Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu izaziva relativna podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta, što dovodi do stvaranja dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama. Ukoliko je smer kretanja železničkog vozila od pokretnog ka nepokretnom ležištu mosta, tada sile ubrzanja (p_A) izazivaju dodatne napone pritiska, dok sile kočenja (p_B) izazivaju dodatne napone zatezanja u šinama iznad pokretnog oslonca mosta (slika 3.16).



Slika 3.16 Dijagrami dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu

Na slici 3.17 prikazan je model interakcije kolosek/most za konstantnu silu ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (p). [34].



Slika 3.17 Model interakcije kolosek/most za opterećenje od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu [34]

Dodatno podužno pomeranje mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu izaziva dodatna podužna pomeranja šine, koja su u slučaju elastičnog ponašanja elementa veze definisana sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' - c_l \cdot (z_R - z_B) = -p \quad (3.43)$$

Rešavanjem prethodne jednačine dobijaju se izrazi za podužne sile u šini (P_0 i P_1) u čvorovima 0 i 1 na krajevima mosta [34]:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ -P_1 \end{bmatrix} = -\sqrt{c_l \cdot E \cdot A} \cdot \begin{bmatrix} \coth \gamma_l \cdot L_B & -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot L_B} & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot L_B}{2} \\ -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot L_B} & \coth \gamma_l \cdot L_B & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot L_B}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_A \end{bmatrix} + \sqrt{c_l \cdot E \cdot A} \cdot \frac{p}{c_l} \cdot \begin{bmatrix} \tanh \frac{\gamma_l \cdot L_B}{2} \\ \tanh \frac{\gamma_l \cdot L_B}{2} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

gde je:

$$\gamma_l = \sqrt{\frac{c_l}{E \cdot A}} \quad (3.45)$$

z_0 - dodatno podužno pomeranje čvora 0,

z_1 - dodatno podužno pomeranje čvora 1.

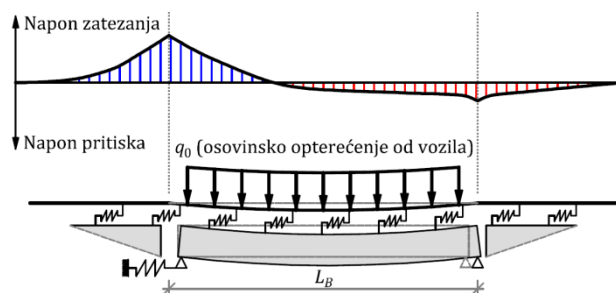
U slučaju plastičnog ponašanja elementa veze, dodatna podužna pomeranja šine usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu definisana su sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' = -q(x) - p \quad (3.46)$$

U ovoj situaciji koriste se iste jednačine za određivanje dodatnih sila u šini kao kod temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (sa izvršenom linearnom interpolacijom između vrednosti otpora podužnom pomeranju u čvorovima elementa), samo što se umesto vrednosti parametra c_u za neopterećen kolosek uzima vrednost parametra c_l za opterećen kolosek. Takođe, pored otpora podužnom pomeranju $q(x)$ na šinu deluje i konstantna sila ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (p) [34].

3.3.3 Naponi usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu

Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu izaziva savijanje konstrukcije gornjeg stroja mosta u vertikalnoj ravni što dovodi do obrtanja krajeva mosta i do formiranja dodatnih napona u šinama (slika 3.18).



Slika 3.18 Dijagram dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu

Na slici 3.19 prikazane su veličine koje definišu obrtanje kraja mosta. Dodatno podužno pomeranje gornje ivice mosta (z_B) definiše se preko sledećeg izraza [34]:

$$z_B(x) = z_N + \omega'(x) \cdot h_o \quad (3.47)$$

gde je:

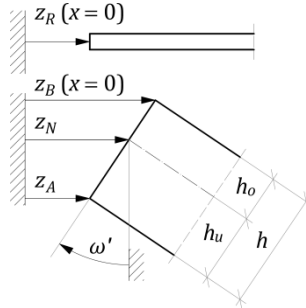
z_N - dodatno podužno pomeranje neutralne ose mosta,

ω' - ugao obrtanja kraja mosta,

h_o - rastojanje od neutralne ose do gornje ivice mosta,

h_u - rastojanje od neutralne ose do donje ivice mosta,

h - visina konstrukcije gornjeg stroja mosta.



Slika 3.19 Obrtanje kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta [34]

Na vrednost napona u ovom slučaju utiče relativni položaj neutralne ose mosta (η), kao i relativni maksimalni ugib mosta u sredini raspona (δ_B) [34]:

$$\eta = \frac{h_o}{h_u} \quad (3.48)$$

$$\delta_B = \frac{w_B\left(x = \frac{L_B}{2}\right)}{L_B} \quad (3.49)$$

Deformacija neutralne ose mosta ($w_B(x)$), relativni maksimalni ugib mosta u sredini raspona (δ_B), kao i nagib neutralne ose mosta ($w'_B(x)$), za most statičkog sistema proste grede krutosti na savijanje $E \cdot I$ pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila (q_0) i sa faktorom dinamičkog uvećanja osovinskog opterećenja (ϕ) opisani su sledećim izrazima [34]:

$$w_B(x) = \frac{q_0 \cdot L_B^4 \cdot \phi}{24 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{x}{L_B} - 2 \cdot \left(\frac{x}{L_B} \right)^3 + \left(\frac{x}{L_B} \right)^4 \right) \quad (3.50)$$

$$\delta_B = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_0 \cdot L_B^3 \cdot \phi}{E \cdot I} \quad (3.51)$$

$$w'_B(x) = \frac{16}{5} \cdot \delta_B \cdot \left(1 - 6 \cdot \left(\frac{x}{L_B} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{x}{L_B} \right)^3 \right) \quad (3.52)$$

Dodatno podužno pomeranje šine usled obrtanja kraja mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila u slučaju elastičnog ponašanja elementa veze definisano je sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' - c_l \cdot (z_R - z_B) = 0 \quad (3.53)$$

Rešavanjem prethodne jednačine na izolovanom elementu šine dužine l_j u lokalnom koordinatnom sistemu x_j dobijaju se izrazi za podužne sile (P_j i P_{j+1}) u čvorovima j i $j+1$ elementa [34]:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} P_j \\ -P_{j+1} \end{bmatrix} &= -\sqrt{c_l \cdot E \cdot A} \cdot \begin{bmatrix} \coth \gamma_l \cdot l_j & -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot l_j} & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot l_j}{2} \\ -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot l_j} & \coth \gamma_l \cdot l_j & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot l_j}{2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{z}_j \\
&+ \sqrt{c_l \cdot E \cdot A} \cdot \begin{bmatrix} \coth \gamma_l \cdot l_j & -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot l_j} & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot l_j}{2} \\ -\frac{1}{\sinh \gamma_l \cdot l_j} & \coth \gamma_l \cdot l_j & -\tanh \frac{\gamma_l \cdot l_j}{2} \end{bmatrix} \cdot \tilde{\mathbf{h}} \\
&+ \frac{16}{5} \cdot E \cdot A \cdot h_o \cdot \delta_B \cdot \begin{bmatrix} \frac{24}{\gamma_l^2 \cdot L_B^3} - \frac{12}{L_B^2} \cdot a_j + \frac{12}{L_B^3} \cdot a_j^2 \\ -\frac{24}{\gamma_l^2 \cdot L_B^3} + \frac{12}{L_B} \cdot \left(\frac{a_j + l_j}{L_B} \right) - \frac{12}{L_B} \cdot \left(\frac{a_j + l_j}{L_B} \right)^2 \end{bmatrix} \quad (3.54)
\end{aligned}$$

gde je:

$$\mathbf{z}_j = \begin{bmatrix} z_j \\ z_{j+1} \\ z_N \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\tilde{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_j \\ \tilde{h}_{j+1} \\ -\tilde{h}_o \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$\tilde{h}_j = \frac{16}{5} \cdot h_o \cdot \delta_B \cdot \left(\frac{24}{\gamma_l^2 \cdot L_B^2} \cdot \left(\frac{a_j}{L_B} \right) - 6 \cdot \left(\frac{a_j}{L_B} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{a_j}{L_B} \right)^3 \right) \quad (3.57)$$

$$\tilde{h}_{j+1} = \frac{16}{5} \cdot h_o \cdot \delta_B \cdot \left(\frac{24}{\gamma_l^2 \cdot L_B^2} \cdot \left(\frac{a_j + l_j}{L_B} \right) - 6 \cdot \left(\frac{a_j + l_j}{L_B} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{a_j + l_j}{L_B} \right)^3 \right) \quad (3.58)$$

$$\tilde{h}_o = \frac{16}{5} \cdot h_o \cdot \delta_B \cdot \left(1 - \frac{12}{\gamma_l^2 \cdot L_B^2} \right) \quad (3.59)$$

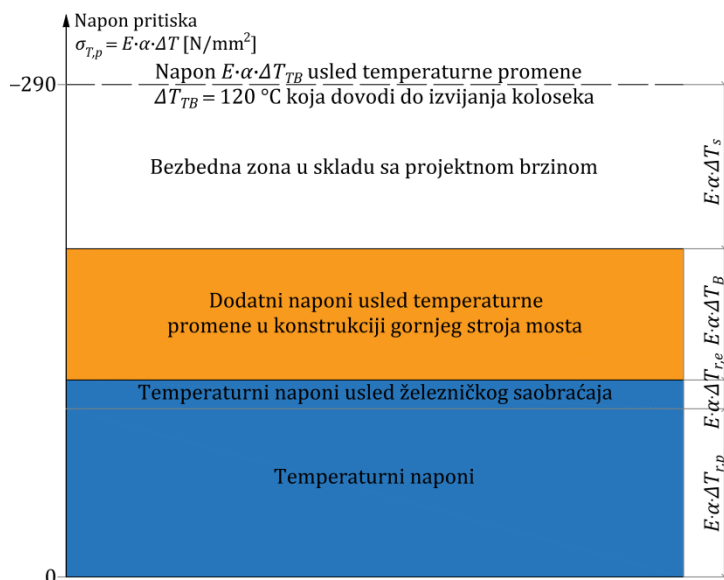
U slučaju plastičnog ponašanja elementa veze, dodatna podužna pomeranja šine usled obrtanja kraja mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila definisana su sledećom jednačinom [34]:

$$E \cdot A \cdot z_R'' = -q(x) \quad (3.60)$$

U ovoj situaciji takođe se koriste iste jednačine za određivanje dodatnih sila u šini kao kod temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta i kod ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (sa izvršenom linearnom interpolacijom između vrednosti otpora podužnom pomeranju u čvorovima elementa) [34].

3.4 Dozvoljene vrednosti napona

Pri vrednosti napona pritiska od -290 N/mm^2 dolazi do izvijanja koloseka u horizontalnoj ravni (slika 3.20). Kritična temperaturna promena koja dovodi do izvijanja koloseka iznosi približno $120 \text{ }^\circ\text{C}$ [77], [78], [79], [80], [81]. Ova temperaturna promena odgovara sledećim tehničkim karakteristikama konstrukcije gornjeg stroja železničke pruge: profil šine tipa 60E1, betonski pragovi tipa B70, razmak između pragova do 65 cm , odstupanje smera koloseka do $4,5 \text{ mm}$ kod pruga za velike brzine, kao i dinamički otpor bočnom pomeranju koloseka od 10 kN/m [80], [81], [56].



Slika 3.20 Naponi pritiska u kontinualno zavarenim šinama koji dovode do izvijanja koloseka [56]

Izvijanje koloseka je merodavan kriterijum i za definisanje dozvoljene vrednosti dodatnih napona pritiska u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Rezerva merodavne temperature promene ($\Delta T_{A,p}$) koja odgovara dozvoljenoj vrednosti dodatnih napona pritiska od $\sigma_{A,p} = -72 \text{ N/mm}^2$ u skladu sa [49], [51], [82] određuje se korišćenjem sledećih jednačina [56]:

$$\Delta T_{A,p} = 120 \text{ }^\circ\text{C} - (\Delta T_{r,p} + \Delta T_s + \Delta T_{r,e}) = 120 - 42,5 - 45 - 3 \approx 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.61)$$

$$\Delta T_{A,p} = \frac{\sigma_{A,p}}{E \cdot \alpha} = \frac{72}{2,415} \approx 30 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.62)$$

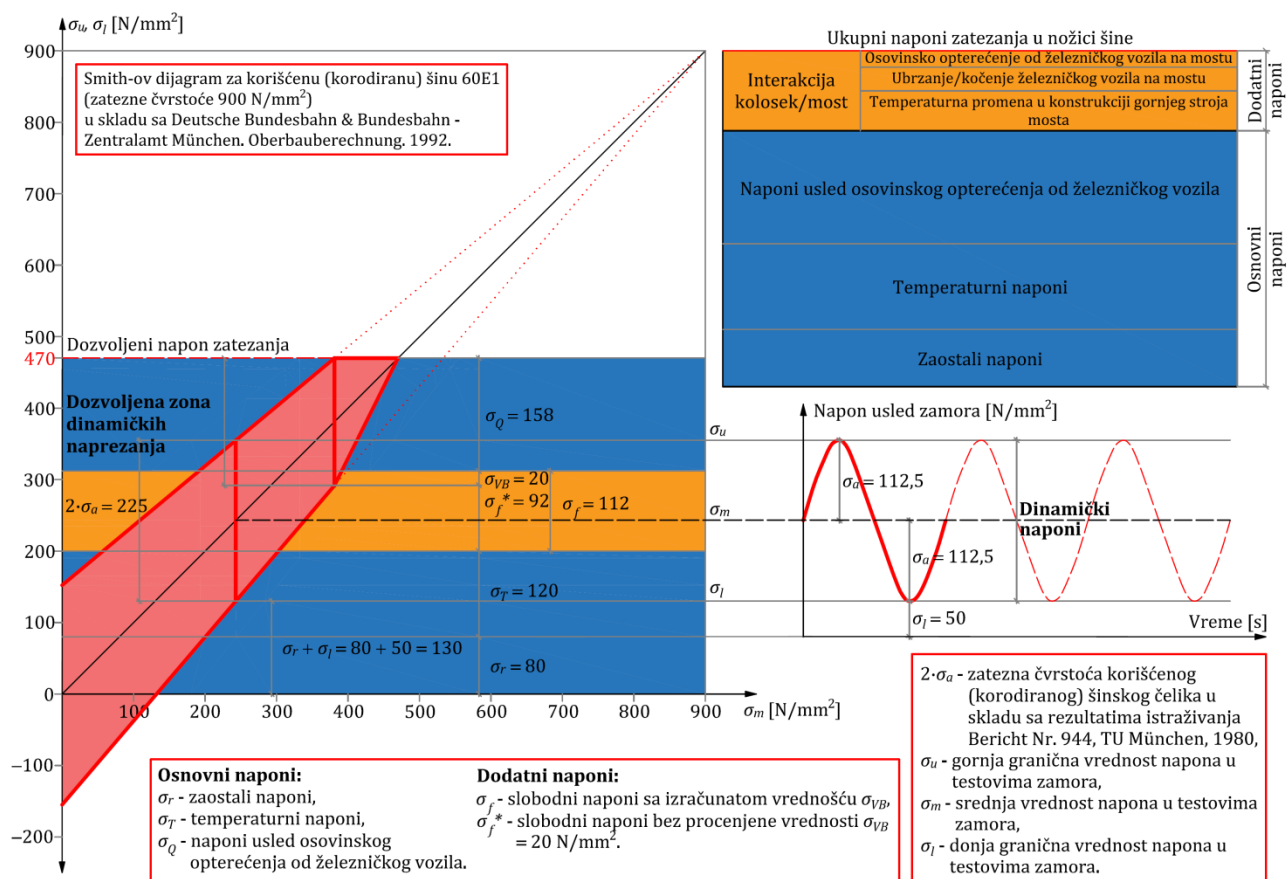
gde je:

- $\Delta T_{r,p}$ - razlika između maksimalne temperature šine T_{max} i neutralne temperature šine T_n ,
- ΔT_s - sigurnosna temperaturna promena u skladu sa tabelom 3.2,
- $\Delta T_{r,e}$ - temperaturna promena od $3 \text{ }^\circ\text{C}$ koja odgovara izduženju šine pod uticajem železničkog saobraćaja.

Tabela 3.2 Sigurnosna temperaturna promena [55], [56]

V_T [km/h]	≤ 80	100	120	140	160	230
ΔT_s [$^\circ\text{C}$]	10	20	25	30	40	50
$E \cdot \alpha \cdot \Delta T_s$ [N/mm^2]	24,15	48,30	60,38	72,45	96,60	120,75

Sa druge strane, na slici 3.21 prema Smith-ovom dijagramu prikazane su vrednosti napona zatezanja u težištu nožice korišćene (korodirane) šine tipa 60E1 (zatezne čvrstoće 900 N/mm^2). Dozvoljena vrednost napona zatezanja iznosi 470 N/mm^2 u skladu sa [83].



Slika 3.21 Smith-ov dijagram za korišćenu (korodiranu) šinu 60E1 (zatezne čvrstoće 900 N/mm²) [83] i dijagram napona usled zamora šinskog čelika [84], [6], [10], [56]

Dozvoljena vrednost dodatnih napona zatezanja u nožici šine može se takođe odrediti iz Smith-ovog dijagrama prikazanog na slici 3.21. Ukupni osnovni naponi zatezanja iznose 358 N/mm² i predstavljaju zbir sledećih napona: $\sigma_r = 80$ N/mm², $\sigma_T = 120$ N/mm² i $\sigma_Q = 158$ N/mm². Ako se napon usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (σ_{VB}) određuje proračunski, dodatni slobodni naponi zatezanja iznose $\sigma_f = 470 - 358 = 112$ N/mm². U slučaju da se napon usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu procenjuje $\sigma_{VB} = 20$ N/mm², dodatni slobodni naponi zatezanja iznose $\sigma_f^* = 112 - 20 = 92$ N/mm² u skladu sa [82], [85]. Dostupna zona dinamičkog napreznja obuhvata samo efekte od osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu $\sigma_{VB} = 20$ N/mm², dok dozvoljene vrednosti dodatnih napona za uticaje usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu i temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta iznose $112 - 20 = 92$ N/mm² i ne predstavljaju deo dostupne zone dinamičkog napreznja (slika 3.21) [56].

U oba prethodno navedena slučaja pretpostavljeno je da je zaostali napon u nožici šine 80 N/mm². Sa druge strane, u istraživanju [86] pokazano je da profil šine tipa 60E1 može imati i znatno veće zaostale napone. Takođe, standard [5] definiše maksimalne vrednosti zaostalih napona u nožici šine do 250 N/mm² za sve vrste šinskog čelika [56].

Standard EN 1991-2 [51] propisuje dozvoljene vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu od -72 N/mm² za napone pritiska i 92 N/mm² za napone zatezanja, kao i sledeće tehničke karakteristike gornjeg stroja železničke pruge za koje ove vrednosti napona važe:

- profil šine tipa 60E1 (minimalne zatezne čvrstoće 900 N/mm²) u skladu sa [5],
- elastični sistemi šinskih pričvršćenja u skladu sa [87],
- maksimalni razmak između betonskih pragova za kolosek u zastoru od tucanika do 65 cm,

- minimalna debljina zbijenog zastora ispod praga od 30 cm,
- kolosek na pravcu ili u krivini minimalnog poluprečnika od 1500 m.

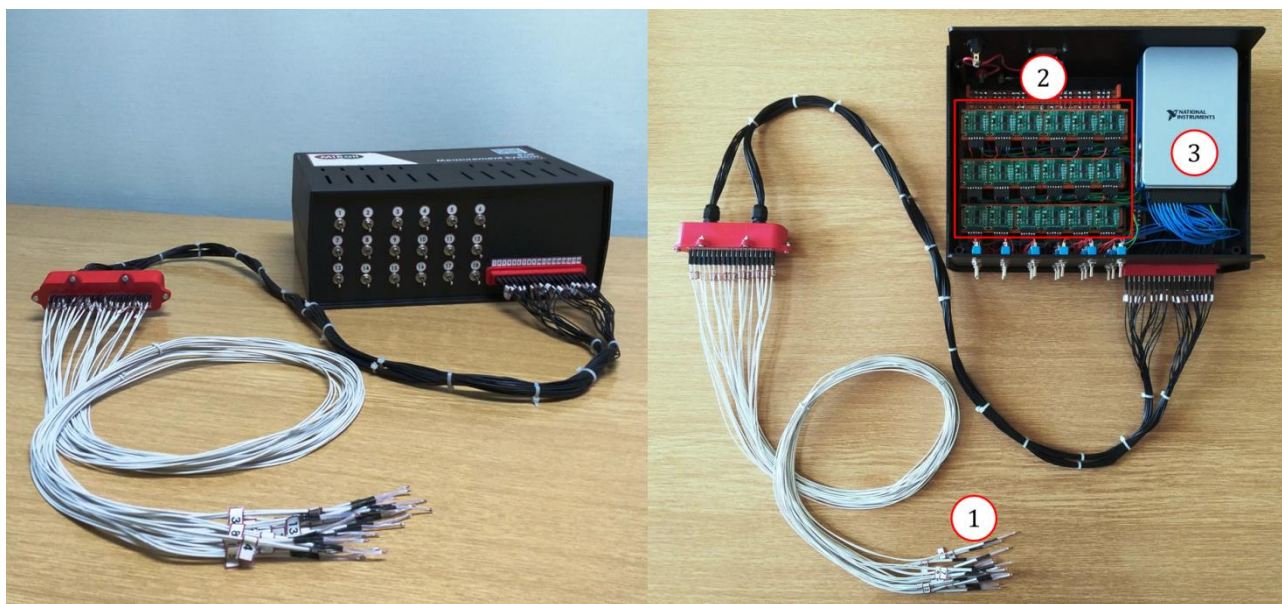
Kontrolom dodatnih napona pritiska i zatezanja u kontinualno zavarenim šinama na mostu, kao i optimizacijom konstrukcija koloseka i mosta u cilju smanjenja vrednosti dodatnih napona izostavlja se ugradnja šinskih dilatacionih sprava u koloseku na mostu. Na taj način se smanjuju troškovi održavanja železničke infrastrukture uz istovremeno povećanje bezbednosti i udobnosti železničkog saobraćaja [56], [88].

4 EKSPERIMENTALNA MERENJA POVRŠINSKIH TEMPERATURA ŠINE

U ovom poglavlju prikazana su eksperimentalna merenja površinskih temperatura šine koja su sprovedena na neopterećenom test koloseku u Beogradu tokom avgusta 2019. godine. Eksperimentalna merenja su obavljena primenom mernog sistema koji je razvijen za potrebe ovog istraživanja i čije su osnovne komponente, kao i principi rada prikazani u ovom poglavlju. Takođe, predstavljeni su rezultati kalibracije mernog sistema i karakteristike pojedinačnih temperaturnih senzora. Izvršena je analiza dobijenih rezultata eksperimentalnih merenja, kao i rezultata kontrolnih merenja sa gušćim rasporedom senzora u cilju provere pouzdanosti sprovedenih merenja. Rezultati istraživanja prikazani u ovom poglavlju publikovani su u radu [10].

4.1 Merni sistem

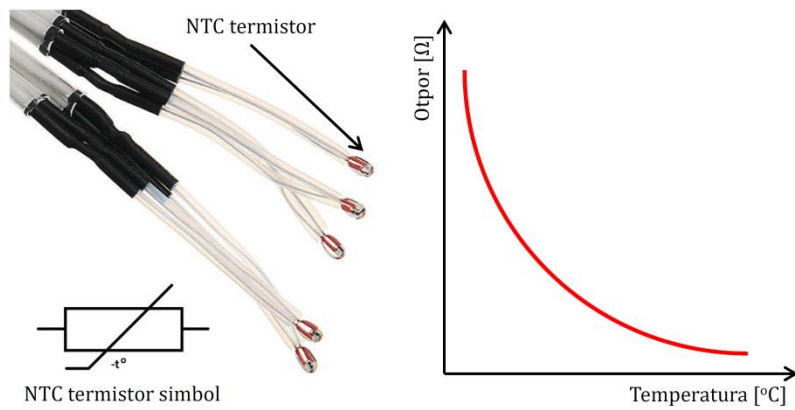
Na slici 4.1 prikazan je merni sistem za merenje površinskih temperatura šine, kao i njegove osnovne komponente. Razvijen je za potrebe ovog istraživanja i služi za merenje temperatura šine primenom termistorskih senzora. Glavna prednost razvijenog mernog sistema sa termistorskim sensorima je velika osetljivost na male temperaturne promene u poređenju sa drugim vrstama temperaturnih senzora (npr. termoparovima) koji su korišćeni u prethodnim istraživanjima [11], [89]. S obzirom da su površinske temperature u posmatranom poprečnom preseku šine vrlo bliske ova karakteristika mernog sistema je od velikog značaja [10].



Slika 4.1 Merni sistem za merenje površinskih temperatura šine (levo) i njegove osnovne komponente (desno) [10]

4.1.1 Komponente mernog sistema

Komponenta 1 (slika 4.1) predstavlja termistorske senzore tipa NTC (Negative Temperature Coefficient) sa predefinisanim otporom od 100 k Ω . Termistorski senzori su poluprovodnici osetljivi na temperaturu, koji u relativno malom temperaturnom opsegu imaju veliku promenu otpora. Kada se temperatura smanjuje, otpor NTC termistora se povećava, i obrnuto. NTC termistorski senzori imaju nelinearnu vezu temperature i otpora (slika 4.2) [10].



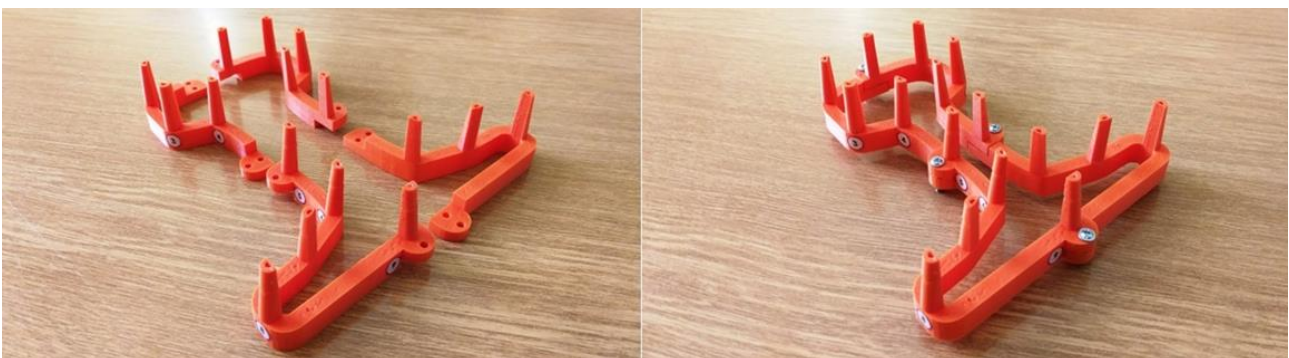
Slika 4.2 NTC termistori (levo) i dijagram nelinearne veze otpora i temperature (desno)

Merni sistem poseduje ukupno 18 NTC termistorskih senzora (koji su numerisani brojevima od T1 do T18). NTC termistori se ne moraju koristiti svi istovremeno, već se mogu aktivirati (deaktivirati) pojedinačno preko ugrađenih prekidača sa prednje strane uređaja (slika 4.1). Pored toga, NTC termistori imaju relativno male dimenzije i mogu se lako montirati na površinu šine pomoću magneta (slika 4.3). Za bolji kontakt između površine šine i senzora korišćena je termalna pasta [10].



Slika 4.3 Montaža termistorskih senzora uz pomoć magneta

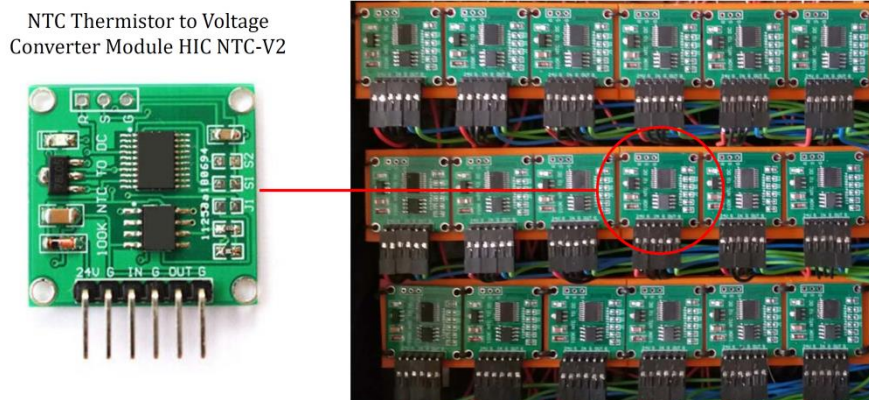
Drugi način montiranja termistorskih senzora na površinu šine je uz pomoć držača termistorskih senzora. Držač termistorskih senzora napravljen je od PLA (Polylactic Acid) materijala primenom 3D štampača. Da bi se obezbedilo jednostavno postavljanje ovog držača na šinu, on je konstruisan modularno i sastoji se od četiri dela koja se međusobno povezuju zavrtnjevima. Na slici 4.4 prikazan je držač namenjen za upotrebu na profilu šine tipa 60E1 i omogućava montiranje do 16 termistorskih senzora po konturi šine.



Slika 4.4 Modularni držač termistorskih senzora od PLA materijala

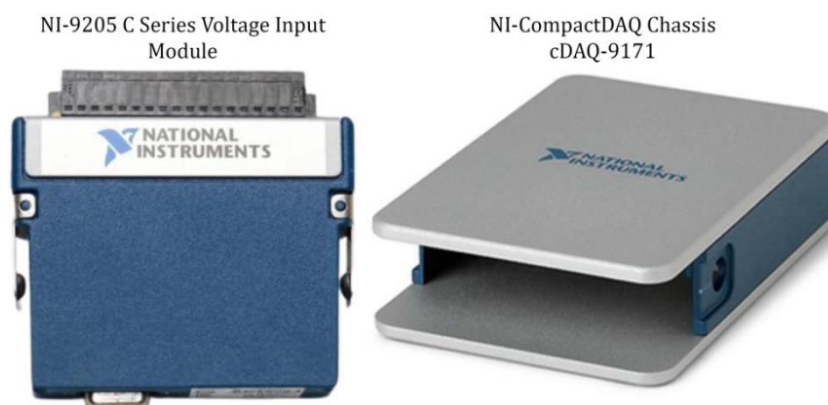
Komponenta 2 (slika 4.1) predstavlja modul tipa NTC Thermistor to Voltage Converter Module HIC NTC-V2 [90], koji konvertuje nelinearne signale sa NTC termistora u linearne

izlazne napone u opsegu od 0-5 V. Svaki NTC termistor je povezan na svoj modul (ukupno 18, slike 4.1 i 4.5). Glavne karakteristike ovog modula su niska cena, male dimenzije, linearna konverzija, kao i visoka tačnost merenja. Proizvođač NTC Thermistor to Voltage Converter Module HIC NTC-V2 propisao je linearnu vezu temperature i izlaznog napona u skladu sa [90]. Propisana osetljivost (S) svakog modula za izlazni napon u opsegu 0-5 V iznosi 0,0294117 V/°C [10].



Slika 4.5 NTC Thermistor to Voltage Converter Module HIC NTC-V2 [90]

Komponenta 3 (slika 4.1) predstavlja 16 bit-ni akvizicioni sistem za prikupljanje izmerenih podataka koji se sastoji od dva modula: National Instruments NI-9205C Series Voltage Input Module [91] i NI-CompactDAQ Chassis cDAQ-9171 [92] (slika 4.6). Ovaj akvizicioni sistem obezbeđuje visoku tačnost merenja u skladu sa zahtevima istraživanja [10].



Slika 4.6 Elementi akvizicionog sistema ugrađenog u merni sistem [91], [92]

4.1.2 Kalibracija mernog sistema

NTC termistorski senzori istih nominalnih vrednosti mogu imati različite karakteristike i iz tog razloga je potrebno izvršiti njihovu kalibraciju. U tu svrhu korišćen je referentni termometar Pt 100 (ETI 222-050, tačnosti 0,05 °C, rezolucije 0,01 °C) i merni sistem je kalibrisan u temperaturnom opsegu od 0 °C do 80 °C u 27 mernih tačaka po svakom temperaturnom senzoru (486 uzoraka ukupno za svih 18 temperaturnih senzora). Dobijene su prosečne vrednosti izlaznih napona temperaturnih senzora pri svakoj stabilizovanoj temperaturi. Za određivanje linearne veze između temperature i izlaznog napona korišćena je metoda najmanjih kvadrata. U tabeli 4.1 prikazani su rezultati sprovedene kalibracije. Linearna veza temperature i izlaznog napona, osetljivost temperaturnog senzora, kao i standardna devijacija linearne regresije prikazani su za svaki temperaturni senzor. Temperaturni senzori su pokazali visoku linearnost, kao i minimalno međusobno odstupanje u osetljivosti. Dobijene linearne veze između temperature i izlaznog napona za svaki senzor korišćene su za proračun temperatura [10].

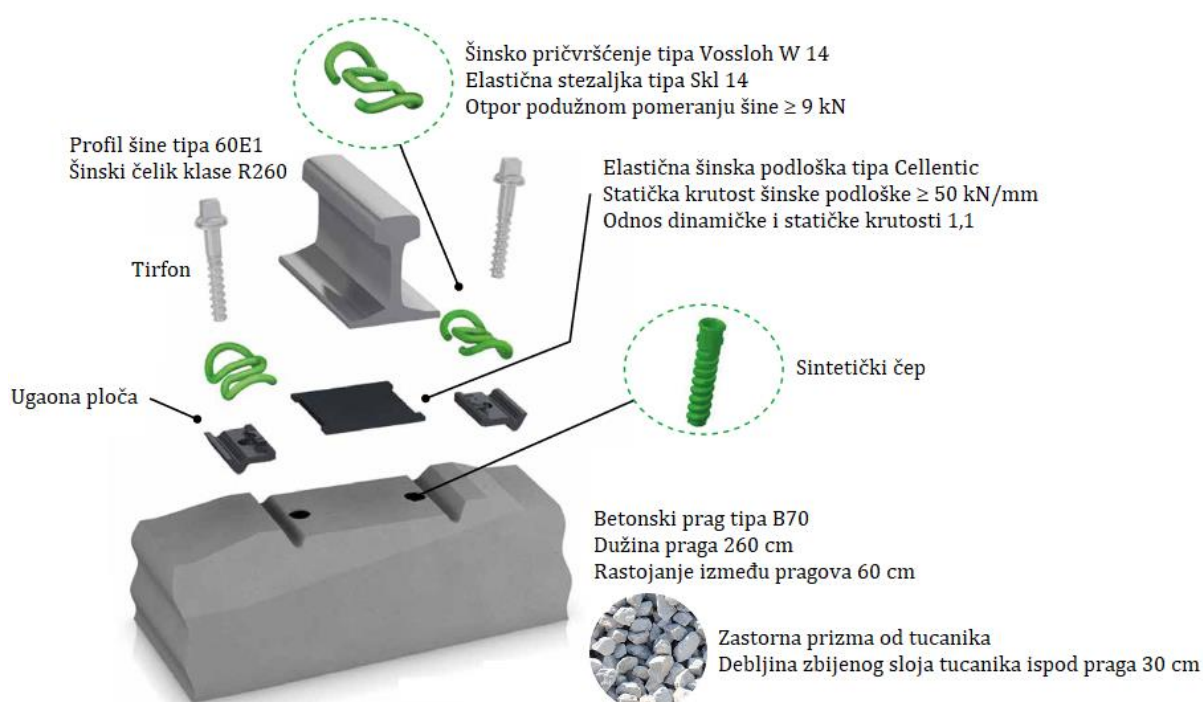
Tabela 4.1 Rezultati kalibracije temperaturnih senzora [10]

Temperaturni senzor	Linearna veza temperature i izlaznog napona ($T(U)$) [°C]	Osetljivost (S) [V/°C]	Standardna devijacija (σ) [°C]
T1	$T = 33,9953 \cdot U - 22,6713$	0,0294158	0,1393
T2	$T = 34,2831 \cdot U - 22,6637$	0,0291689	0,1538
T3	$T = 34,1589 \cdot U - 22,9354$	0,0292749	0,1306
T4	$T = 34,1748 \cdot U - 22,9158$	0,0292613	0,1469
T5	$T = 33,9738 \cdot U - 22,6565$	0,0294344	0,1238
T6	$T = 34,3606 \cdot U - 23,0686$	0,0291031	0,1162
T7	$T = 34,6067 \cdot U - 23,2013$	0,0288961	0,1279
T8	$T = 34,4692 \cdot U - 22,9721$	0,0290114	0,1538
T9	$T = 34,2729 \cdot U - 22,9228$	0,0291776	0,1748
T10	$T = 34,2341 \cdot U - 22,8283$	0,0292107	0,1639
T11	$T = 34,1721 \cdot U - 22,8489$	0,0292636	0,1414
T12	$T = 34,1688 \cdot U - 22,7222$	0,0292665	0,1433
T13	$T = 34,1738 \cdot U - 22,6678$	0,0292621	0,1643
T14	$T = 34,0527 \cdot U - 22,7860$	0,0293662	0,1781
T15	$T = 34,2585 \cdot U - 22,7103$	0,0291899	0,1608
T16	$T = 34,1934 \cdot U - 22,7661$	0,0292455	0,1545
T17	$T = 34,1273 \cdot U - 22,7758$	0,0293020	0,1228
T18	$T = 33,9744 \cdot U - 22,6638$	0,0294340	0,1552

4.2 Postavka eksperimentalnih merenja

Eksperimentalna merenja površinskih temperatura šine sprovedena su na neopterećenom test koloseku u Beogradu tokom avgusta 2019. godine. Elementi konstrukcije test koloseka (slika 4.7) su [10]:

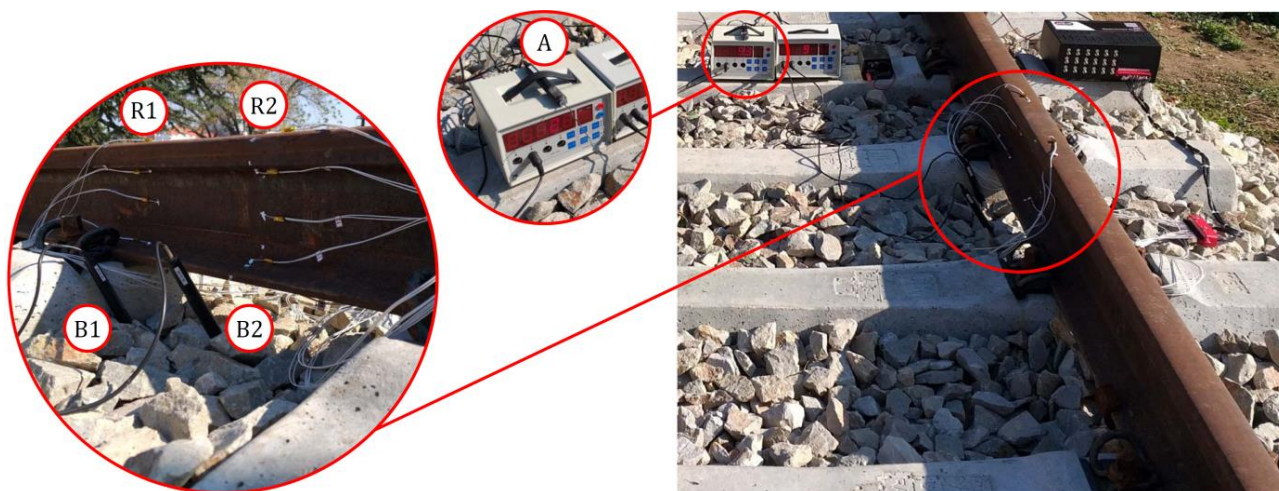
- šine tipa 60E1 (šinski čelik klase R260) u skladu sa [5],
- sistemi elastičnog šinskog pričvršćivanja Vossloh W 14 u skladu sa [93], [94],
- betonski pragovi tipa B70 u skladu sa [95].



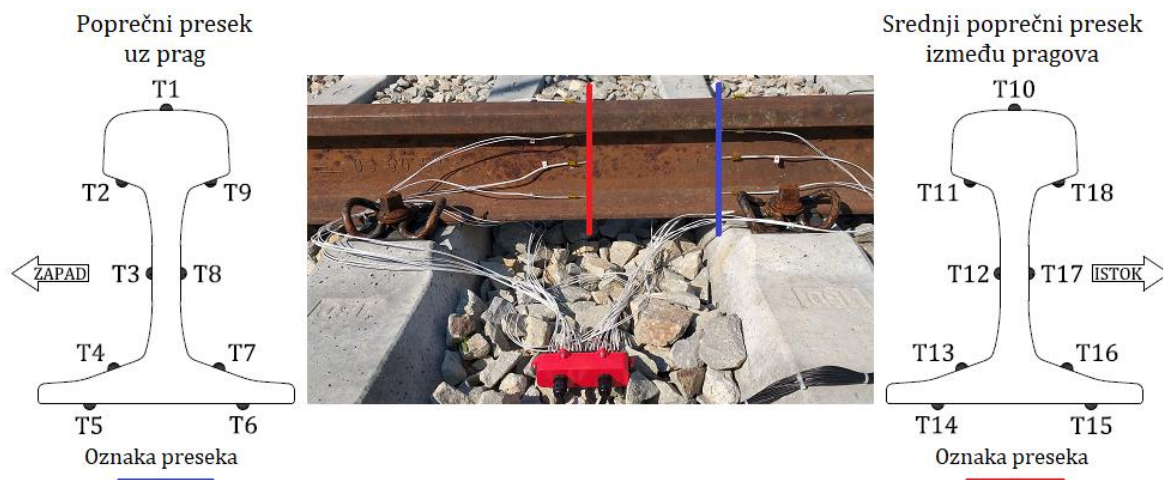
Slika 4.7 Grafički prikaz elemenata konstrukcije test koloseka u zastoru od tucanika [93]

Test kolosek se nalazi u zastornoj prizmi od prirodnog drobljenog agregata (tucanika) u skladu sa [96]. Kolosek je položen u pravcu sever-jug i izložen je direktnom sunčevom zračenju. Neutralna temperatura šina pri ugradnji iznosila je 20 °C [10].

Na slici 4.8 prikazana je postavka eksperimentalnih merenja površinskih temperatura u dva poprečna preseka šine. U poprečnom preseku uz prag nalazi se grupa senzora R1 (temperaturni senzori numerisani brojevima od T1 do T9, slika 4.9), dok se u srednjem poprečnom preseku između pragova nalazi grupa senzora R2 (temperaturni senzori numerisani brojevima od T10 do T18, slika 4.9). Merenja su sprovedena u periodu od 08:00 h do 18:00 h (ukupno 10 h), sa uzorkovanjem temperature na svakih 20 s (1800 uzoraka po jednom temperaturnom senzoru, tj. 32400 uzoraka ukupno za svih 18 temperaturnih senzora). U ovom eksperimentalnom merenju su po prvi put korišćeni NTC termistorski senzori za merenje varijacija temperature u dva poprečna preseka duž šine kako bi se potvrdio i kvantifikovao efekat prenosa toplote između šine i praga, kao i između nožice šine i zastora od tucanika. Takođe, merene su temperature zastorne prizme (senzori B1 i B2 na slici 4.8), kao i temperatura vazduha (senzor A na slici 4.8). Digital Thermometer (type 666 209) [97] i Temperature Sensors NiCr-Ni termopar sonde prečnika 1,5 mm i dužine 150 mm (type 666-193) [98] korišćeni su za merenje temperatura zastorne prizme, kao i temperature vazduha (senzori A, B1 i B2 na slici 4.8). Vrhovi senzora B1 i B2 bili su postavljeni u zastornoj prizmi na dubini od 15 cm od gornje površine prizme [10].



Slika 4.8 Postavka eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine, temperatura zastora i temperature vazduha [10]



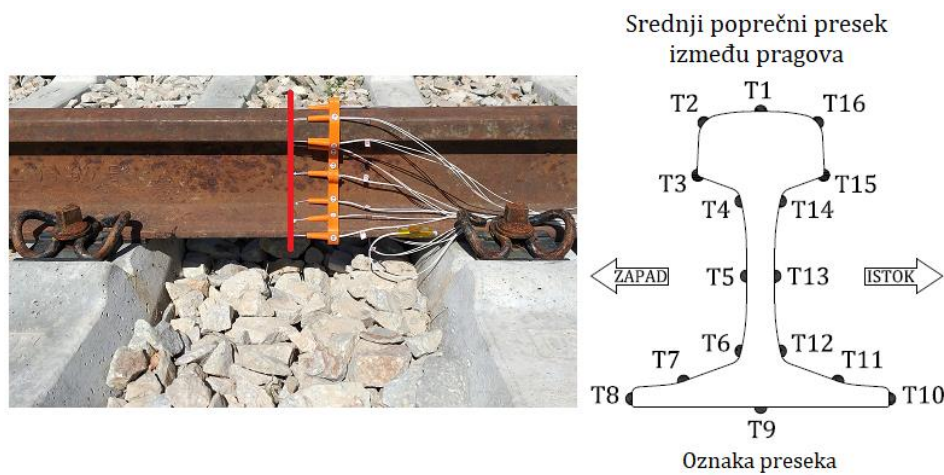
Slika 4.9 Položaj mernih preseka i raspored temperaturnih senzora kod eksperimentalnih merenja

Na slici 4.10 prikazana je postavka kontrolnih merenja sa gušćim rasporedom senzora R (temperaturni senzori numerisani brojevima od T1 do T16, slika 4.11) postavljenim u srednjem poprečnom preseku između pragova za merenje dnevnih površinskih temperatura šine [10].



Slika 4.10 Postavka kontrolnih merenja površinskih temperatura šine, temperature zastora i temperature vazduha

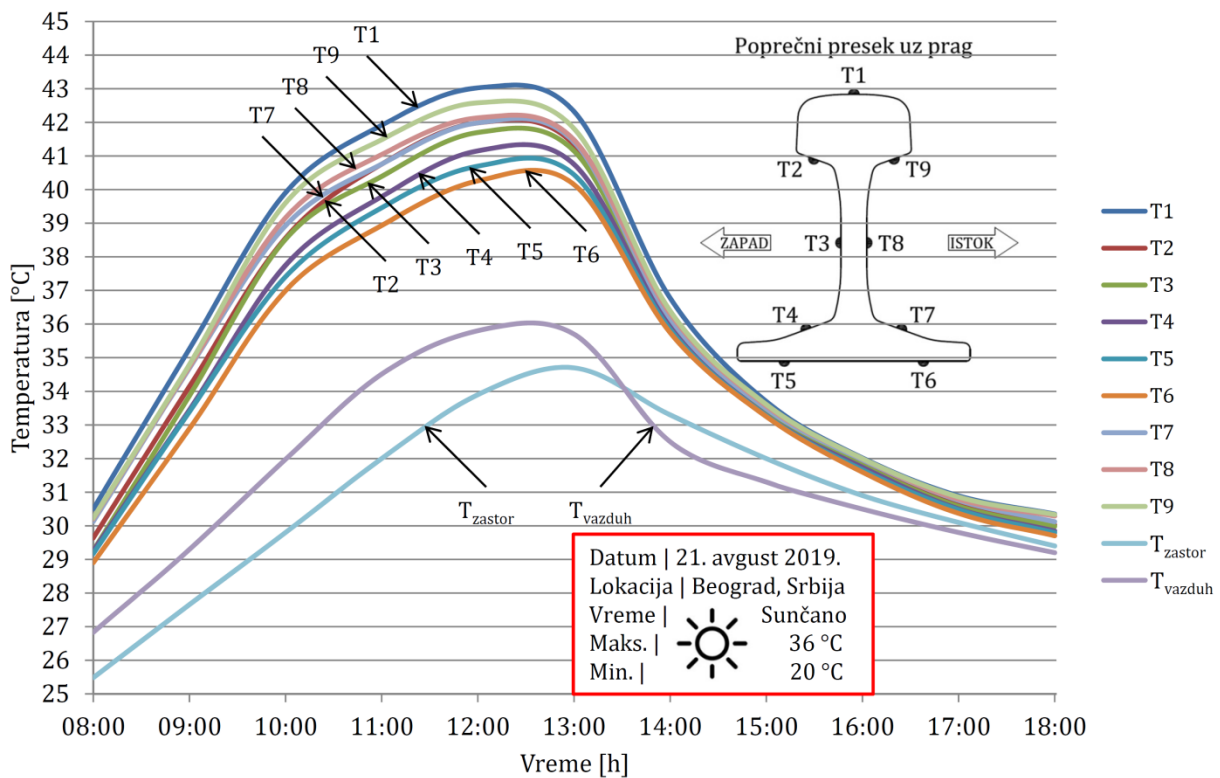
Kontrolna merenja su takođe sprovedena u periodu od 08:00 h do 18:00 h (ukupno 10 h), sa uzorkovanjem temperature na svakih 20 s (1800 uzoraka po jednom temperaturnom senzoru, tj. 28800 uzoraka ukupno za svih 16 temperaturnih senzora) na istoj lokaciji merenja i pod približno istim vremenskim uslovima kao eksperimentalna merenja. Merena je takođe i temperatura zastorne prizme (senzor B na slici 4.10), kao i temperatura vazduha (senzor A na slici 4.10) [10].



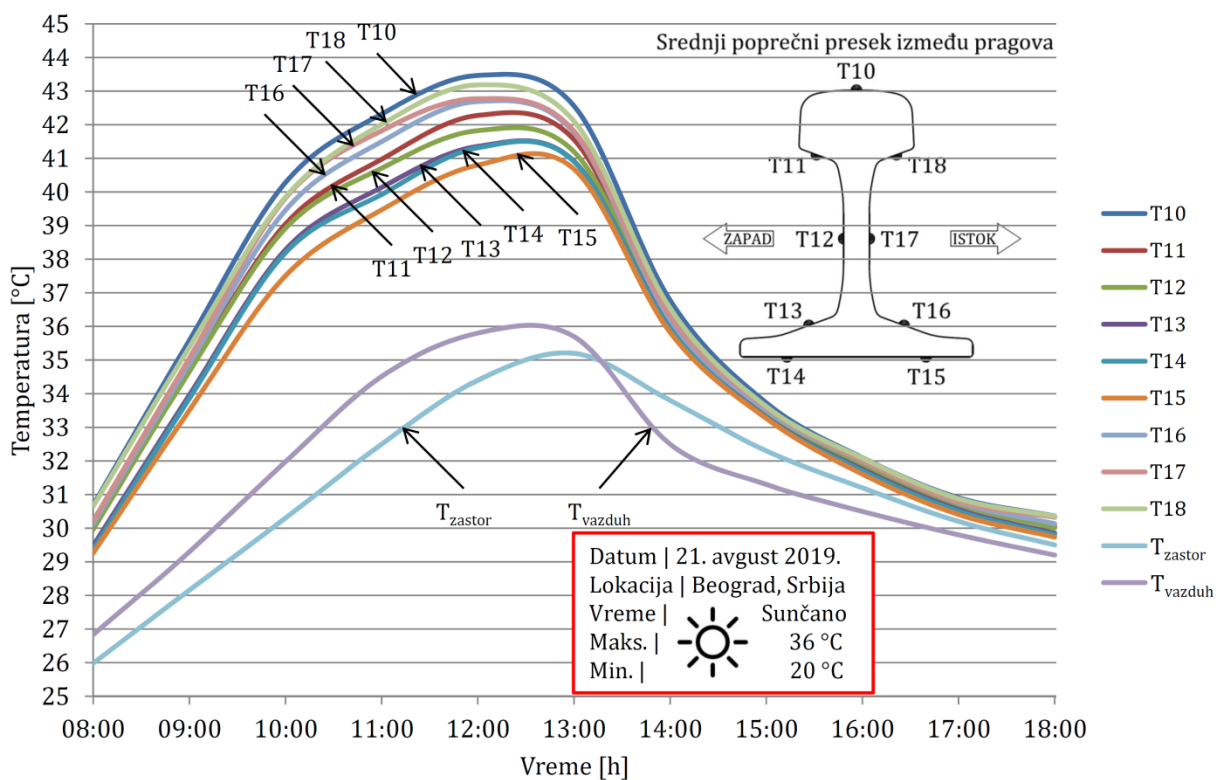
Slika 4.11 Položaj mernih preseka i raspored temperaturnih senzora kod kontrolnih merenja

4.3 Rezultati eksperimentalnih merenja

Krive T1-T9 (slika 4.12) predstavljaju izmerene površinske temperature šine u poprečnom preseku uz prag (grupa senzora R1 na slici 4.8), dok krive T10-T18 (slika 4.13) predstavljaju izmerene površinske temperature šine u srednjem poprečnom preseku između pragova (grupa senzora R2 na slici 4.8). Krive T_{zastor} (slike 4.12 i 4.13) predstavljaju izmerene temperature zastorne prizme u poprečnom preseku uz prag i srednjem poprečnom preseku između pragova (senzori B1, B2 redom na slici 4.8). Kriva T_{vazduh} (slike 4.12 i 4.13) predstavlja izmerene temperature vazduha (senzor A na slici 4.8) [10].

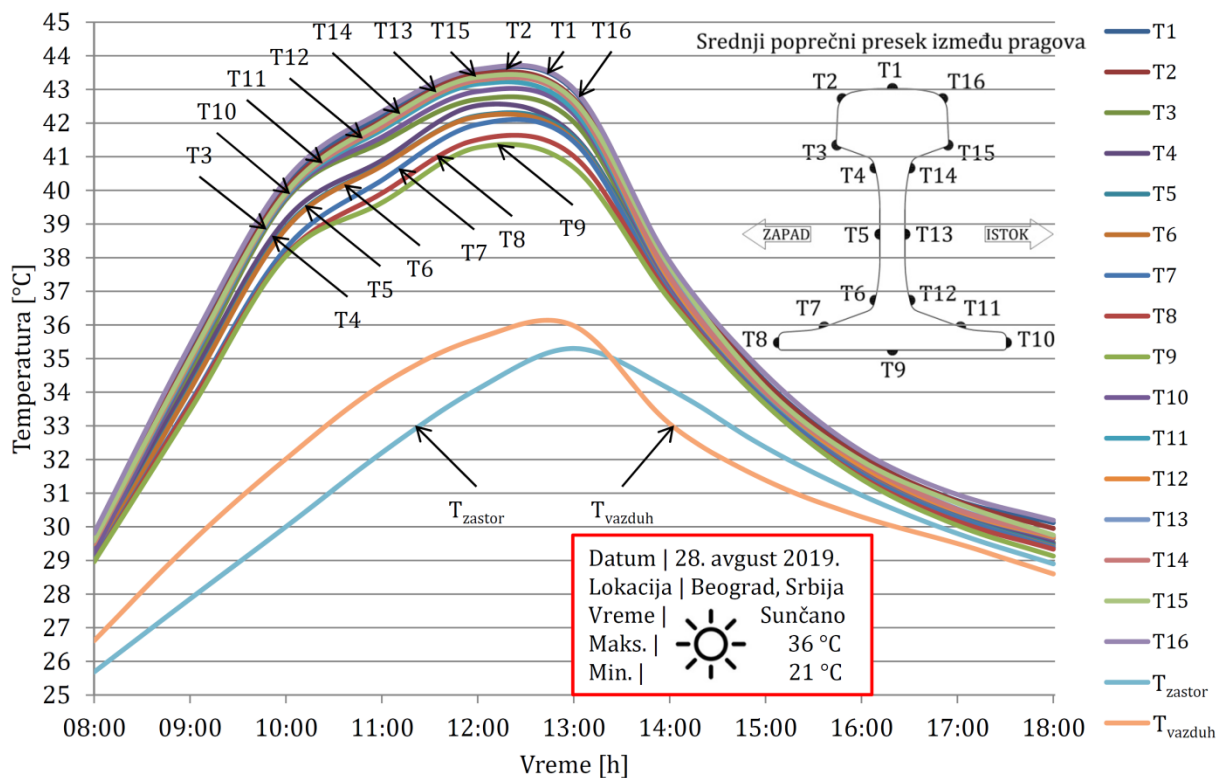


Slika 4.12 Rezultati eksperimentalnih merenja u poprečnom preseku uz prag [10]



Slika 4.13 Rezultati eksperimentalnih merenja u srednjem poprečnom preseku između pragova [10]

Kontrolna merenja sa gušćim rasporedom senzora sprovedena su kako bi se potvrdila ponovljivost i pouzdanost merenja površinskih temperatura šine. Krive T1-T16 (slika 4.14) predstavljaju izmerene površinske temperature šine u srednjem poprečnom preseku između pragova (grupa senzora R na slici 4.10). Krive T_{zastor} i T_{vazduh} (slika 4.14) predstavljaju izmerenu temperaturu zastorne prizme u srednjem poprečnom preseku između pragova i temperaturu vazduha (senzori B i A redom na slici 4.10) [10].



Slika 4.14 Rezultati kontrolnih merenja u srednjem poprečnom preseku između pragova [10]

Dobijeni rezultati površinskih temperatura šine (slike 4.12, 4.13 i 4.14) koristiće se kao ulazni podaci za proračun temperaturnog polja šine, temperaturnih napona, kao i temperaturnih dilatacija [10].

Najniže maksimalne površinske temperature šine izmerene su na nožici šine u senzoru T6 (40,26 °C, slika 4.12), dok su najviše maksimalne površinske temperature šine izmerene na glavi šine u senzoru T10 (43,47 °C, slika 4.13). Niže temperature su izmerene u sensorima koji su bili postavljeni na zapadnoj strani šine, nego u njima simetričnim sensorima koji su bili postavljeni na istočnoj strani šine (slike 4.12 i 4.13) usled uticaja direktnog sunčevog zračenja na istočnoj strani šine. Rezultati merenja (slike 4.12 i 4.13) pokazali su da su niže površinske temperature šine izmerene u sensorima u poprečnom preseku šine uz prag nego u sensorima postavljenim u srednjem poprečnom preseku šine između pragova (u istom vremenskom trenutku). Ovaj fenomen se može objasniti uticajem temperature betonskog praga na smanjenje površinskih temperatura šine u zoni praga. Takođe, rezultati merenja (slike 4.12 i 4.13) pokazali su niže površinske temperature nožice šine u poređenju sa temperaturama na vratu i glavi šine, što se može objasniti uticajem temperature zastora na smanjenje temperature u nožici šine, kao i usled neizloženosti direktnom sunčevom zračenju donje strane nožice šine [10].

Iako je toplotna provodljivost vazduha znatno niža od toplotne provodljivosti zrna tucanika, izmerena maksimalna temperatura zastora je niža u poređenju sa izmerenom maksimalnom temperaturom vazduha, što se objašnjava time da je temperatura tucanika merena unutar zastorne prizme na dubini od 15 cm (slike 4.12 i 4.13) [10].

U tabeli 4.2 za eksperimentalna merenja prikazane su uporedne vrednosti površinskih temperatura šine na poziciji senzora T12 (u skladu sa inženjerskom praksom (slika 4.15)), srednjih površinskih temperatura šine svih senzora (T1-T9) u poprečnom preseku uz prag, kao i srednjih površinskih temperatura šine svih senzora (T10-T18) u srednjem poprečnom preseku između pragova. Maksimalna srednja površinska temperatura šine u sensorima (T10-T18) u srednjem poprečnom preseku između pragova (42,19 °C) veća je od maksimalne površinske temperature šine na poziciji senzora T12 (u skladu sa inženjerskom praksom)

(41,82 °C) za 0,88 %, dok je maksimalna srednja površinska temperatura šine u sensorima (T1-T9) u poprečnom preseku uz prag (41,72 °C) za 0,24 % manja od maksimalne površinske temperature šine na poziciji senzora T12 (u skladu sa inženjerskom praksom).



Slika 4.15 Pozicija šinskog termometra u skladu sa inženjerskom praksom [99]

Tabela 4.2 Uporedni rezultati površinskih temperatura šine (eksperimentalna merenja)

Vreme [h]	Temperatura na poziciji senzora T12 [°C]	Srednja temperatura u poprečnom preseku uz prag [°C]	Srednja temperatura u srednjem poprečnom preseku između pragova [°C]
08:00	29,96	29,70	29,99
09:00	34,66	34,14	34,62
10:00	38,92	38,54	39,04
11:00	40,70	40,50	40,98
12:00	41,82	41,72	42,19
13:00	41,20	41,21	41,50
14:00	36,14	36,16	36,21
15:00	33,41	33,45	33,47
16:00	31,86	31,86	31,90
17:00	30,71	30,66	30,70
18:00	30,00	30,05	30,07

Rezultati kontrolnih merenja (slika 4.14), sa gušćim rasporedom senzora na površini šine u srednjem poprečnom preseku između pragova, potvrdili su rezultate eksperimentalnih merenja. Što se tiče oblika, krive površinskih temperatura šine kontrolnih merenja poklopile su se sa krivima površinskih temperatura šine eksperimentalnih merenja (slike 4.13 i 4.14). Sa druge strane, vrednosti izmerenih površinskih temperatura šine za eksperimentalna i kontrolna merenja blago se razlikuju zbog različitih meteoroloških uslova tokom dva dana merenja. Kontrolna merenja su pokazala da su najniže maksimalne površinske temperature šine izmerene na nožici šine u senzoru T9 (41,28 °C slika 4.14), dok su najviše maksimalne površinske temperature šine izmerene na glavi šine u senzoru T16 (43,60 °C slika 4.14). Poređenjem rezultata eksperimentalnih merenja sa rezultatima kontrolnih merenja potvrđena je ponovljivost i pouzdanost sprovedenih merenja [10].

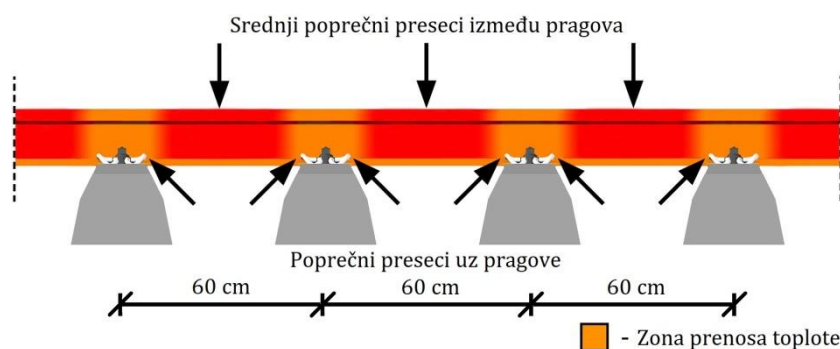
Takođe, u tabeli 4.3 za kontrolna merenja prikazane su uporedne vrednosti površinskih temperatura šine na poziciji senzora T5 (u skladu sa inženjerskom praksom (slika 4.15)), kao i srednjih površinskih temperatura šine svih senzora (T1-T16) u srednjem poprečnom preseku između pragova. Maksimalna srednja površinska temperatura šine u sensorima (T1-T16) u srednjem poprečnom preseku između pragova (42,77 °C) veća je od maksimalne površinske temperature šine na poziciji senzora T5 (u skladu sa inženjerskom praksom) (42,22 °C) za 1,30 %. Na ovaj način potvrđeni su rezultati eksperimentalnih merenja i to da je

srednja površinska temperatura šine svih senzora u srednjem poprečnom preseku između pragova veća od površinske temperature šine na poziciji senzora u skladu sa inženjerskom praksom.

Tabela 4.3 Usporedni rezultati površinskih temperatura šine (kontrolna merenja)

Vreme [h]	Temperatura na poziciji senzora T5 [°C]	Srednja temperatura u srednjem poprečnom preseku između pragova [°C]
08:00	29,09	29,36
09:00	34,13	34,57
10:00	38,91	39,42
11:00	40,74	41,34
12:00	42,22	42,77
13:00	41,58	42,11
14:00	37,04	37,30
15:00	33,74	33,96
16:00	31,60	31,79
17:00	30,30	30,47
18:00	29,45	29,64

Na osnovu rezultata eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine (slike 4.12 i 4.13), niže temperature su izmerene u poprečnom preseku uz prag u poređenju sa srednjim poprečnim presekom između pragova, što naglašava efekat prenosa toplote između šine i praga. Takođe, rezultati merenja površinske temperature šine u srednjem poprečnom preseku između pragova (slika 4.13) pokazali su niže temperature nožice šine u odnosu na glavu i vrat šine, što naglašava efekat prenosa toplote između nožice šine i zastora od tucanika. Ova zapažanja potvrđuju efekte prenosa toplote i smanjenja temperatura šine u zonama pragova, kao i u nožici šine duž koloseka, što je šematski prikazano na slici 4.16 [10].



Slika 4.16 Šematski prikaz zona u kojima se javlja prenos toplote između šine i pragova, kao i između nožice šine i zastora od tucanika [10]

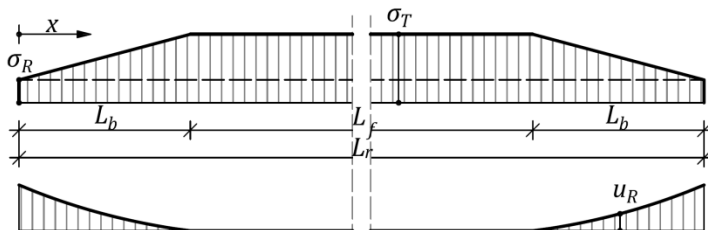
5 NUMERIČKA ANALIZA OSNOVNIH TEMPERATURNIH NAPONA

U ovom poglavlju prikazana je metodologija koja je razvijena za određivanje temperaturnog polja i osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama usled neravnomerne raspodele temperature. Metodologija se zasniva na rešavanju nestacionarne jednačine provođenja toplote šine uz poznavanje površinskih temperatura šine. Prikazane su karakteristike numeričkog modela koji se bazira na primeni metode konačnih elemenata i spregnutoj nestacionarnoj termičko-naponskoj analizi. Analiziran je uticaj neutralne temperature na vrednosti osnovnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama. Predstavljani su rezultati dobijeni primenom razvijene metodologije, kao i uporedna analiza sa rezultatima dobijenim u skladu sa inženjerskom praksom. Rezultati istraživanja prikazani u ovom poglavlju publikovani su u radu [10].

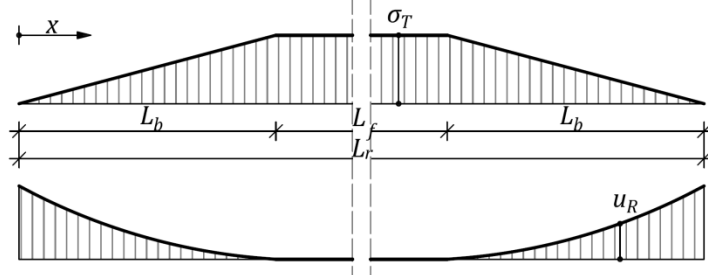
5.1 Metodologija

Teorijski, model kontinualno zavarene šine sastoji se od srednjeg nepokretnog dela šine dužine L_f , kao i od dva krajnja pokretna dela šine dužine L_b . Maksimalni podužni temperaturni napon u kontinualno zavarenoj šini (σ_T) nastaje u srednjem delu šine, tj. tamo gde su podužna pomeranja šine (u_R) jednaka nuli. U slučaju mehaničkih šinskih spojeva na krajevima kontinualno zavarene šine, naponi na krajevima šine su jednaki otporu mehaničkog šinskog spoja (σ_R). Sa druge strane, u slučaju šinskih dilatacionih sprava na krajevima kontinualno zavarene šine, krajevi šine slobodno dilatiraju i temperaturni naponi na krajevima su jednaki nuli (slika 5.1 (a) i (b)) [10].

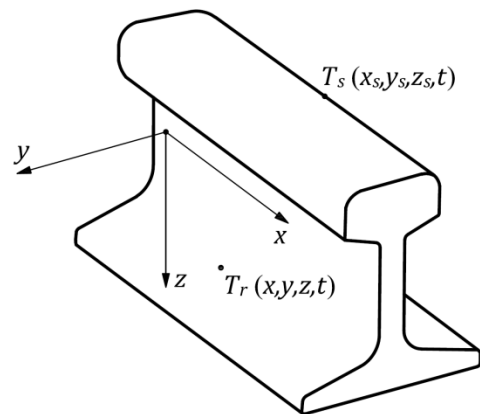
(a) Mehanički šinski spojevi



(b) Šinske dilatacione sprave



(c) Temperaturni model šine



Slika 5.1 Teorijska raspodela napona, pomeranja i temperatura u kontinualno zavarenoj šini [10]

S obzirom da su podužne temperaturne dilatacije kontinualno zavarene šine ($\epsilon_{T,x}$) u srednjem delu šine jednake nuli, podužni temperaturni naponi (σ_T) nastaju usled temperature promene između temperature šine (T_r) i neutralne temperature (T_n), i mogu se odrediti korišćenjem sledeće jednačine [10]:

$$\sigma_T(x, y, z, t) = E \cdot \alpha \cdot [T_r(x, y, z, t) - T_n] = E \cdot \alpha \cdot \Delta T_r(x, y, z, t) \quad (5.1)$$

gde je:

ΔT_r - temperaturna promena u kontinualno zavarenoj šini,
 x - podužna koordinata tačke u zapremini šine,
 y - poprečna koordinata tačke u zapremini šine,
 z - vertikalna koordinata tačke u zapremini šine,
 t - vreme.

Sa druge strane, poprečni i vertikalni temperaturni naponi u kontinualno zavarenoj šini jednaki su nuli, dok se poprečne i vertikalne temperaturne dilatacije ($\varepsilon_{T,y}$ i $\varepsilon_{T,z}$) mogu odrediti korišćenjem sledeće jednačine [10]:

$$\varepsilon_{T,y}(x,y,z,t) = \varepsilon_{T,z}(x,y,z,t) = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot [T_r(x,y,z,t) - T_n] = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \Delta T_r(x,y,z,t) \quad (5.2)$$

gde je:

ν - Poisson-ov koeficijent šinskog čelika.

Prethodne jednačine za određivanje podužnih temperaturnih napona, kao i poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija mogu se rešiti pod uslovom da je poznata raspodela temperature unutar šine. Temperaturno polje šine $T_r(x,y,z,t)$ određuje se kao rešenje prostornog nestacionarnog problema provođenja toplote u homogenom i izotropnom medijumu [10]. Fourier-ov zakon definiše vektor gustine toplotnog fluksa $\mathbf{q}(x,y,z,t)$ kao protok toplote u jedinici vremena, po jedinici površine, u pravcu opadanja temperature, u skladu sa sledećom jednačinom [100]:

$$\mathbf{q}(x,y,z,t) = -\mathbf{i} \cdot \lambda_x \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} - \mathbf{j} \cdot \lambda_y \cdot \frac{\partial T_r}{\partial y} - \mathbf{k} \cdot \lambda_z \cdot \frac{\partial T_r}{\partial z} \quad (5.3)$$

gde je:

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ - jedinični vektori pravaca x, y i z osa,
 λ_x - toplotna provodljivost šinskog čelika u pravcu x ose,
 λ_y - toplotna provodljivost šinskog čelika u pravcu y ose,
 λ_z - toplotna provodljivost šinskog čelika u pravcu z ose.

Tri komponente vektora gustine toplotnog fluksa (q_x, q_y i q_z) u pravcima x, y i z osa date su redom sledećim jednačinama [100]:

$$q_x = -\lambda_x \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} \quad (5.4)$$

$$q_y = -\lambda_y \cdot \frac{\partial T_r}{\partial y} \quad (5.5)$$

$$q_z = -\lambda_z \cdot \frac{\partial T_r}{\partial z} \quad (5.6)$$

Primenom zakona o održanju energije na diferencijalno malu zapreminu šine kroz koju se provodi toplota (slika 5.2) izvodi se jednačina za akumulaciju toplotne energije u jedinici vremena u posmatranoj zapremini, pisanjem izraza za toplotni fluks koji ulazi kroz granične površine zapremine šine (Q_x, Q_y, Q_z) i toplotni fluks koji izlazi kroz granične površine zapremine šine ($Q_{x+\Delta x}, Q_{y+\Delta y}, Q_{z+\Delta z}$) [101]:

$$Q_x = (\Delta y \cdot \Delta z) \cdot q_x = -\lambda_x \cdot (\Delta y \cdot \Delta z) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} \quad (5.7)$$

$$Q_y = (\Delta x \cdot \Delta z) \cdot q_y = -\lambda_y \cdot (\Delta x \cdot \Delta z) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial y} \quad (5.8)$$

$$Q_z = (\Delta x \cdot \Delta y) \cdot q_z = -\lambda_z \cdot (\Delta x \cdot \Delta y) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial z} \quad (5.9)$$

$$Q_{x+\Delta x} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (5.10)$$

$$Q_{y+\Delta y} = Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \cdot \Delta y \quad (5.11)$$

$$Q_{z+\Delta z} = Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \cdot \Delta z \quad (5.12)$$

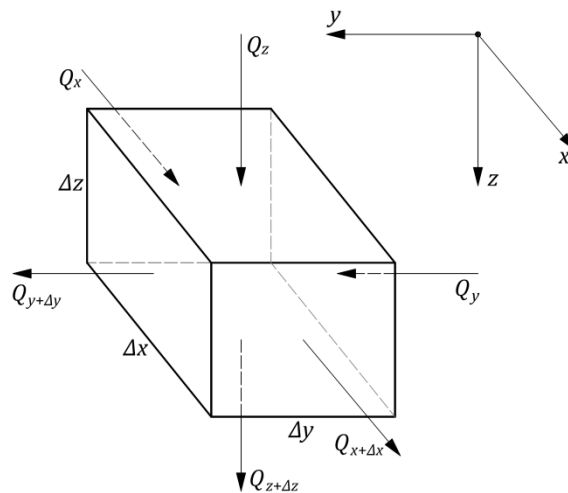
Takođe, količina toplote koja se u jedinici vremena akumulira unutar diferencijalno male zapremine šine može se izraziti i sledećim izrazom [101]:

$$\rho \cdot c \cdot (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (5.13)$$

gde je:

ρ - gustina šinskog čelika,

c - specifični toplotni kapacitet šinskog čelika.



Slika 5.2 Diferencijalno mala zapremina šine za analizu provođenja toplote [101]

Energetski bilans provođenja toplote kroz diferencijalno mali deo šine može se iskazati sledećom jednačinom (slika 5.2) [101]:

Količina toplotne energije u jedinici vremena koja ulazi kroz granične površine zapremine šine	-	Količina toplotne energije u jedinici vremena koja izlazi kroz granične površine zapremine šine	=	Količina toplotne energije u jedinici vremena koja se akumulira unutar zapremine šine
---	---	--	---	--

tj.

$$(Q_x + Q_y + Q_z) - (Q_{x+\Delta x} + Q_{y+\Delta y} + Q_{z+\Delta z}) = \rho \cdot c \cdot (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (5.14)$$

Zamenom izraza za Q_x , Q_y , Q_z , $Q_{x+\Delta x}$, $Q_{y+\Delta y}$, $Q_{z+\Delta z}$ u prethodnoj jednačini dobija se konačni oblik nestacionarne Fourier-ove jednačine provođenja toplote šine [101]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_x \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_y \cdot \frac{\partial T_r}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_z \cdot \frac{\partial T_r}{\partial z} \right] = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (5.15)$$

Ako se pretpostavi da je toplotna provodljivost šinskog čelika (λ) konstantna i nezavisna od temperature, nestacionarna Fourier-ova jednačina provođenja toplote za izotropan i homogen materijal može se napisati u sledećem obliku [101]:

$$\frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} = \frac{\rho \cdot c}{\lambda} \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (5.16)$$

Nestacionarna Fourier-ova jednačina provođenja toplote može se rešiti korišćenjem linearnih graničnih i početnih uslova prve, druge ili treće vrste u skladu sa [100]. Razvijena metodologija podrazumeva korišćenje linearnih graničnih i početnih uslova prve vrste, tzv. Dirichlet-ovih graničnih uslova, koji podrazumevaju poznavanje samo površinskih temperatura šine (slika 5.1 (c)) [100]:

$$T_r(x, y, z, t) = T_s(x_s, y_s, z_s, t), \text{ na graničnoj površini šine } \Gamma \quad (5.17)$$

gde je:

- T_s - površinska temperatura šine na graničnoj površini šine Γ ,
- x_s - podužna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ ,
- y_s - poprečna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ ,
- z_s - vertikalna koordinata tačke na graničnoj površini šine Γ .

Isti pristup primenjen je u istraživanju [102], u kome su autori koristili izmerene površinske temperature zida kako bi odredili temperaturno polje zida. Linearni granični i početni uslovi druge vrste, tzv. Neumann-ovi granični uslovi, podrazumevaju poznavanje toplotnog fluksa na graničnoj površini šine. Pristupi korišćeni u istraživanjima drugih autora [16], [17], [18] zasnovani su na određivanju temperaturnog polja šine usled razmene toplote između šine i okoline, odnosno korišćenjem linearnih graničnih i početnih uslova treće vrste [100]. Pored temperature vazduha, ovi pristupi zahtevaju podatke i o drugim meteorološkim parametrima (kao što su sunčevo zračenje, konvektivni prenos toplote između šine i vazduha, ugao sunčevih zraka itd.), što proračunski model čini znatno složenijim. Sa druge strane, razvijena metodologija koristi linearne granične i početne uslove prve vrste koji zahtevaju samo podatke o površinskoj temperaturi šine za određivanje temperaturnog polja šine. Površinska temperatura šine direktno zavisi od sunčevog zračenja, konvektivnog prenosa toplote između šine i vazduha, ugla sunčevih zraka itd. Merenjima površinske temperature šine, uticaji navedenih parametara na temperaturno polje šine se na indirektan način uzimaju u obzir [10].

5.1.1 Diskretizacija nestacionarne jednačine provođenja toplote

Primenom metode konačnih elemenata i Galerkin-ove metode diskretizacije može se prostorno i vremenski rešiti nestacionarna Fourier-ova jednačina provođenja toplote šine (5.16) u skladu sa odgovarajućim linearnim graničnim i početnim uslovima. Prema ovoj metodi temperatura šine aproksimira se na sledeći način [101]:

$$T_r = \sum_{i=1}^n N_i \cdot T_{r,i} \quad (5.18)$$

gde je:

- N_i - interpolaciona funkcija reprezentativnog čvora i ,
- n - broj čvorova u prostornom domenu Ω ,
- $T_{r,i}$ - vremenski zavisna temperatura šine u reprezentativnom čvoru i .

Nestacionarna jednačina provođenja toplote šine primenom Galerkin-ove metode prostorne diskretizacije dobija sledeći oblik [101]:

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot T_{r,j} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \cdot T_{r,j} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \cdot T_{r,j} \right) \right] \cdot d\Omega \\
& + \int_{\Omega} \left[-N_i \cdot \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial N_j}{\partial t} \cdot T_{r,j} \right) \right] \cdot d\Omega = 0
\end{aligned} \tag{5.19}$$

gde je:

N_j - interpolaciona funkcija reprezentativnog čvora j ,

$T_{r,j}$ - vremenski zavisna temperatura šine u reprezentativnom čvoru j .

Nestacionarna jednačina provođenja toplote šine može se napisati i u matricnom obliku [101]:

$$\mathbf{C} \cdot \left\{ \frac{d\mathbf{T}_r}{dt} \right\} + \mathbf{K} \cdot \{\mathbf{T}_r\} = \{\mathbf{0}\} \tag{5.20}$$

$$C_{i,j} \cdot \left\{ \frac{dT_r}{dt} \right\} + K_{i,j} \cdot T_{r,j} = 0 \tag{5.21}$$

gde je:

\mathbf{C} - matrica kapacitivnosti,

$$\mathbf{C} = \int_{\Omega} \rho \cdot c \cdot \mathbf{N}^T \cdot \mathbf{N} \cdot d\Omega \tag{5.22}$$

$C_{i,j}$ - elementi matrice kapacitivnosti,

$$C_{i,j} = \int_{\Omega} (\rho \cdot c) \cdot N_i \cdot N_j \cdot d\Omega \tag{5.23}$$

\mathbf{K} - matrica krutosti,

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D}_t \cdot \mathbf{B} \cdot d\Omega \tag{5.24}$$

$K_{i,j}$ - elementi matrice krutosti,

$$K_{i,j} = \int_{\Omega} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \left(\lambda_x \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \left(\lambda_y \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \left(\lambda_z \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) \right] \cdot d\Omega \tag{5.25}$$

\mathbf{D}_t - matrica toplotne provodljivosti,

$$\mathbf{D}_t = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \tag{5.26}$$

Matrica interpolacionih funkcija (\mathbf{N}), kao i matrica izvoda interpolacionih funkcija (\mathbf{B}), definisane su u nastavku ovog poglavlja pri matematičkoj formulaciji konačnih elemenata koji će biti primenjeni u numeričkom modelu za sprovođenje termičko-naponske analize.

Za diskretizaciju nestacionarne jednačine provođenja toplote šine u vremenskom domenu, takođe se koristi metoda konačnih elemenata. Temperatura šine u funkciji vremena koja je aproksimirana na vremenskom elementu predstavljena je sledećom jednačinom [101]:

$$T_{r,e}(t) = N_t^n(t) \cdot \mathbf{T}_r^n(t) + N_t^{n+1}(t) \cdot \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \tag{5.27}$$

gde je:

$N_t^n(t)$ - linearna interpolaciona funkcija u vremenskom trenutku n ,

$$N_t^n(t) = 1 - \frac{t}{\Delta t} \quad (5.28)$$

$N_t^{n+1}(t)$ - linearna interpolaciona funkcija u vremenskom trenutku $n+1$,

$$N_t^{n+1}(t) = \frac{t}{\Delta t} \quad (5.29)$$

Vremenski izvod temperature šine dat je u sledećem obliku [101]:

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = \frac{dN_t^n(t)}{dt} \cdot \mathbf{T}_r^n(t) + \frac{dN_t^{n+1}(t)}{dt} \cdot \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \quad (5.30)$$

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = -\frac{1}{\Delta t} \cdot \mathbf{T}_r^n(t) + \frac{1}{\Delta t} \cdot \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \quad (5.31)$$

Primenom Galerkin-ove metode diskretizacije (konstanta vremenske integracije iznosi $\beta_t = 2/3$ u skladu sa [103]) dobija se jednačina za vremenski interval (Δt) u konačnom obliku [101]:

$$\int_{\Delta t} \begin{Bmatrix} N_t^n(t) \\ N_t^{n+1}(t) \end{Bmatrix} \cdot \left[\mathbf{C} \cdot \left(-\frac{\mathbf{T}_r^n(t)}{\Delta t} + \frac{\mathbf{T}_r^{n+1}(t)}{\Delta t} \right) + \mathbf{K} \cdot \left(N_t^n(t) \cdot \mathbf{T}_r^n(t) + N_t^{n+1}(t) \cdot \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \right) \right] \cdot dt = 0 \quad (5.32)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \cdot \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_r^n(t) \\ \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \end{Bmatrix} + \frac{1}{3} \cdot \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_r^n(t) \\ \mathbf{T}_r^{n+1}(t) \end{Bmatrix} = 1 \quad (5.33)$$

gde je:

$$\int_{\Delta t} N_t^n(t)^a \cdot N_t^{n+1}(t)^b \cdot dt = \frac{a! \cdot b!}{(a+b+1)!} \cdot \Delta t \quad (5.34)$$

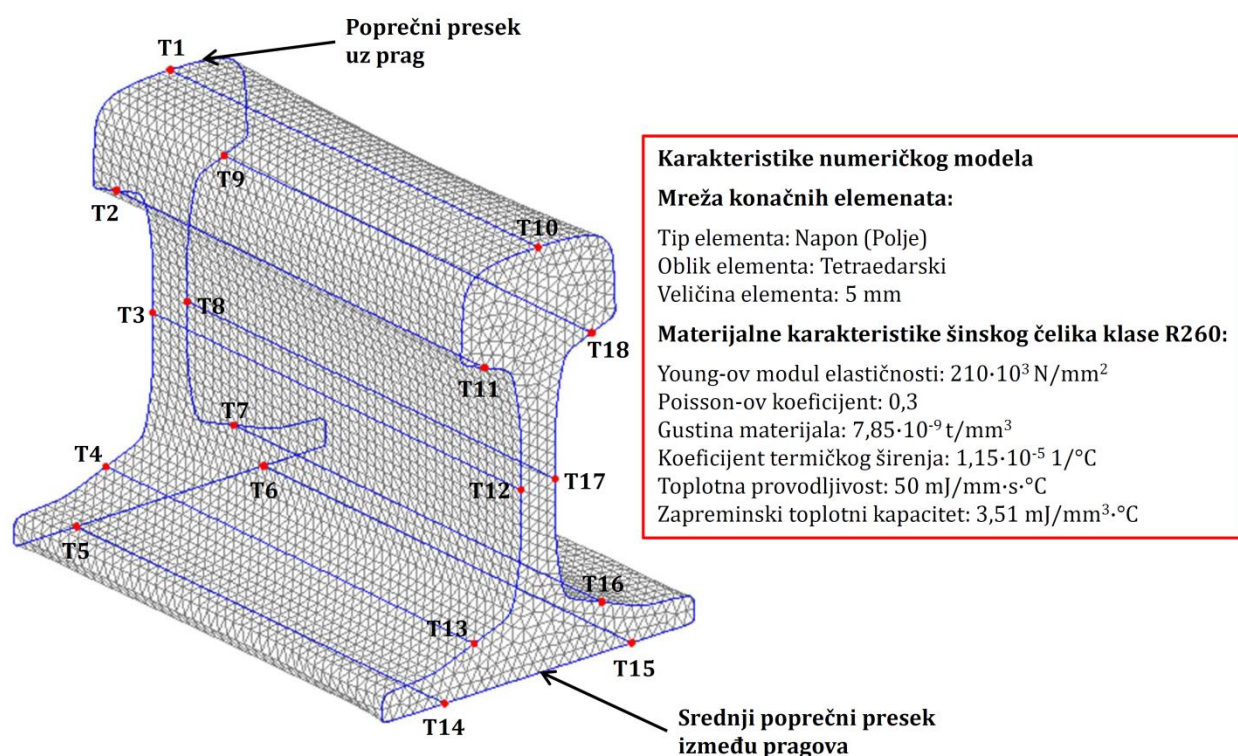
Spregnuta nestacionarna termičko-naponska analiza zasniva se na prikazanoj diskretizaciji i koristi se za numeričko rešavanje nestacionarne jednačine provođenja toplote šine usled neravnomerne raspodele temperature. Takođe, kod spregnute nestacionarne termičko-naponske analize rezultati termičke analize u funkciji vremena koriste se u naponskoj analizi pri određivanju temperaturnih napona šine, uzimajući na taj način u obzir istoriju promena temperatura šine, kao i efekte toplotne inercije [103].

5.2 Numerički model za analizu temperaturnih uticaja u šini

Numerički model za analizu temperaturnih uticaja u šini (slika 5.3) razvijen je u softveru Lusas Academic [104] korišćenjem metode konačnih elemenata. Bazira se na prostornom modelu kontinualno zavarene šine tipa 60E1 sa odgovarajućim graničnim uslovima i zadatim površinskim temperaturama u skladu sa dobijenim rezultatima eksperimentalnih merenja. Na numeričkom modelu sprovodi se spregnuta nestacionarna termičko-naponska analiza u cilju određivanja temperaturnog polja šine, temperaturnih napona, temperaturnih sila, kao i temperaturnih dilatacija [10].

Geometrijske karakteristike u numeričkom modelu usvojene su u skladu sa dimenzijama poprečnog preseka profila šine tipa 60E1. Dužina šine u numeričkom modelu je od poprečnog preseka uz prag do srednjeg poprečnog preseka između pragova, i iznosi 215 mm. Materijalne

karakteristike u numeričkom modelu odgovaraju karakteristikama šinskog čelika klase R260 u skladu sa [5], [7], [8] (slika 5.3) [10].



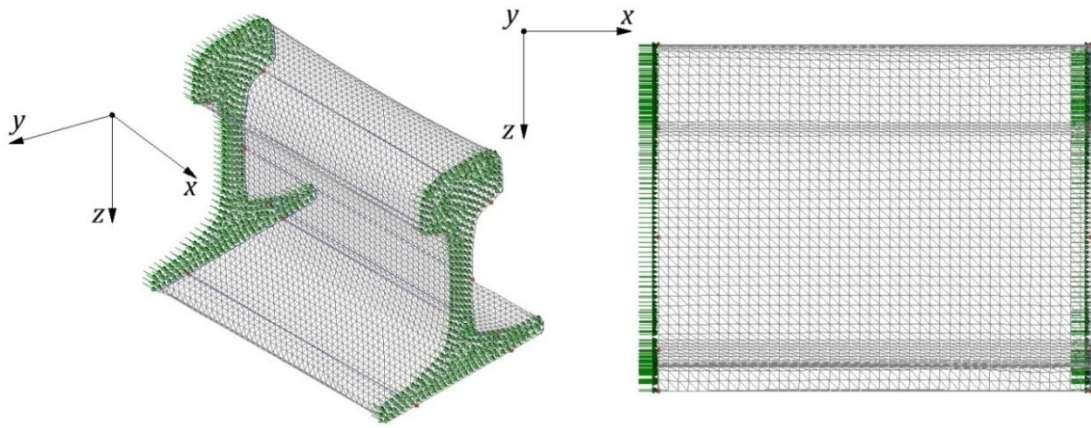
Slika 5.3 Prikaz numeričkog modela za analizu temperaturnih uticaja u šini i njegove karakteristike [10]

Uticaji od temperature na numeričkom modelu zadati su kao površinsko opterećenje po omotaču. Kao što je prikazano na slici 5.3 omotač je podeljen na 9 površina, gde je svaka površina ograničena sa 4 ugaona čvora na čijim pozicijama su se tokom eksperimentalnih merenja nalazili temperaturni senzori (T1-T18) [10]:

- površina 1: T1-T2-T11-T10,
- površina 2: T2-T3-T12-T11,
- površina 3: T3-T4-T13-T12,
- površina 4: T4-T5-T14-T13,
- površina 5: T5-T6-T15-T14,
- površina 6: T6-T7-T16-T15,
- površina 7: T7-T8-T17-T16,
- površina 8: T8-T9-T18-T17,
- površina 9: T9-T1-T10-T18.

Uticaji od temperature na svakoj od navedenih površina omotača zadati su tako da temperature u ugaonim čvorovima odgovaraju izmerenim površinskim temperaturama šine tokom vremena u odgovarajućim temperaturnim sensorima (T1-T18, slike 4.12 i 4.13). U ostalim čvorovima duž posmatrane konture (prave ili krive linije između susednih ugaonih čvorova) pretpostavljena je linearna promena temperature (linearna interpolacija). Zadavanjem temperatura po konturama površina definiše se domen temperatura svake površine omotača [10].

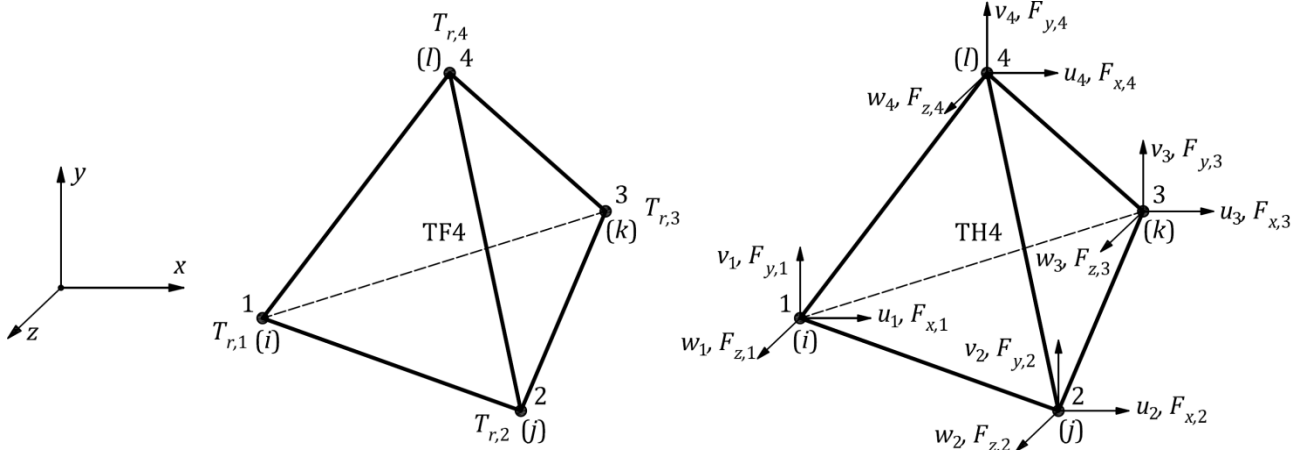
Granični uslovi u numeričkom modelu usvojeni su prema razvijenoj metodologiji. Kako bi se odredili podužni temperaturni naponi, kao i poprečne i vertikalne temperaturne dilatacije sprečena su podužna pomeranja u x pravcu oba poprečna preseka (poprečni presek uz prag i srednji poprečni presek između pragova) (slika 5.4) [10].



Slika 5.4 Granični uslovi u numeričkom modelu za proračun podužnih temperaturnih napona, poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija

5.2.1 Konačni elementi primenjeni u numeričkom modelu

Numerički model za analizu temperaturnih uticaja u šini formiran je korišćenjem tetraedarskog oblika konačnih elemenata (slika 5.5). U nastavku će biti prikazana dva tipa konačnih elemenata i to: konačni element sa oznakom TF4 koji se koristi za termičku analizu šine, i konačni element sa oznakom TH4 koji se koristi za naponsko-deformacijsku analizu šine [105].



Slika 5.5 Tetraedarski konačni elementi TF4 i TH4 sa stepenima slobode u lokalnom koordinatnom sistemu [101], [106]

U slučaju konačnog elementa TF4 koji se koristi za termičku analizu šine, temperaturno polje elementa određuje se na osnovu jednačine (slika 5.5) [101]:

$$T_r = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z \quad (5.35)$$

Konstante ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) mogu se zameniti odgovarajućim interpolacionim funkcijama (N_1, N_2, N_3, N_4) čime prethodna jednačina dobija sledeći oblik [101]:

$$T_r = N_1 \cdot T_{r,1} + N_2 \cdot T_{r,2} + N_3 \cdot T_{r,3} + N_4 \cdot T_{r,4} \quad (5.36)$$

Matrica interpolacionih funkcija (\mathbf{N}) definisana je kao [101]:

$$\mathbf{N} = [N_1, N_2, N_3, N_4] \quad (5.37)$$

gde je:

$$N_i = \frac{1}{6 \cdot V} \cdot (a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y + d_i \cdot z), i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.38)$$

Zapremina tetraedarskog konačnog elementa (V) određuje se iz poznatih koordinata čvorova elementa, korišćenjem jednačine [101]:

$$6 \cdot V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Takođe, izvodi interpolacionih funkcija određuju se na osnovu sledećih izraza [101]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial x} = \frac{b_1}{6 \cdot V} \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial y} = \frac{c_1}{6 \cdot V} \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial z} = \frac{d_1}{6 \cdot V} \quad (5.42)$$

U skladu sa prethodnim, matrica izvoda interpolacionih funkcija (\mathbf{B}) definiše se kao [101]:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{6 \cdot V} \cdot \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

gde je:

$$a_1 = \det \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

$$b_1 = -\det \begin{bmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$c_1 = -\det \begin{bmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

$$d_1 = -\det \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

Ostali članovi matrice izvoda interpolacionih funkcija određuju se korišćenjem ciklične permutacije. S obzirom da se članovi a_i u proračunima zanemaruju, u nastavku su prikazani odgovarajući uslovi za određivanje članova b_i , c_i i d_i [101]:

uslovi b :

$$b_1 = -(y_2 - y_4) \cdot (z_3 - z_4) + (y_3 - y_4) \cdot (z_2 - z_4) \quad (5.48)$$

$$b_2 = -(y_3 - y_4) \cdot (z_1 - z_4) + (y_1 - y_4) \cdot (z_3 - z_4) \quad (5.49)$$

$$b_3 = -(y_1 - y_4) \cdot (z_2 - z_4) + (y_1 - y_4) \cdot (z_1 - z_4) \quad (5.50)$$

$$b_4 = -(b_1 + b_2 + b_3) \quad (5.51)$$

uslovi c:

$$c_1 = -(x_3 - x_4) \cdot (z_2 - z_4) + (x_2 - x_4) \cdot (z_3 - z_4) \quad (5.52)$$

$$c_2 = -(x_1 - x_4) \cdot (z_3 - z_4) + (x_3 - x_4) \cdot (z_1 - z_4) \quad (5.53)$$

$$c_3 = -(x_2 - x_4) \cdot (z_1 - z_4) + (x_1 - x_4) \cdot (z_2 - z_4) \quad (5.54)$$

$$c_4 = -(c_1 + c_2 + c_3) \quad (5.55)$$

uslovi d:

$$d_1 = -(x_2 - x_4) \cdot (y_3 - y_4) + (x_3 - x_4) \cdot (y_2 - y_4) \quad (5.56)$$

$$d_2 = -(x_3 - x_4) \cdot (y_1 - y_4) + (x_1 - x_4) \cdot (y_3 - y_4) \quad (5.57)$$

$$d_3 = -(x_1 - x_4) \cdot (y_2 - y_4) + (x_2 - x_4) \cdot (y_1 - y_4) \quad (5.58)$$

$$d_4 = -(d_1 + d_2 + d_3) \quad (5.59)$$

Sa druge strane, u slučaju konačnog elementa TH4 koji se koristi za naponsko-deformacijsku analizu šine, vektor pomeranja elementa (\mathbf{u}) određuje se na osnovu jednačine (slika 5.5) [106]:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_1 \cdot u_1 + N_2 \cdot u_2 + N_3 \cdot u_3 + N_4 \cdot u_4 \\ N_1 \cdot v_1 + N_2 \cdot v_2 + N_3 \cdot v_3 + N_4 \cdot v_4 \\ N_1 \cdot w_1 + N_2 \cdot w_2 + N_3 \cdot w_3 + N_4 \cdot w_4 \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{N}_i \cdot \mathbf{a}_i = \mathbf{N} \cdot \mathbf{a} \quad (5.60)$$

gde je:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \mathbf{N}_3, \mathbf{N}_4] \quad (5.61)$$

$$\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.62)$$

\mathbf{a} - vektor čvornih pomeranja elementa,

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{a}_3 \\ \mathbf{a}_4 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.64)$$

Razmatranjem pomeranja elementa u (u x pravcu) uspostavlja se sledeća jednačina [106]:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z \quad (5.65)$$

Konstante ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) mogu se odrediti na osnovu sledećih izraza formulisanih za svaki čvor elementa [106]:

$$u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_1 + \alpha_3 \cdot y_1 + \alpha_4 \cdot z_1 \quad (5.66)$$

$$u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_2 + \alpha_3 \cdot y_2 + \alpha_4 \cdot z_2 \quad (5.67)$$

$$u_3 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_3 + \alpha_3 \cdot y_3 + \alpha_4 \cdot z_3 \quad (5.68)$$

$$u_4 = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x_4 + \alpha_3 \cdot y_4 + \alpha_4 \cdot z_4 \quad (5.69)$$

U konačnom obliku pomeranje elementa u (u x pravcu) određuje se na osnovu sledeće jednačine [106]:

$$u = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{6 \cdot V} \cdot (a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y + d_i \cdot z) \cdot u_i \quad (5.70)$$

Takođe, interpolacione funkcije određuju se na osnovu izraza koji su isti kao kod konačnog elementa TF4 [106]:

$$N_i = \frac{1}{6 \cdot V} \cdot (a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y + d_i \cdot z), i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.71)$$

gde je:

$$a_1 = \det \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

$$b_1 = -\det \begin{bmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.73)$$

$$c_1 = -\det \begin{bmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{bmatrix} \quad (5.74)$$

$$d_1 = -\det \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.75)$$

Polje deformacija elementa definisano je sa šest standardnih komponenti vektora deformacija elementa (ϵ) [106]:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (5.76)$$

gde je:

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ - dilatacije,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5.77)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.78)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5.79)$$

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ - klizanja,

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5.80)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (5.81)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.82)$$

Poznavanjem matrice izvoda interpolacionih funkcija (**B**), kao i vektora čvornih pomeranja elementa (**a**) može se odrediti vektor deformacija elementa (**ε**) [106]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{i=1}^4 \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot u_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot v_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot w_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot u_i + \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot v_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot u_i + \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot w_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot v_i + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot w_i \end{array} \right\} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{a}_i = \mathbf{B} \cdot \mathbf{a} \quad (5.83)$$

gde je:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3, \mathbf{B}_4] \quad (5.84)$$

$$\mathbf{B}_i = \frac{1}{6 \cdot V} \cdot \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & d_i \\ c_i & b_i & 0 \\ d_i & 0 & b_i \\ 0 & d_i & c_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.85)$$

Veza između napona i deformacija, uzimajući u obzir i početne dilatacije usled temperaturne promene, može se formulisati u matičnom obliku [106]:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^0) \quad (5.86)$$

gde je:

D - konstitutivna matrica za izotropan materijal,

$$\mathbf{D} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2 \cdot (1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2 \cdot (1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2 \cdot (1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (5.87)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}^0$ - vektor početnih dilatacija usled temperaturne promene,

$$\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \alpha \cdot (\Delta T) \cdot [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T \quad (5.88)$$

Polje napona elementa definisano je takođe sa šest standardnih komponenti vektora napona ($\boldsymbol{\sigma}$) [106]:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (5.89)$$

gde je:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - normalni naponi,
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ - smičući naponi.

Primenom principa virtuelnog rada na konačnom elementu dobija se jednačina ravnoteže elementa [106]:

$$\iiint_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot dV = \delta \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{q} \quad (5.90)$$

gde je:

\mathbf{q} - vektor čvornih sila elementa,

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_4 \end{Bmatrix} \quad (5.91)$$

$$\mathbf{q}_i = \begin{Bmatrix} F_{x,i} \\ F_{y,i} \\ F_{z,i} \end{Bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.92)$$

$\delta \mathbf{a}$ - vektor virtuelnih čvornih pomeranja elementa,

$$\delta \mathbf{a} = \begin{Bmatrix} \delta \mathbf{a}_1 \\ \delta \mathbf{a}_2 \\ \delta \mathbf{a}_3 \\ \delta \mathbf{a}_4 \end{Bmatrix} \quad (5.93)$$

$$\delta \mathbf{a}_i = \begin{Bmatrix} \delta u_i \\ \delta v_i \\ \delta w_i \end{Bmatrix}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.94)$$

Virtuelno polje pomeranja elementa ($\delta \mathbf{u}$), kao i virtuelne deformacije elementa ($\delta \boldsymbol{\varepsilon}$) mogu se izraziti preko virtuelnih čvornih pomeranja elementa ($\delta \mathbf{a}$) [106]:

$$\delta \mathbf{u} = \mathbf{N} \cdot \delta \mathbf{a} \quad (5.95)$$

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{a} \quad (5.96)$$

U skladu sa prethodnim, jednačina ravnoteže elementa može se predstaviti u standardnom matičnom obliku na sledeći način [106]:

$$\left(\iiint_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot dV \right) \cdot \mathbf{a} - \iiint_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^0 \cdot dV = \mathbf{q} \quad (5.97)$$

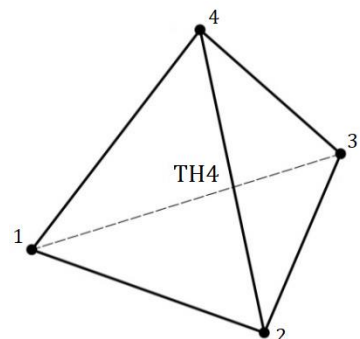
tj.

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{a} - \mathbf{f}_f = \mathbf{q} \quad (5.98)$$

Matrica krutosti elementa (\mathbf{K}) određuje se na osnovu sledećeg izraza [106]:

$$\mathbf{K} = \iiint_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot dV \quad (5.99)$$

Na slici 5.6 za konačni element TH4 sa izotropnim materijalnim karakteristikama, u eksplicitnom obliku prikazana je matrica krutosti (\mathbf{K}), kao i njeni elementi (\mathbf{K}_{ij}) [106].



$$\mathbf{a}_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \mathbf{K}_{13} & \mathbf{K}_{14} \\ & \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & \mathbf{K}_{24} \\ & & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ \text{Simetrično} & & & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{ij} = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} (d_{11} b_i b_j + d_{44} c_i c_j + d_{55} d_i d_j) & (d_{12} b_i c_j + d_{44} c_i b_j) & (d_{13} b_i d_j + d_{55} d_i b_j) \\ (d_{21} c_i b_j + d_{44} b_i c_j) & (d_{22} c_i c_j + d_{44} b_i b_j + d_{66} d_i d_j) & (d_{23} c_i d_j + d_{66} d_i c_j) \\ (d_{31} d_i b_j + d_{55} b_i d_j) & (d_{32} d_i c_j + d_{66} c_i d_j) & (d_{33} d_i d_j + d_{55} b_i b_j + d_{66} c_i c_j) \end{bmatrix}$$

d_{ij} - elementi konstitutivne matrice \mathbf{D} b_i, c_i, d_i - parametri interpolacione funkcije N_i

Slika 5.6 Matrica krutosti za tetraedarski konačni element TH4 [106]

Vektor ekvivalentnih čvornih sila (\mathbf{f}_f) određuje se u skladu sa izrazom [106]:

$$\mathbf{f}_f = \iiint_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^0 \cdot dV = \mathbf{f}_\varepsilon \quad (5.100)$$

gde je:

\mathbf{f}_ε - vektor sila usled početnih dilatacija,

$$\mathbf{f}_\varepsilon = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_{\varepsilon_1} \\ \mathbf{f}_{\varepsilon_2} \\ \mathbf{f}_{\varepsilon_3} \\ \mathbf{f}_{\varepsilon_4} \end{Bmatrix} \quad (5.101)$$

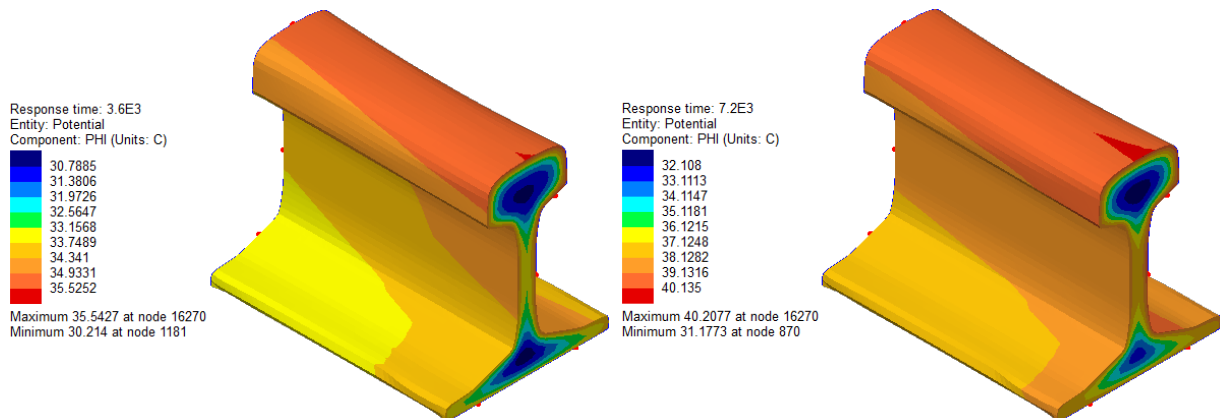
Za početne dilatacije usled temperaturne promene u slučaju izotropnog materijala važi sledeća jednačina [106]:

$$\mathbf{f}_{\varepsilon_i} = \frac{E \cdot \alpha \cdot (\Delta T)}{6 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \cdot [b_i, c_i, d_i, 0, 0, 0]^T, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5.102)$$

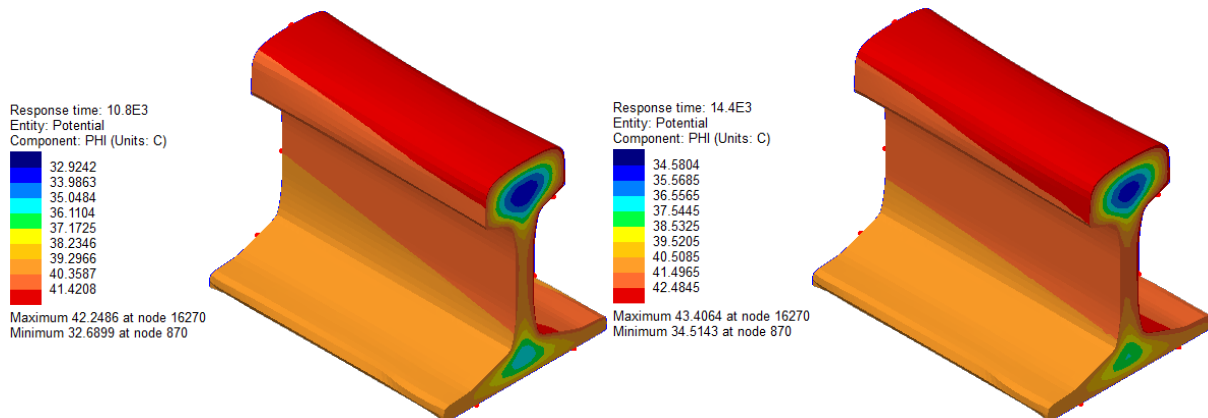
5.3 Rezultati numeričke analize

Raspodela temperatura (T_r) u šini na osnovu izmerenih površinskih temperatura šine i sprovedene spregnute nestacionarne termičko-naponske analize prikazana je na slikama 5.7-5.11 za svaki sat vremena u periodu od 09:00 h do 18:00 h [10].

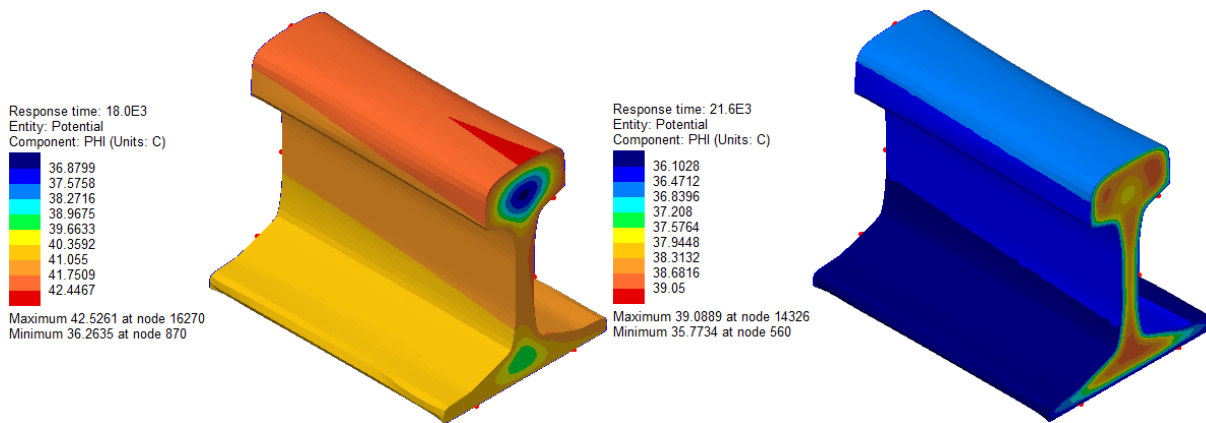
Raspodela temperaturnih napona (σ_T) u kontinualno zavarenoj šini na osnovu sprovedene spregnute nestacionarne termičko-naponske analize, određenog temperaturnog polja šine i usvojene konstantne vrednosti neutralne temperature od $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ prikazana je na slikama 5.12-5.16 za svaki sat vremena od 09:00 h do 18:00 h [10].



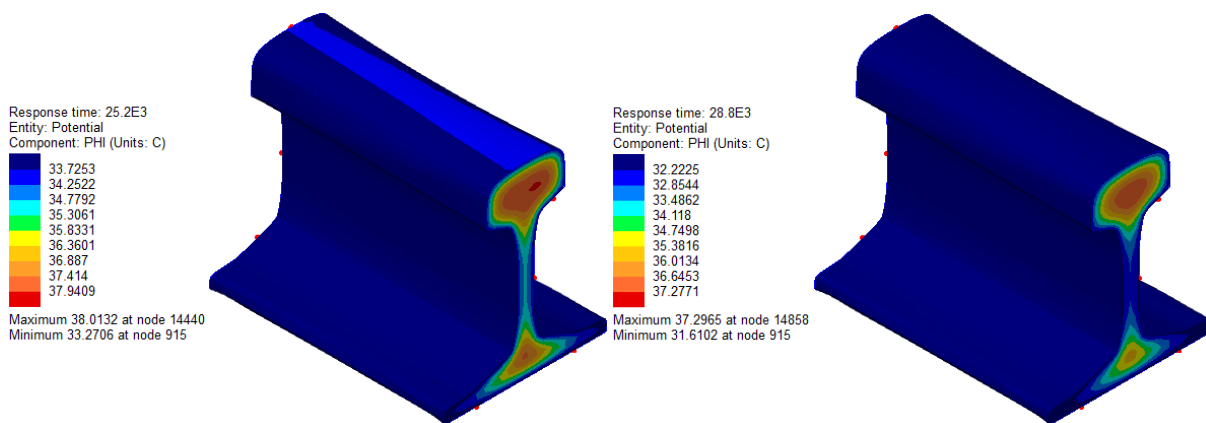
Slika 5.7 Raspodela temperatura u 09:00 h (levo) i 10:00 h (desno) [10]



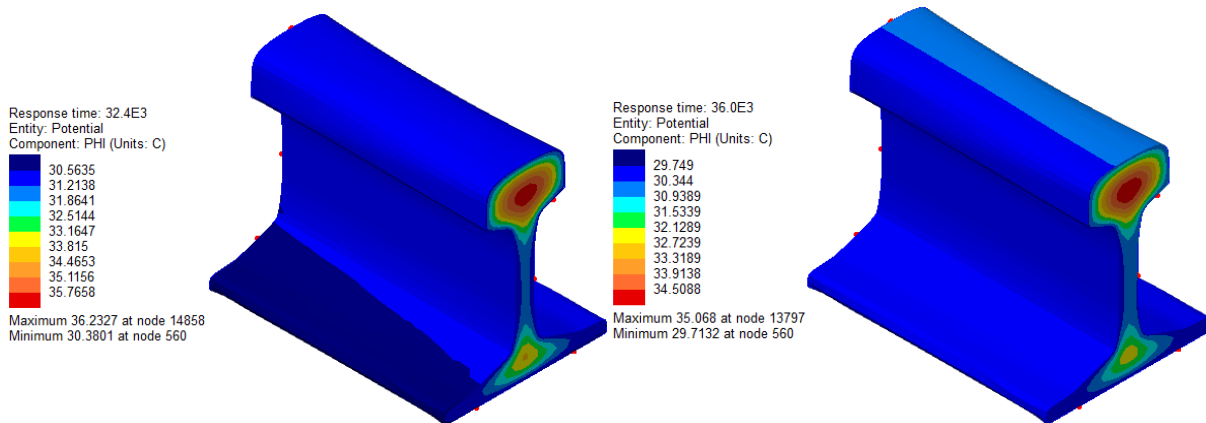
Slika 5.8 Raspodela temperatura u 11:00 h (levo) i 12:00 h (desno) [10]



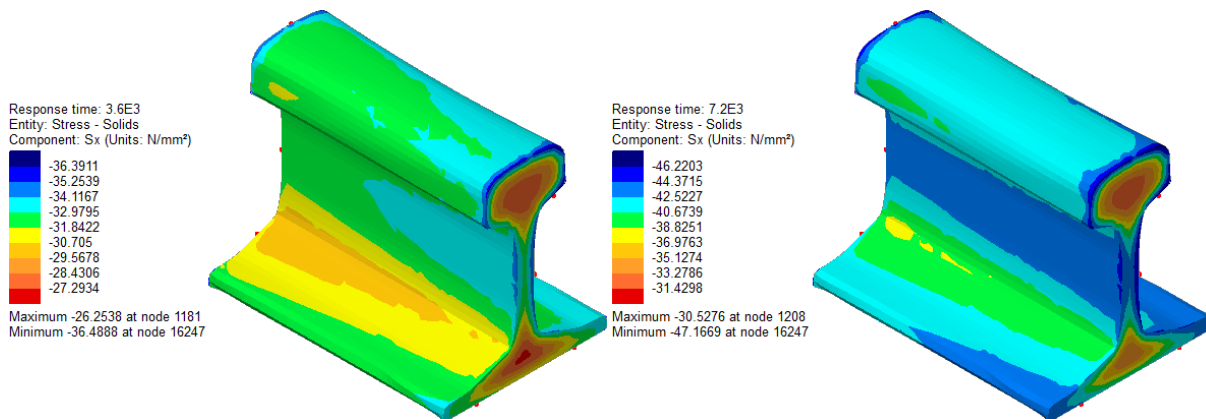
Slika 5.9 Raspodela temperatura u 13:00 h (levo) i 14:00 h (desno) [10]



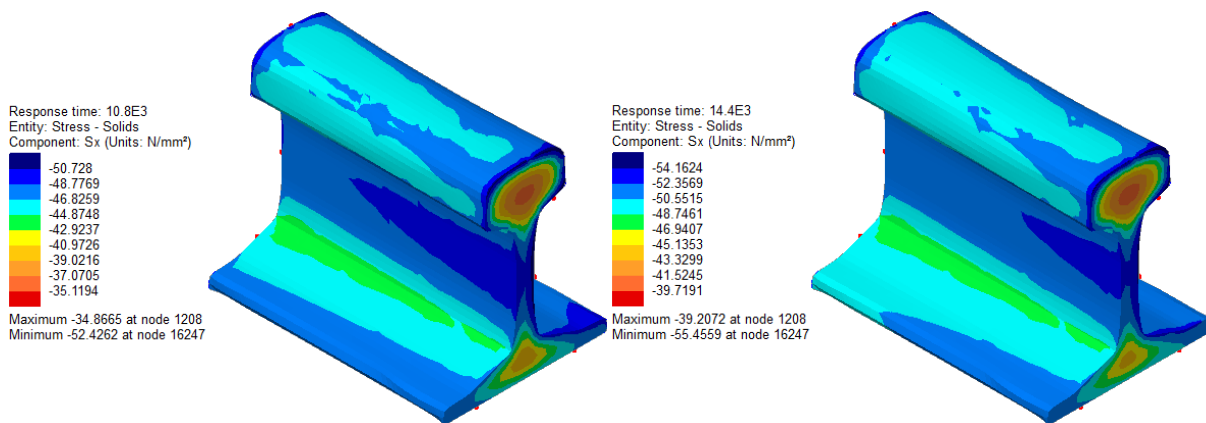
Slika 5.10 Raspodela temperatura u 15:00 h (levo) i 16:00 h (desno) [10]



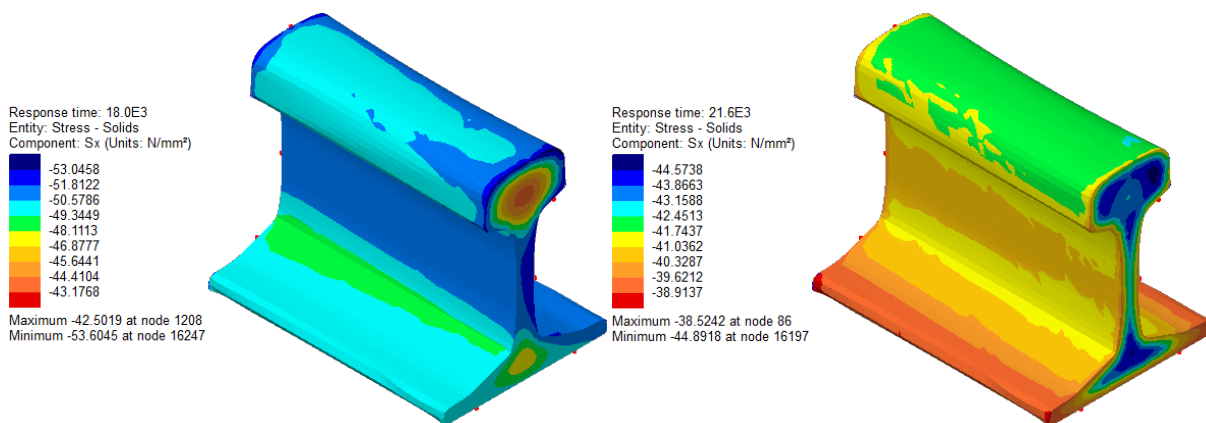
Slika 5.11 Raspodela temperatura u 17:00 h (levo) i 18:00 h (desno) [10]



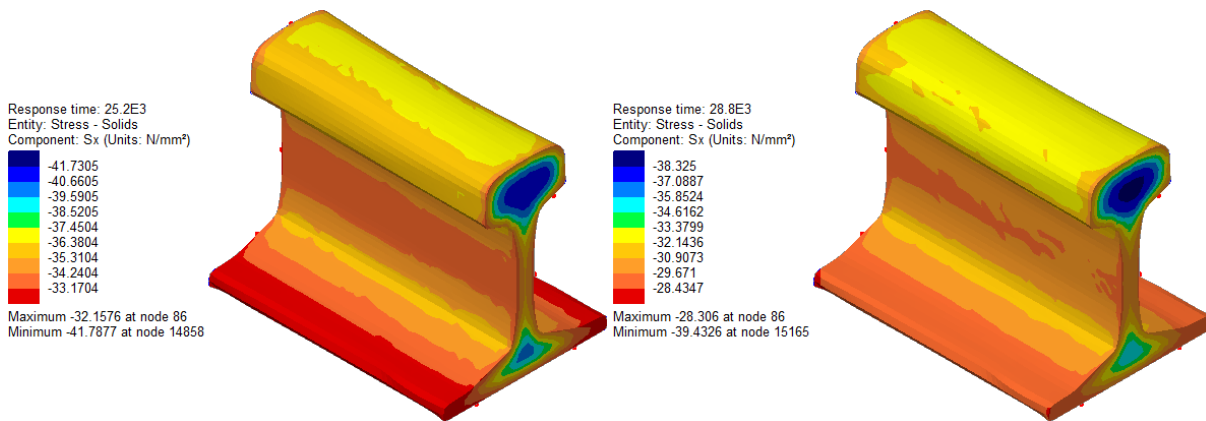
Slika 5.12 Raspodela temperaturnih napona u 09:00 h (levo) i 10:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [10]



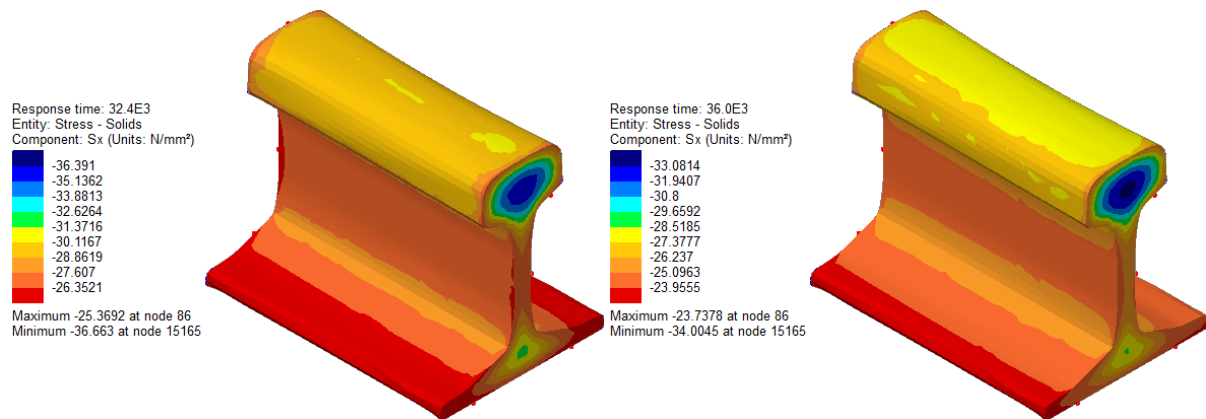
Slika 5.13 Raspodela temperaturnih napona u 11:00 h (levo) i 12:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]



Slika 5.14 Raspodela temperaturnih napona u 13:00 h (levo) i 14:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]

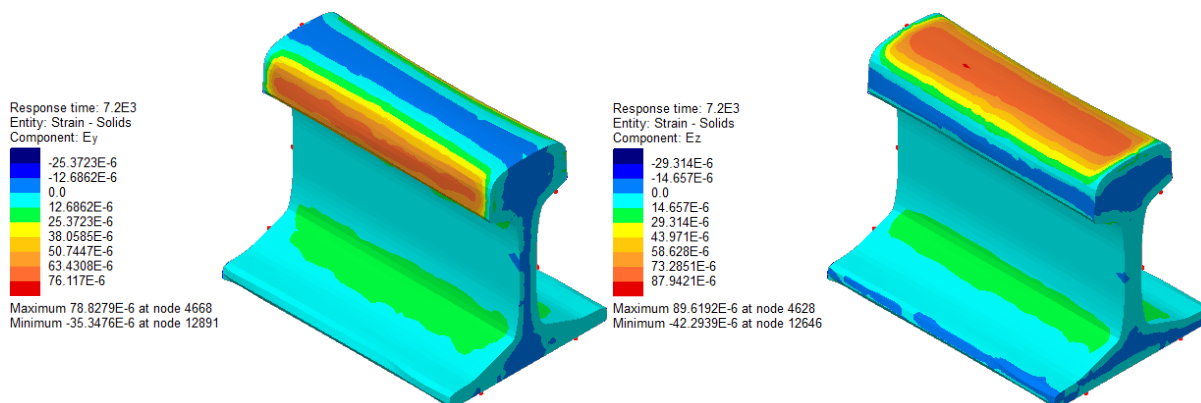


Slika 5.15 Raspodela temperaturnih napona u 15:00 h (levo) i 16:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]



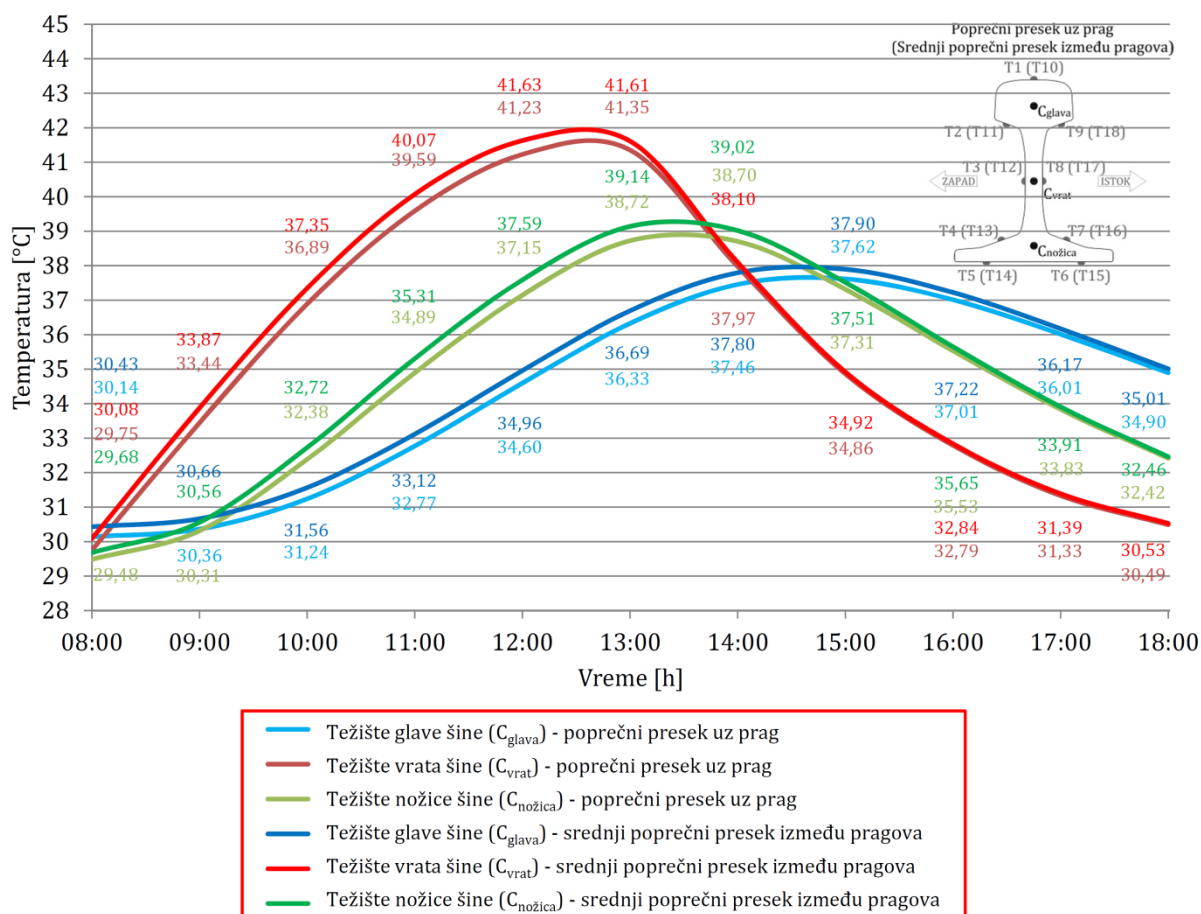
Slika 5.16 Raspodela temperaturnih napona u 17:00 h (levo) i 18:00 h (desno) za $T_n = 20\text{ °C}$ [10]

Maksimalni priraštaji poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija (ϵ_{Ty} i ϵ_{Tz}) u kontinualno zavarenoj šini na osnovu sprovedene spregnute nestacionarne termičko-naponske analize i određenog temperaturnog polja šine prikazani su na slici 5.17 za vremenski period od 09:00 h do 10:00 h kada su priraštaji dilatacija bili najveći [10].



Slika 5.17 Maksimalni priraštaji poprečnih (levo) i vertikalnih (desno) temperaturnih dilatacija u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10]

U nastavku su prikazani rezultati termičko-naponske analize i temperatura u težištima glave, vrata i nožice šine (slika 5.18). Dobijeni rezultati pokazuju da su [10]:

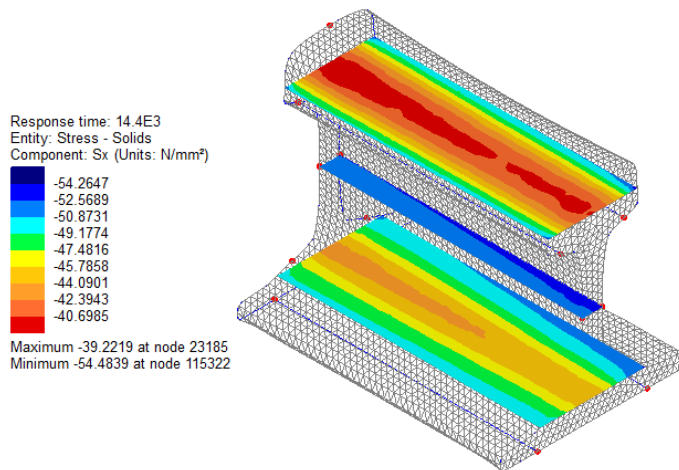


Slika 5.18 Vrednosti temperatura u težištima glave, vrata i nožice šine [10]

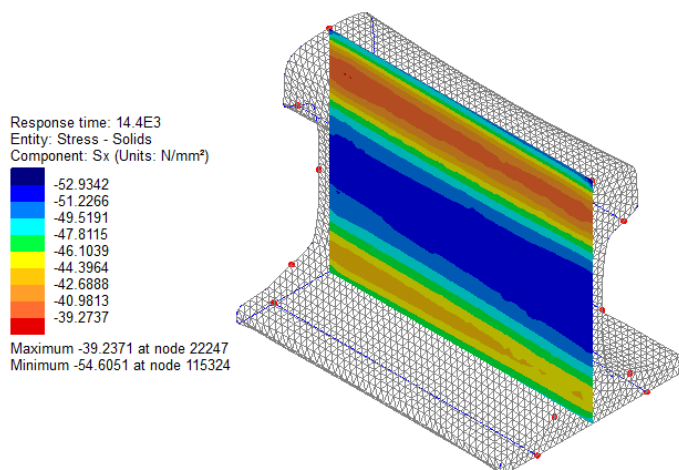
- temperature u težištima glave, vrata i nožice šine više u srednjem poprečnom preseku između pragova od onih u poprečnom preseku uz prag,
- razlike temperatura srednjeg poprečnog preseka između pragova i poprečnog preseka uz prag u težištima glave, vrata i nožice šine više kada temperatura raste, tj. niže kada temperatura opada, dostižući skoro nulu na kraju dana,

- maksimalne razlike temperatura šine srednjeg preseka između pragova i poprečnog preseka uz prag cca. 0,5 °C u težištu vrata šine, cca. 0,4 °C u težište nožice šine, i cca. 0,3 °C u težištu glave šine.

Takođe, na slikama 5.19 i 5.20 prikazani su temperaturni naponi unutar kontinualno zavarene šine u 12:00 h, kada vrednosti napona dostižu maksimalnu vrednost za neutralnu temperaturu $T_n = 20$ °C. Dobijeni rezultati pokazuju da su temperaturni naponi [10]:



Slika 5.19 Temperaturni naponi u horizontalnim presecima šine u 12:00 h za $T_n = 20$ °C [10]



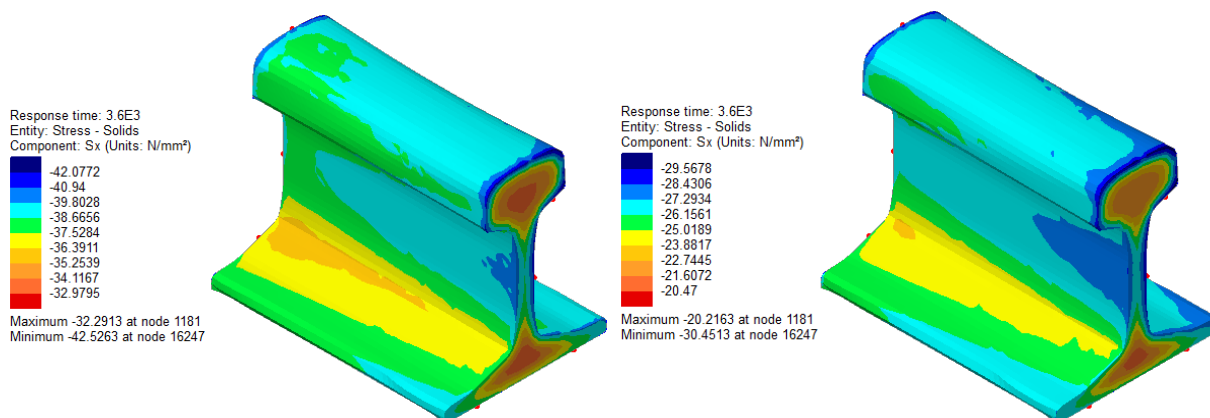
Slika 5.20 Temperaturni naponi u vertikalnom preseku šine u 12:00 h za $T_n = 20$ °C [10]

- najviši u vratu šine, a najniži u glavi šine (što odgovara zapreminskoj raspodeli temperature unutar šine),
- promenljivi duž koloseka zbog neravnomerne raspodele površinskih temperatura šine, kao i temperature unutar šine,
- promenljivi zbog efekata smanjenja temperature šine u zoni pragova, i u nožici šine duž koloseka,
- viši na površini nego unutar šine kada temperatura raste i viši unutar šine nego na površini kada temperatura opada.

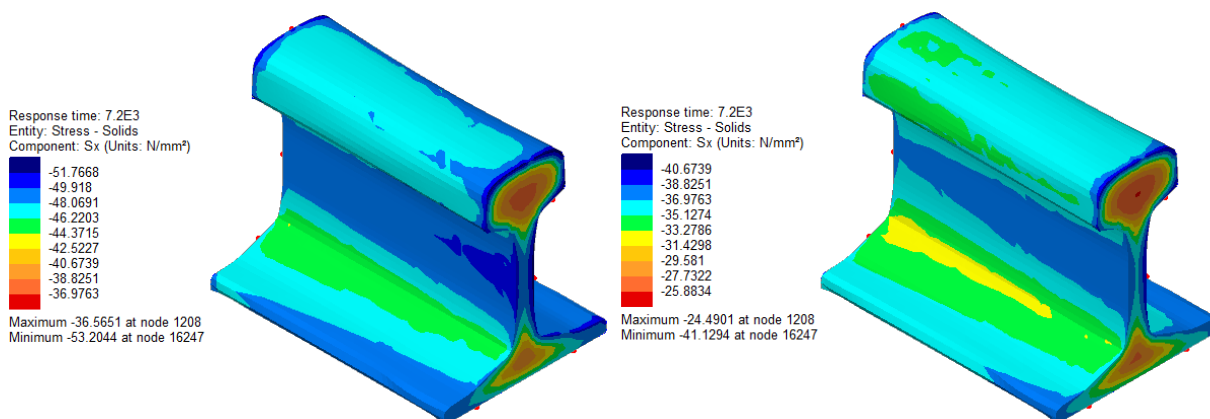
U skladu sa [10] vrednost neutralne temperature značajno utiče na vrednosti temperaturnih napona u kontinualno zavarenoj šini. Upravljač železničke infrastrukture mora da definiše vrednost neutralne temperature prema klimatskim uslovima [65] i strategiji održavanja [19]. U praksi, konstantna vrednost propisane neutralne temperature se postiže korišćenjem hidrauličkog tenzora šine u skladu sa [107]. Na železničkim prugama u eksploataciji, neutralna temperatura može imati promenljivu vrednost zbog pomeranja koloseka sa kontinualno zavarenim šinama. U istraživanju [108] navedeno je da, teoretski, ako bi kolosek

sa kontinualno zavarenim šinama bio apsolutno nepomerljiv, ne bi bilo promena neutralne temperature. Metode za određivanje neutralne temperature u kolosecima u eksploataciji predstavljene su u istraživanjima [109], [110], [111], [112], [113].

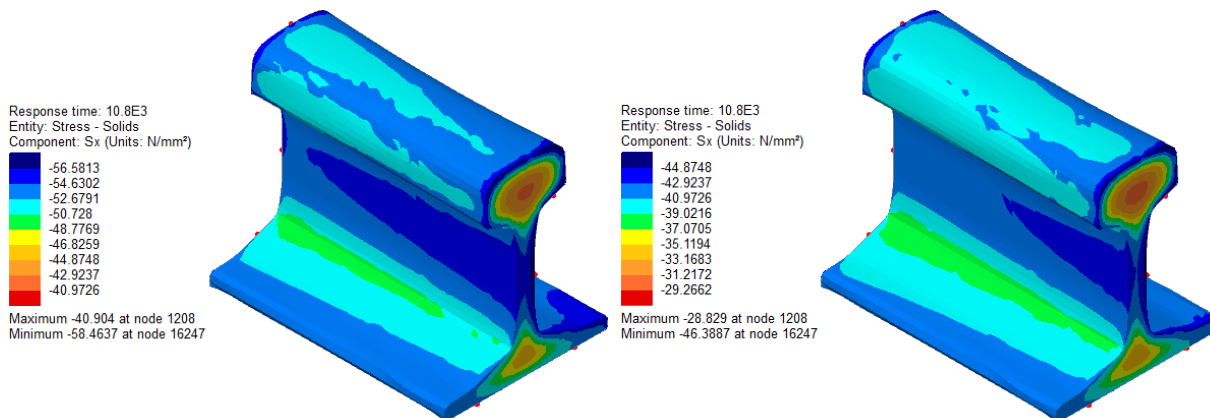
Kako bi se sagledala promena temperaturnih napona u zavisnosti od vrednosti neutralne temperature u nastavku je prikazana raspodela temperaturnih napona (σ_T) u kontinualno zavarenoj šini na osnovu sprovedene spregnute nestacionarne termičko-naponske analize, određenog temperaturnog polja šine (T_r) i usvojenih konstantnih vrednosti neutralne temperature od $T_n = 17,5$ °C i $T_n = 22,5$ °C. Dobijeni rezultati prikazani su za svaki sat vremena od 09:00 h do 18:00 h za neutralne temperature od $T_n = 17,5$ °C i $T_n = 22,5$ °C (slike 5.21-5.30).



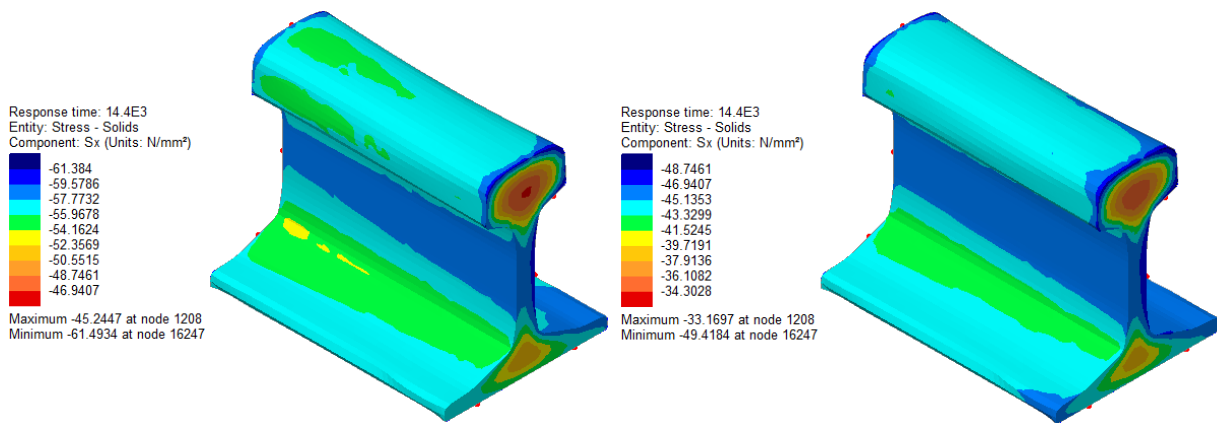
Slika 5.21 Raspodela temperaturnih napona u 09:00 h za $T_n = 17,5$ °C (levo) i $T_n = 22,5$ °C (desno)



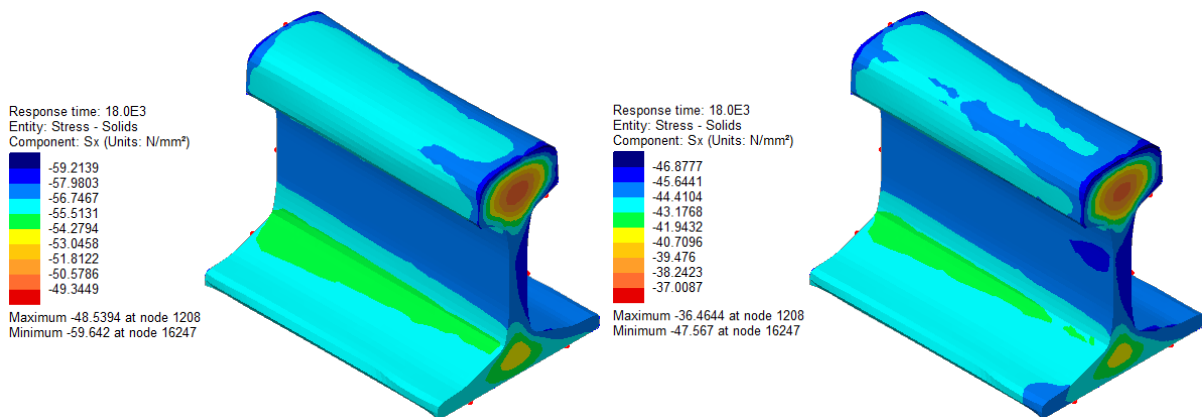
Slika 5.22 Raspodela temperaturnih napona u 10:00 h za $T_n = 17,5$ °C (levo) i $T_n = 22,5$ °C (desno)



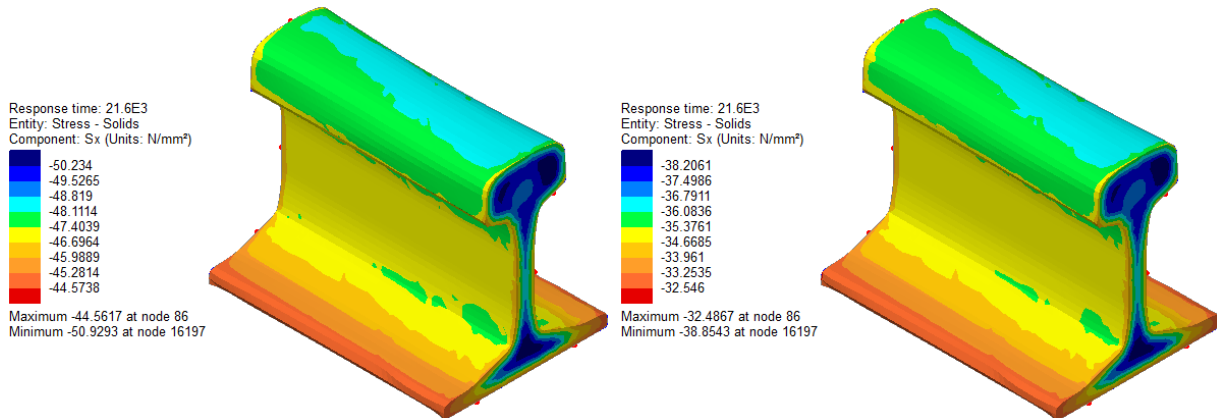
Slika 5.23 Raspodela temperaturnih napona u 11:00 h za $T_n = 17,5$ °C (levo) i $T_n = 22,5$ °C (desno)



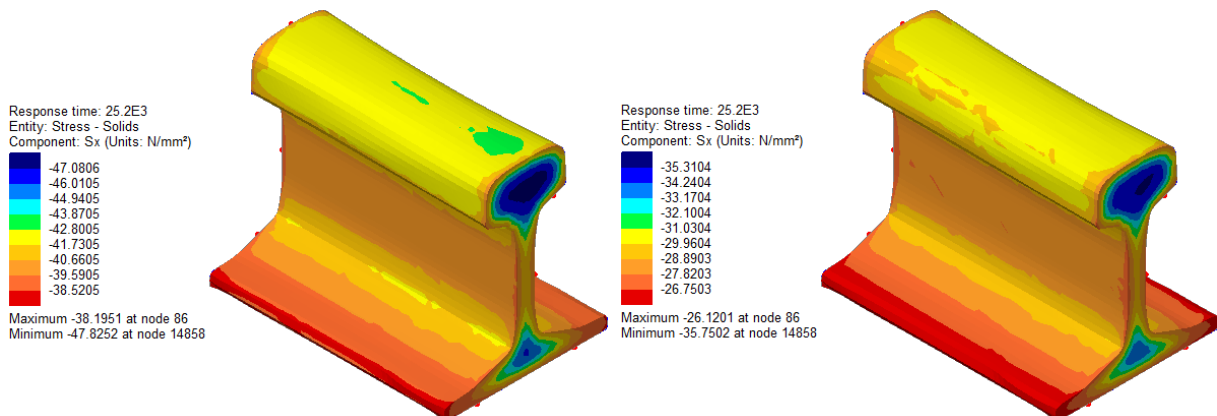
Slika 5.24 Raspodela temperaturnih napona u 12:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)



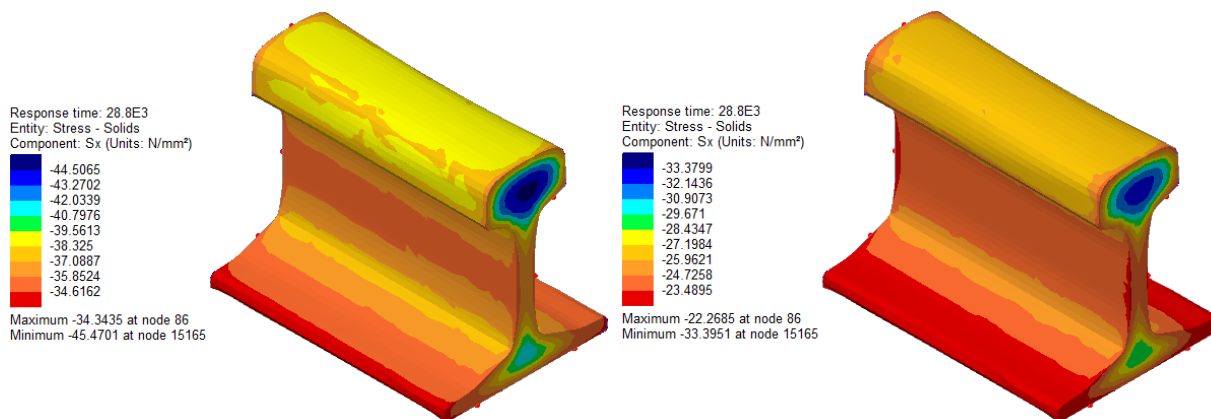
Slika 5.25 Raspodela temperaturnih napona u 13:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)



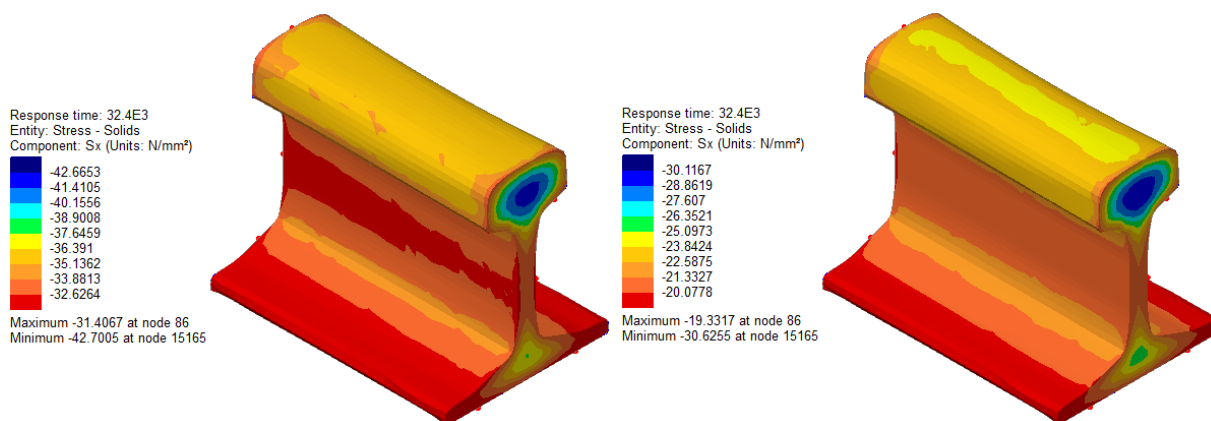
Slika 5.26 Raspodela temperaturnih napona u 14:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)



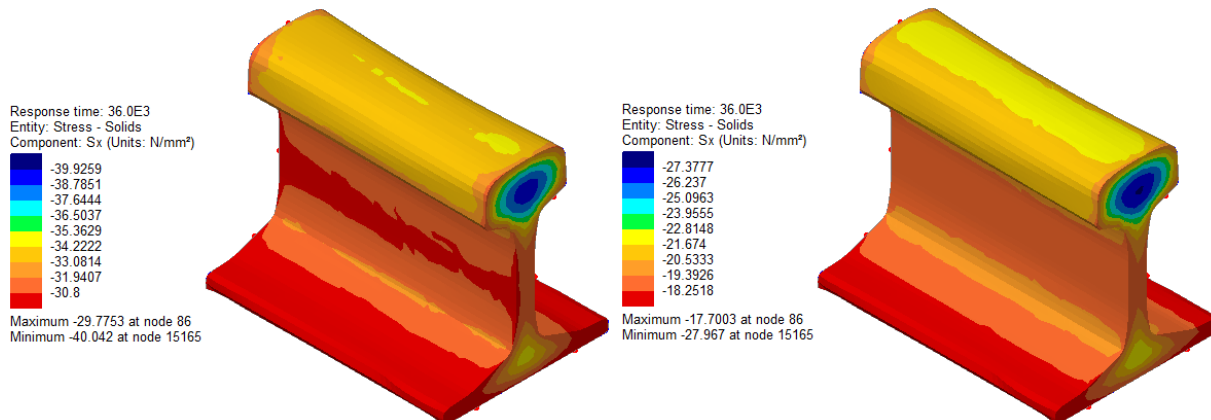
Slika 5.27 Raspodela temperaturnih napona u 15:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)



Slika 5.28 Raspodela temperaturnih napona u 16:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)

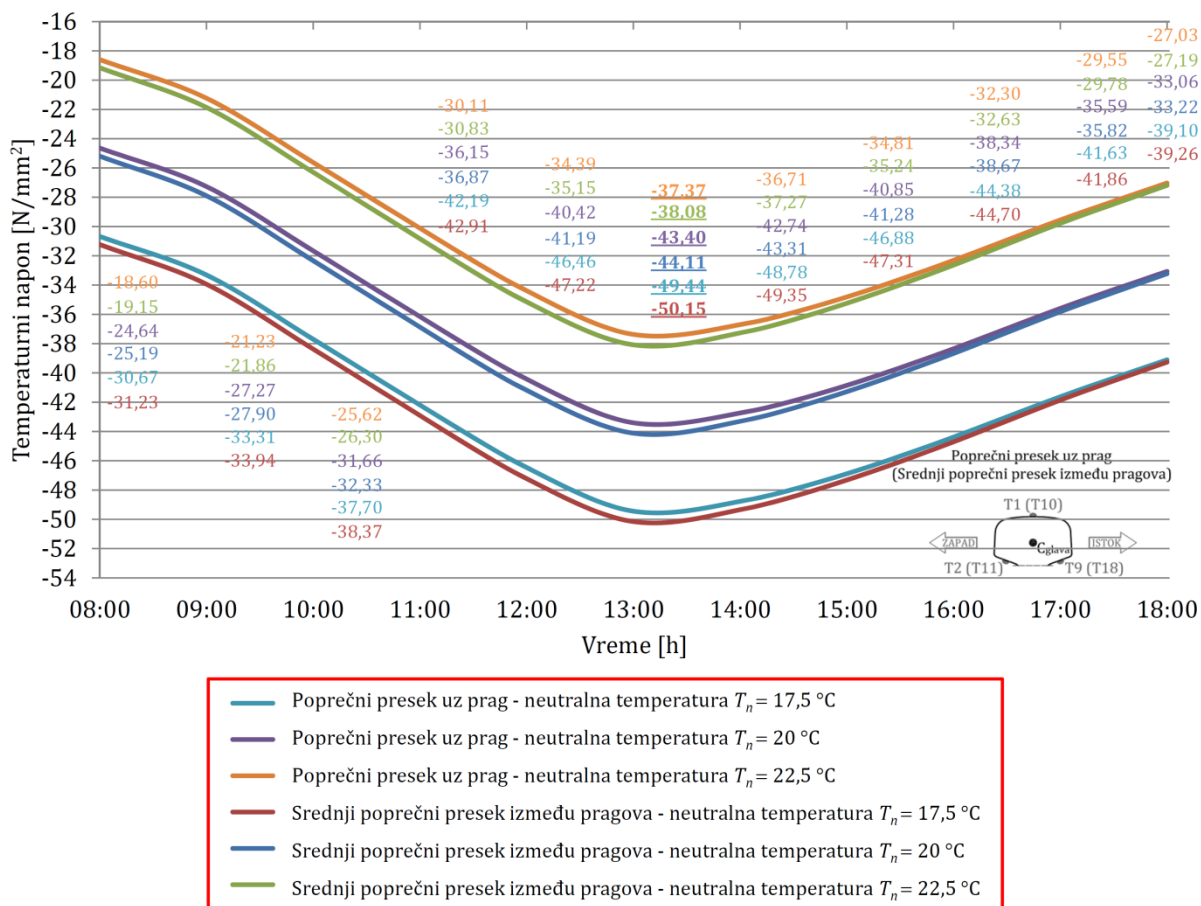


Slika 5.29 Raspodela temperaturnih napona u 17:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)

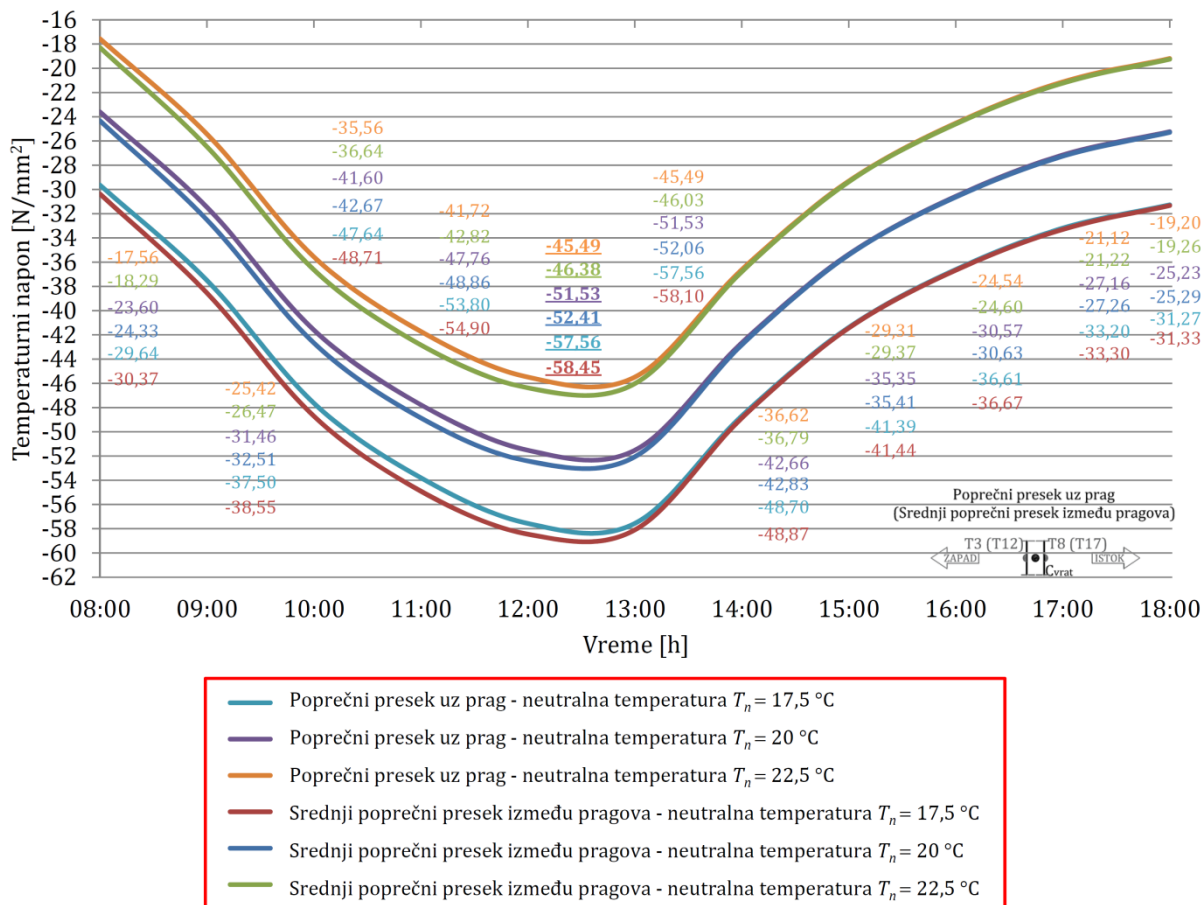


Slika 5.30 Raspodela temperaturnih napona u 18:00 h za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (levo) i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (desno)

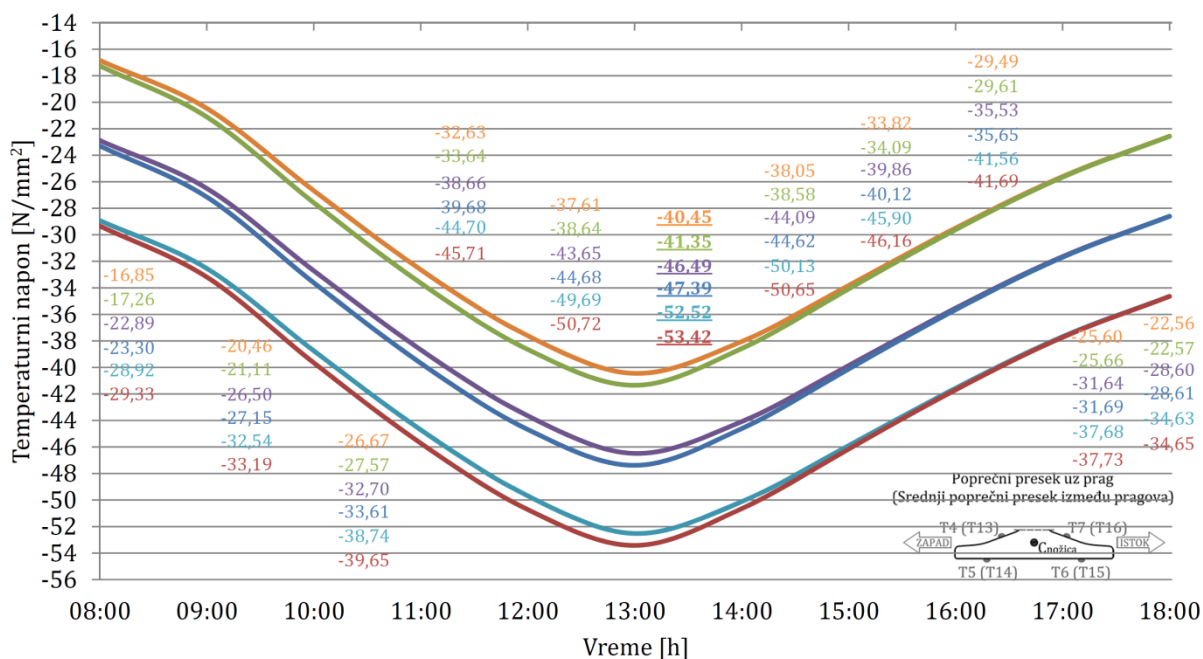
Na slikama 5.31, 5.32 i 5.33 prikazane su vrednosti temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine u poprečnom preseku uz prag, kao i srednjem poprečnom preseku između pragova za usvojene konstantne vrednosti neutralne temperature od $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Na osnovu dobijenih rezultata može se videti da su vrednosti temperaturnih napona međusobno linearno translirane u zavisnosti od vrednosti neutralne temperature. Apsolutno najveći temperaturni naponi pritiska javljaju se pri najnižoj vrednosti neutralne temperature od $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$, dok se apsolutno najmanji temperaturni naponi pritiska javljaju pri najvišoj vrednosti neutralne temperature od $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Takođe, zapaža se da su rastojanja između krivih temperaturnih napona u istom poprečnom preseku pri različitim vrednostima neutralne temperature od $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ jednaka, što odgovara jednakom koraku pri povećanju/smanjenju neutralne temperature od $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 5.31 Vrednosti temperaturnih napona u težištu glave šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$



Slika 5.32 Vrednosti temperaturnih napona u težištu vrata šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$



Slika 5.33 Vrednosti temperaturnih napona u težištu nožice šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$

U tabelama 5.1, 5.2 i 5.3 prikazane su maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine usled promene neutralne temperature sa $T_n = 20\text{ °C}$ na $T_n = 17,5\text{ °C}$, odnosno na $T_n = 22,5\text{ °C}$. Povećanje/smanjenje temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine od $\pm 6,04\text{ N/mm}^2$ u oba slučaja odgovara temperaturnoj promeni od $\pm 2,5\text{ °C}$.

Tabela 5.1 Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu glave šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$

Neutralna temperatura [°C]	Temperaturni naponi (težište glave) [N/mm ²]		Povećanje/smanjenje napona u odnosu na $T_n = 20\text{ °C}$ [N/mm ²], [%]	
	Poprečni presek uz prag	Srednji poprečni presek između pragova		
17,5	-49,44	-50,15	±6,04 (±13,92 %)	±6,04 (±13,69 %)
20	-43,40	-44,11		
22,5	-37,37	-38,08		

Tabela 5.2 Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu vrata šine za $T_n = 17,5\text{ °C}$, $T_n = 20\text{ °C}$ i $T_n = 22,5\text{ °C}$

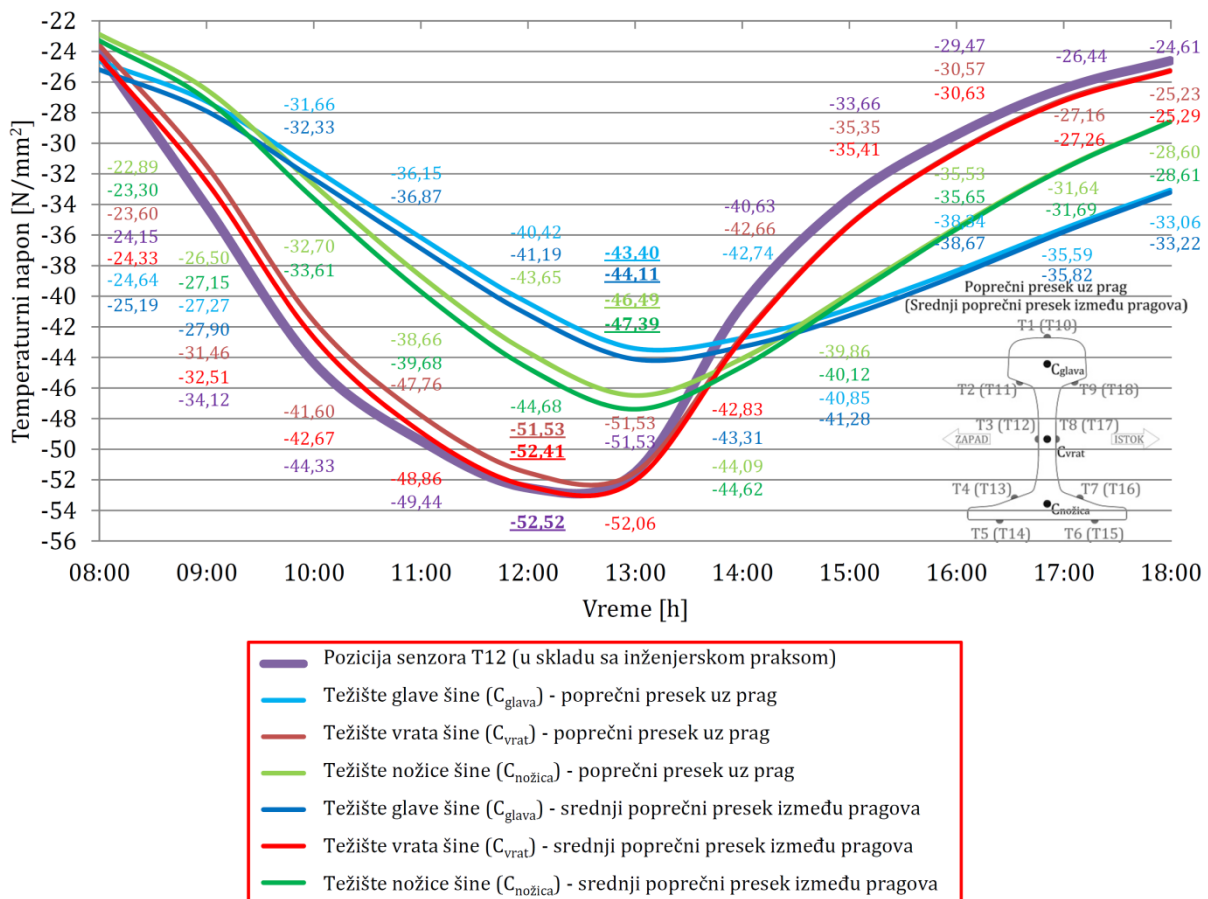
Neutralna temperatura [°C]	Temperaturni naponi (težište vrata) [N/mm ²]		Povećanje/smanjenje napona u odnosu na $T_n = 20\text{ °C}$ [N/mm ²], [%]	
	Poprečni presek uz prag	Srednji poprečni presek između pragova		
17,5	-57,56	-58,45	±6,04 (±11,72 %)	±6,04 (±11,52 %)
20	-51,53	-52,41		
22,5	-45,49	-46,38		

Tabela 5.3 Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u težištu nožice šine za $T_n = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T_n = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Neutralna temperatura [°C]	Temperaturni naponi (težište nožice) [N/mm ²]		Povećanje/smanjenje napona u odnosu na $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [N/mm ²], [%]	
	Poprečni presek uz prag	Srednji poprečni presek između pragova		
17,5	-52,52	-53,42	±6,04 (±12,99 %)	±6,04 (±12,75 %)
20	-46,49	-47,39		
22,5	-40,45	-41,35		

U skladu sa rezultatima prikazanim u tabelama 5.1, 5.2 i 5.3, promena neutralne temperature za $\Delta T_n = \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ izaziva teorijsko povećanje/smanjenje napona od $\pm 2,415 \text{ N/mm}^2$, što u odnosu na vrednost napona pri neutralnoj temperaturi od $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ dovodi do maksimalne razlike napona od: $\pm 5,57 \%$ u težištu glave šine, $\pm 4,69 \%$ u težištu vrata šine i $\pm 5,20 \%$ u težištu nožice šine.

Sa druge strane, određivanje temperaturnog napona u skladu sa inženjerskom praksom zasniva se na merenju površinske temperature na vratu šine na strani koja nije direktno izložena sunčevom zračenju u srednjem poprečnom preseku između pragova (pozicija senzora T12). Na slici 5.34 prikazane su vrednosti temperaturnog napona na poziciji senzora T12, tj. na mestu za postavljanje magnetnog termometra u skladu sa inženjerskom praksom [99]. Takođe, prikazane su vrednosti temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine u poprečnom preseku uz prag, kao i u srednjem poprečnom preseku između pragova [10].



Slika 5.34 Vrednosti temperaturnih napona u skladu sa inženjerskom praksom i u težištima glave, vrata i nožice šine za $T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [10]

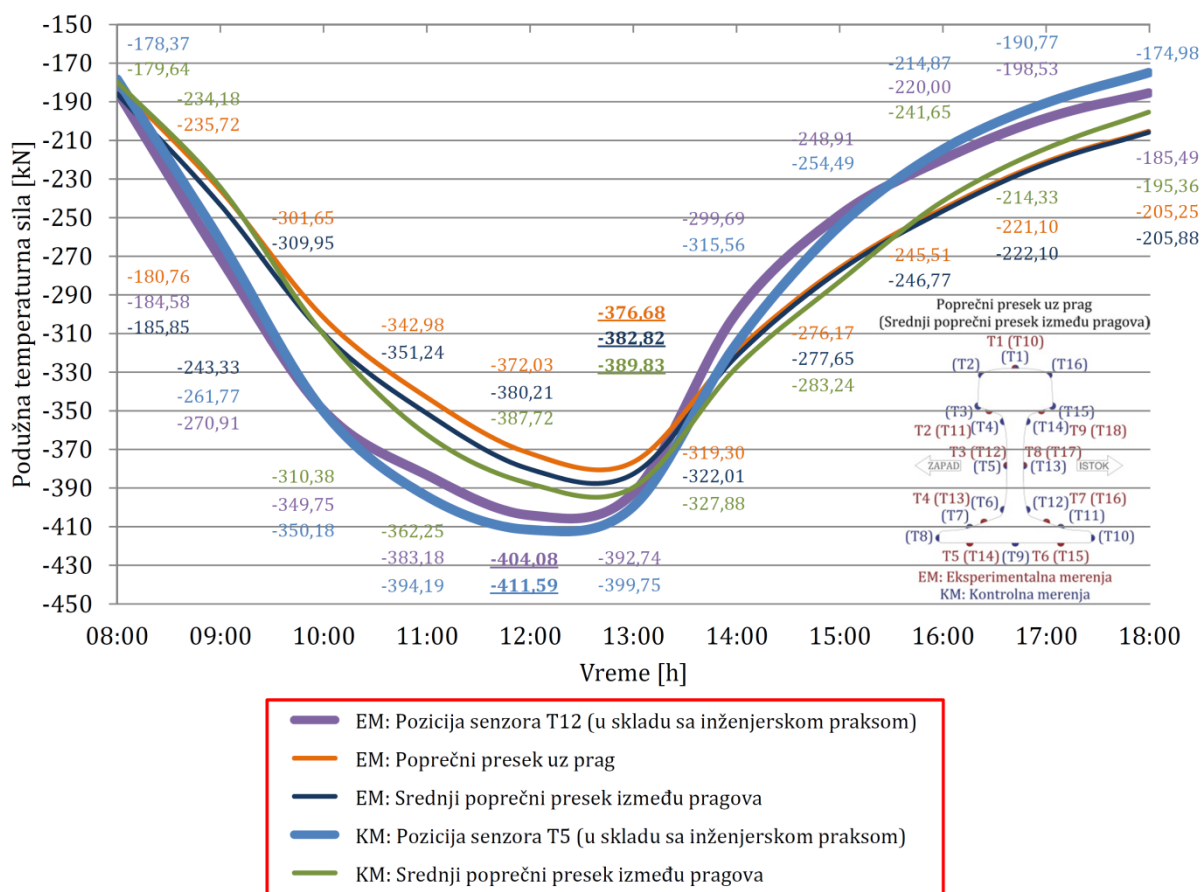
U tabeli 5.4 prikazano je poređenje maksimalnih vrednosti temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine sa maksimalnom vrednošću temperaturnog napona na poziciji senzora T12. Smanjenje temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine u odnosu

na napon na poziciji senzora T12 posledica je toplotne inercije koju razvijena metodologija uzima u obzir pri određivanju temperaturnih napona unutar šine [10].

Tabela 5.4 Maksimalne vrednosti temperaturnih napona u skladu sa inženjerskom praksom i u težištima glave, vrata i nožice šine za $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [10]

Pozicija	Temperaturni naponi [N/mm ²]		Smanjenje napona u odnosu na napon na poziciji senzora T12 [%]	
	Poprečni presek uz prag	Srednji poprečni presek između pragova		
Senzor T12	/	-52,52	/	/
Težište glave	-43,40	-44,11	-17,36	-16,01
Težište vrata	-51,53	-52,41	-1,88	-0,21
Težište nožice	-46,49	-47,39	-11,48	-9,77

S obzirom da je veličina podužne temperaturne sile u kontinualno zavarenoj šini u letnjim uslovima indikator stabilnosti koloseka, izvršen je njen proračun preko temperaturnih napona u poprečnim presecima šine, i to u poprečnom preseku uz prag, kao i u srednjem poprečnom preseku između pragova. Takođe, izvršen je proračun podužne temperaturne sile u kontinualno zavarenoj šini na osnovu konstantne vrednosti temperaturnog napona na poziciji senzora T12 (u skladu sa inženjerskom praksom). Na slici 5.35 prikazane su vrednosti podužnih temperaturnih sila u kontinualno zavarenoj šini kod eksperimentalnih i kontrolnih merenja [10].



Slika 5.35 Vrednosti podužnih temperaturnih sila kod eksperimentalnih i kontrolnih merenja za $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [10]

Za eksperimentalna merenja u tabeli 5.5 prikazano je poređenje maksimalnih vrednosti podužnih temperaturnih sila u poprečnom preseku uz prag, kao i u srednjem poprečnom preseku između pragova sa maksimalnom vrednošću podužne temperaturne sile određene na osnovu konstantne vrednosti temperaturnog napona na poziciji senzora T12 (u skladu sa inženjerskom praksom) [10].

Tabela 5.5 Maksimalne vrednosti podužnih temperaturnih sila kod eksperimentalnih merenja za $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [10]

Pozicija	Podužna temperaturna sila [kN]	Smanjenje sile u odnosu na silu određenu na osnovu konstantnog napona na poziciji senzora T12 [%]
Senzor T12	-404,08	/
Poprečni presek uz prag	-376,68	-6,78
Srednji poprečni presek između pragova	-382,82	-5,26

Za kontrolna merenja u tabeli 5.6 prikazano je poređenje maksimalne vrednosti podužne temperaturne sile u srednjem poprečnom preseku između pragova sa maksimalnom vrednošću podužne temperaturne sile određene na osnovu konstantne vrednosti temperaturnog napona na poziciji senzora T5 (u skladu sa inženjerskom praksom) [10].

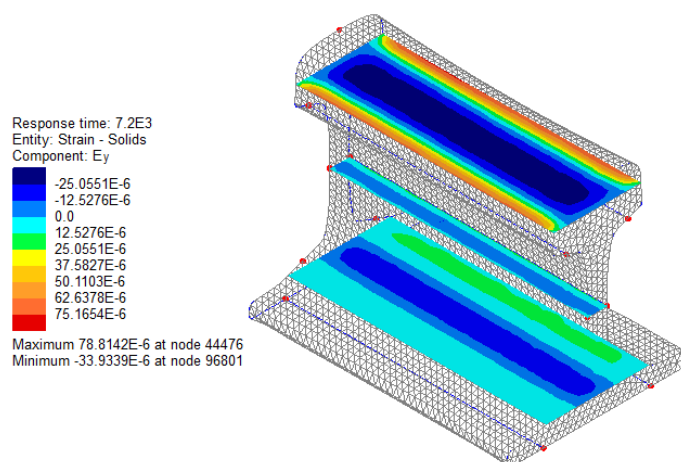
Tabela 5.6 Maksimalne vrednosti podužnih temperaturnih sila kod kontrolnih merenja za $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [10]

Pozicija	Podužna temperaturna sila [kN]	Smanjenje sile u odnosu na silu određenu na osnovu konstantnog napona na poziciji senzora T5 [%]
Senzor T5	-411,59	/
Srednji poprečni presek između pragova	-389,83	-5,29

Maksimalna vrednost podužne temperaturne sile u kontrolnim merenjima je za 1,86 % veća od maksimalne vrednosti podužne temperaturne sile u eksperimentalnim merenjima zbog različitih meteoroloških uslova tokom dva dana merenja (slike 4.12, 4.13, 4.14 i 5.35) [10].

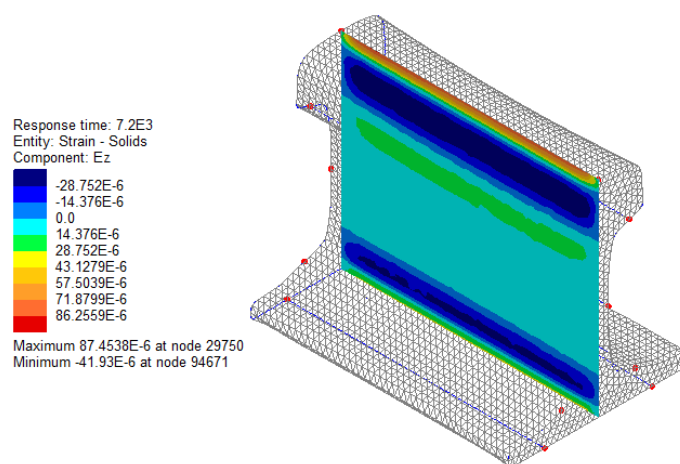
U nastavku, na slikama 5.36 i 5.37 prikazani su priraštaji poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija unutar kontinualno zavarene šine za vremenski period od 09:00 h do 10:00 h kada su priraštaji dilatacija bili najveći. Dobijeni rezultati pokazuju da [10]:

- se maksimalni priraštaji poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija javljaju u ivičnim zonama zapremine šine debljine cca. 5 mm (posebno izraženo na glavi šine), odnosno u zonama sa najvećom temperaturnom promenom tokom vremena,
- maksimalni priraštaj poprečnih temperaturnih dilatacija u glavi šine iznosi $78,81 \cdot 10^{-6}$ mm/mm za vremenski period od 09:00 h do 10:00 h (slika 5.36),



Slika 5.36 Priraštaj poprečnih temperaturnih dilatacija u glavi, vratu i nožici šine u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10]

- maksimalni priraštaj vertikalnih temperaturnih dilatacija u glavi šine iznosi $87,45 \cdot 10^{-6}$ mm/mm za vremenski period od 09:00 h do 10:00 h (slika 5.37),



Slika 5.37 Priraštaj vertikalnih temperaturnih dilatacija u glavi, vratu i nožici šine u periodu od 09:00 h do 10:00 h [10]

- su u ivičnim zonama vrata i nožice šine poprečne i vertikalne temperaturne dilatacije značajno manje nego u ivičnim zonama glave šine, zbog manje izloženosti tih delova šine direktnom sunčevom zračenju,
- su priraštaji poprečnih i vertikalnih temperaturnih dilatacija značajno manji unutar zapremine šine nego na površini zbog uticaja toplotne inercije i znatno manjih temperaturnih promena unutar zapremine šine tokom vremena.

6 NUMERIČKA ANALIZA DODATNIH TEMPERATURNIH NAPONA

U ovom poglavlju prikazana je numerička analiza dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Predstavljen je numerički model za analizu interakcije kolosek/most, kao i parametri konstrukcija koloseka i mosta koji imaju uticaj na vrednosti dodatnih temperaturnih napona. Prikazani su kriterijumi interakcije kolosek/most u skladu sa trenutno važećom tehničkom regulativom, kao i metode za analizu dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Sprovedena je parametarska analiza i prikazani su rezultati za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija, kako bi se utvrdio uticaj svakog od razmatranih parametara na vrednosti dodatnih temperaturnih napona. Na osnovu dobijenih rezultata definisane su odgovarajuće smernice za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta u cilju smanjenja dodatnih temperaturnih napona.

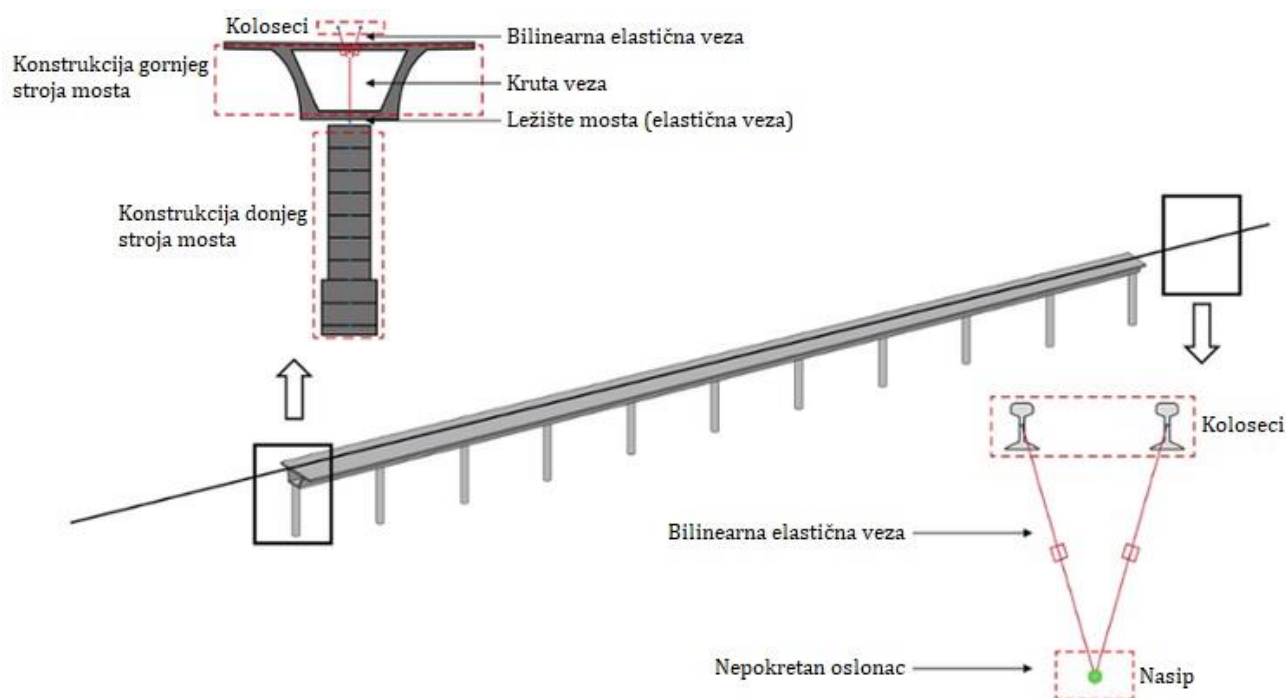
6.1 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most

Numerički model za analizu interakcije kolosek/most je prostorni linijski model za proračun:

- dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu,
- pomeranja konstrukcija koloseka i mosta,
- veličine zazora pri pucanju šine na mostu,
- merodavne sile pritiska za kontrolu bočne stabilnosti koloseka na mostu.

U okviru doktorske disertacije prikazani su numerički modeli za analizu interakcije kolosek/most koji su razvijeni u softveru Midas Civil [114] primenom metode konačnih elemenata i koji se u opštem slučaju sastoje od (slika 6.1) [49], [115]:

- konstrukcije mosta,
- konstrukcije koloseka na mostu i na zemljanom trupu (nasipu) ispred i iza mosta,
- elemenata veze između koloseka i mosta.

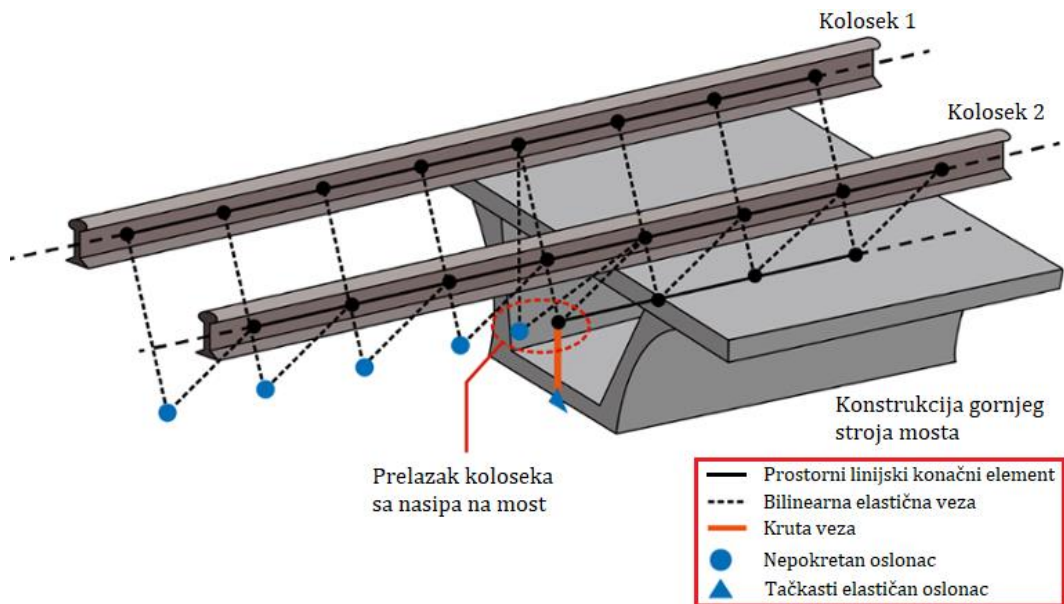


Slika 6.1 Šematski prikaz numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most [115]

6.1.1 Konačni elementi i elementi veza primenjeni u numeričkom modelu

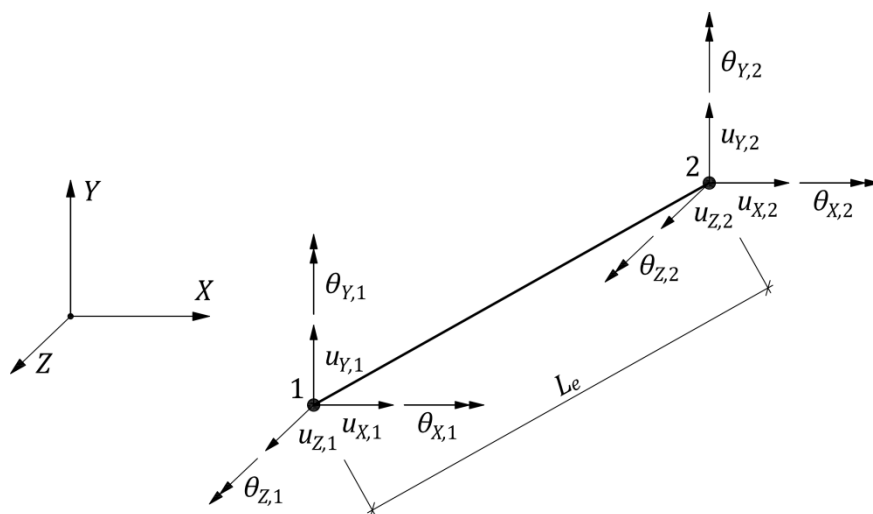
Numerički model za analizu interakcije kolosek/most formiran je korišćenjem (slika 6.2) [115]:

- prostornih linijskih konačnih elemenata kojima su modelirane konstrukcije koloseka i mosta,
- bilinearnih elastičnih veza kojima su modelirane veze između koloseka i mosta,
- krutih veza kojima su modelirane veze između konstrukcije gornjeg stroja mosta i oslonaca mosta,
- nepokretnih oslonaca kojima je modeliran zemljani trup (nasip),
- tačkastih elastičnih oslonaca kojima su modelirani oslonci mosta.



Slika 6.2 Konačni elementi i elementi veza u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most [115]

Prostorni linijski konačni element u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most je trodimenzionalna prava greda (eng. 3D straight beam) koja je matematički formulisana na osnovu Timoshenko-ve teorije grede i koja se koristi za određivanje uticaja usled smicanja i savijanja, kao i usled aksijalnog i torzionog napreznja (slika 6.3) [116], [117].



Slika 6.3 Prostorni linijski konačni element sa stepenima slobode u globalnom koordinatnom sistemu [116], [117]

Ovaj tip konačnog elementa ima ukupno 12 stepeni slobode, po tri translacije i po tri rotacije u oba čvora. Dužina nedeformisanog konačnog elementa označena je sa L_e . Vektor pomeranja elementa (\mathbf{u}) u globalnom koordinatnom sistemu dat je u sledećem obliku [117]:

$$\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_1^T, \boldsymbol{\theta}_1^T, \mathbf{u}_2^T, \boldsymbol{\theta}_2^T\}^T \quad (6.1)$$

gde je:

- \mathbf{u}_1 - vektor translacija u čvoru 1,
- $\boldsymbol{\theta}_1$ - vektor rotacija u čvoru 1,
- \mathbf{u}_2 - vektor translacija u čvoru 2,
- $\boldsymbol{\theta}_2$ - vektor rotacija u čvoru 2.

Takođe, vektor čvornih sila elementa (\mathbf{q}) u globalnom koordinatnom sistemu dat je kao [117]:

$$\mathbf{q} = \{\mathbf{p}_1^T, \mathbf{m}_1^T, \mathbf{p}_2^T, \mathbf{m}_2^T\}^T \quad (6.2)$$

gde je:

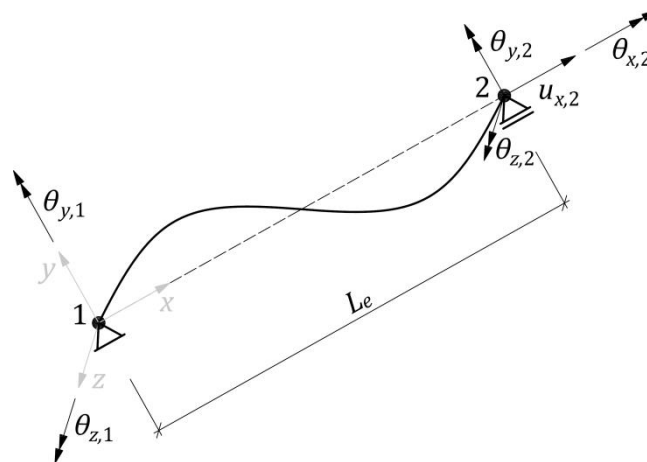
- \mathbf{p}_1 - vektor sila u čvoru 1,
- \mathbf{m}_1 - vektor momenta u čvoru 1,
- \mathbf{p}_2 - vektor sila u čvoru 2,
- \mathbf{m}_2 - vektor momenta u čvoru 2.

Na slici 6.4 prikazane su osnovne komponente pomeranja elementa u lokalnom koordinatnom sistemu, dok je vektor deformacijski nezavisnih veličina elementa (\mathbf{v}) u lokalnom koordinatnom sistemu predstavljen kao [117]:

$$\mathbf{v} = \{u_{x,2}, \theta_{z,1}, \theta_{z,2}, \theta_{x,2}, \theta_{y,1}, \theta_{y,2}\}^T \quad (6.3)$$

gde je:

- $u_{x,2}$ - translacija u pravcu x ose u čvoru 2,
- $\theta_{z,1}$ - rotacija oko z ose u čvoru 1,
- $\theta_{z,2}$ - rotacija oko z ose u čvoru 2,
- $\theta_{x,2}$ - rotacija oko x ose u čvoru 2,
- $\theta_{y,1}$ - rotacija oko y ose u čvoru 1,
- $\theta_{y,2}$ - rotacija oko y ose u čvoru 2.



Slika 6.4 Osnovne komponente pomeranja prostornog linijskog konačnog elementa u lokalnom koordinatnom sistemu [117]

Veza između vektora \mathbf{v} i vektora \mathbf{u} definisana je sledećim izrazom [117]:

$$\mathbf{v} = \mathbf{a}_g \cdot \mathbf{u} \quad (6.4)$$

gde je:

\mathbf{a}_g - kinematička matrica.

$$\mathbf{a}_g = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_e & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1/L_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/L_e & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L_e & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1/L_e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_e & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Takođe, vektor statički nezavisnih veličina elementa (\mathbf{q}_i) u lokalnom koordinatnom sistemu predstavljen je kao [117]:

$$\mathbf{q}_i = \{p_{x,2}, m_{z,1}, m_{z,2}, m_{x,2}, m_{y,1}, m_{y,2}\}^T \quad (6.6)$$

gde je:

- $p_{x,2}$ - normalna sila u pravcu x ose u čvoru 2,
- $m_{z,1}$ - moment savijanja oko z ose u čvoru 1,
- $m_{z,2}$ - moment savijanja oko z ose u čvoru 2,
- $m_{x,2}$ - moment torzije oko x ose u čvoru 2,
- $m_{y,1}$ - moment savijanja oko y ose u čvoru 1,
- $m_{y,2}$ - moment savijanja oko y ose u čvoru 2.

Primenom principa virtuelnog rada dobija se uslov ravnoteže elementa iz koga slede matrica krutosti elementa (\mathbf{K}) i vektor čvornih sila elementa (\mathbf{q}) u globalnom koordinatnom sistemu [117], [118]:

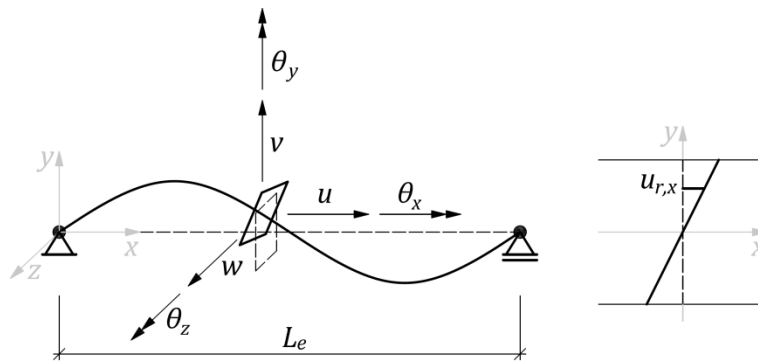
$$\mathbf{K} = \mathbf{a}_g^T \cdot \mathbf{f}^{-1} \cdot \mathbf{a}_g \quad (6.7)$$

$$\mathbf{q} + \mathbf{q}_{rp} = \mathbf{a}_g^T \cdot \mathbf{q}_i \quad (6.8)$$

gde je:

- \mathbf{f} - matrica fleksibilnosti elementa,
- \mathbf{q}_{rp} - vektor čvornih sila elementa usled opterećenja raspodeljenog duž ose.

U skladu sa Timoshenko-vom teorijom grede [119], generalizovani vektor pomeranja poprečnog preseka elementa $\mathbf{u}_s(x)$ dat je kao (slika 6.5) [117]:



Slika 6.5 Pomeranja poprečnog preseka prostornog linijskog konačnog elementa [117]

$$\mathbf{u}_s(x) = \{u(x), \theta_z(x), v(x), \theta_x(x), \theta_y(x), w(x)\}^T \quad (6.9)$$

gde je:

$u(x), v(x), w(x)$ - translacije poprečnog preseka elementa u pravcima x, y i z osa,
 $\theta_x(x), \theta_y(x), \theta_z(x)$ - rotacije poprečnog preseka elementa oko x, y i z osa.

Imajući u vidu pretpostavku o ravnosti poprečnog preseka, vektor pomeranja poprečnog preseka elementa kao krutog tela $\mathbf{u}_r(x,y,z)$ definisan je sledećim izrazom [117]:

$$\mathbf{u}_r(x,y,z) = \begin{Bmatrix} u_{r,x}(x,y,z) \\ u_{r,y}(x,y,z) \\ u_{r,z}(x,y,z) \end{Bmatrix} = \mathbf{a}_s(y,z) \cdot \mathbf{u}_s(x) \quad (6.10)$$

gde je:

$u_{r,x}(x,y,z), u_{r,y}(x,y,z), u_{r,z}(x,y,z)$ - pomeranja poprečnog preseka elementa kao krutog tela,
 $\mathbf{a}_s(y,z)$ - matrica operatora kompatibilnosti.

$$\mathbf{a}_s(y,z) = \begin{bmatrix} 1 & -y & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Vektor deformacija poprečnog preseka elementa $\boldsymbol{\varepsilon}_r(x,y,z)$ definisan je kao [117]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r(x,y,z) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{r,x}(x,y,z) \\ \gamma_{r,xy}(x,y,z) \\ \gamma_{r,xz}(x,y,z) \end{Bmatrix} = \mathbf{a}_s(y,z) \cdot \mathbf{e}(x) \quad (6.12)$$

Takođe, generalizovani vektor deformacija poprečnog preseka elementa $\mathbf{e}(x)$ predstavljen je u sledećem obliku [117]:

$$\mathbf{e}(x) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_G(x) \\ \chi_z(x) \\ \gamma_y(x) \\ \chi_x(x) \\ \chi_y(x) \\ \gamma_z(x) \end{Bmatrix} \quad (6.13)$$

gde je:

$\varepsilon_G(x)$ - aksijalna deformacija poprečnog preseka elementa,
 $\chi_z(x), \chi_y(x)$ - deformacije od savijanja poprečnog preseka elementa,
 $\chi_x(x)$ - deformacija od torzije poprečnog preseka elementa,
 $\gamma_y(x), \gamma_z(x)$ - deformacije od smicanja poprečnog preseka elementa.

Vektor napona poprečnog preseka elementa $\boldsymbol{\sigma}_m(x,y,z)$ dat je kao [117]:

$$\boldsymbol{\sigma}_m(x,y,z) = \begin{Bmatrix} \sigma_x(x,y,z) \\ \tau_{xy}(x,y,z) \\ \tau_{xz}(x,y,z) \end{Bmatrix} \quad (6.14)$$

gde je:

σ_x - normalni napon,
 τ_{xy}, τ_{xz} - smičući naponi.

Integracijom napona po poprečnom preseku elementa izvodi se vektor unutrašnjih sila poprečnog preseka elementa $\mathbf{s}(x)$ [117]:

$$\mathbf{s}(x) = \int_A \mathbf{a}_s^T(y, z) \cdot \boldsymbol{\sigma}_m(x, y, z) \cdot dA = \begin{Bmatrix} N(x) \\ M_z(x) \\ T_y(x) \\ M_x(x) \\ M_y(x) \\ T_z(x) \end{Bmatrix} \quad (6.15)$$

gde je:

$N(x)$ - normalna sila u pravcu x ose,
 $M_z(x), M_y(x)$ - momenti savijanja oko z i y osa,
 $M_x(x)$ - moment torzije oko x ose,
 $T_y(x), T_z(x)$ - smičuće sile u pravcima y i z osa.

Takođe, vektor unutrašnjih sila poprečnog preseka elementa $\mathbf{s}(x)$ može se predstaviti i u funkciji vektora čvornih sila elementa (\mathbf{q}) u lokalnom koordinatnom sistemu [117]:

$$\mathbf{s}(x) = \mathbf{b}(x) \cdot \mathbf{q} + \mathbf{s}_q(x) \quad (6.16)$$

gde je:

$\mathbf{b}(x)$ - matrica ravnoteže,
 $\mathbf{s}_q(x)$ - vektor čvornih sila poprečnog preseka elementa usled opterećenja raspodeljenog duž ose.

Primenom principa virtualnog rada za poprečni presek elementa dobija se uslov ravnoteže u sledećem obliku [117]:

$$\delta \mathbf{e}^T(x) \cdot \mathbf{s}(x) = \int_A \delta \boldsymbol{\epsilon}_r^T(x, y, z) \cdot \boldsymbol{\sigma}_m(x, y, z) \cdot dA \quad (6.17)$$

Matrica krutosti poprečnog preseka elementa $\mathbf{K}_s(x)$, kao i matrica krutosti materijala $\mathbf{K}_m(x, y, z)$ definisane su sledećim izrazima [117]:

$$\mathbf{K}_s(x) = \int_A \mathbf{a}_s^T(y, z) \cdot \mathbf{K}_m(x, y, z) \cdot \mathbf{a}_s(y, z) \cdot dA \quad (6.18)$$

$$\mathbf{K}_m(x, y, z) = \partial \boldsymbol{\sigma}_m(x, y, z) / \partial \boldsymbol{\epsilon}_m(x, y, z) \quad (6.19)$$

Pored konačnih elemenata, pri formiranju numeričkih modela za analizu interakcije kolosek/most koriste se i elementi veza koje se definišu preko sledećih funkcija u okviru softvera Midas Civil [114], [115]:

- General elastic link (tačkasti elastični oslonci mosta i nepokretni oslonci zemljanog trupa),
- Rigid elastic link (veza između konstrukcije gornjeg stroja mosta i oslonaca mosta),
- Multi linear elastic link (veza između koloseka i mosta).

Karakteristične vrednosti pri definisanju elemenata veza prikazane su kroz parametre konstrukcija koloseka i mosta u nastavku ovog poglavlja.

6.1.2 Parametri konstrukcije koloseka

Parametrima konstrukcije koloseka definišu se karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: tip profila šine, sistem šinskog pričvršćenja, tip konstrukcije gornjeg stroja, kao i njegovo ponašanje u zavisnosti od vrste opterećenja (opterećen ili neopterećen kolosek), načina održavanja i vremenskih (klimatskih) uslova. Analizom parametara konstrukcije koloseka moguće je uticati na rezultate proračuna

interakcije kolosek/most i izvršiti preraspodelu naprezanja u cilju smanjenja dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu [56], [120], [121]. Takođe, na ovaj način se zadovoljavaju granični kriterijumi u pogledu dozvoljenih vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu, i posledično izostavlja ugradnja šinskih dilatacionih sprava. U inženjerskoj praksi, kada se izvode rekonstrukcije gornjeg stroja železničkih pruga, problem interakcije kolosek/most najčešće se rešava analizom parametara konstrukcije koloseka.

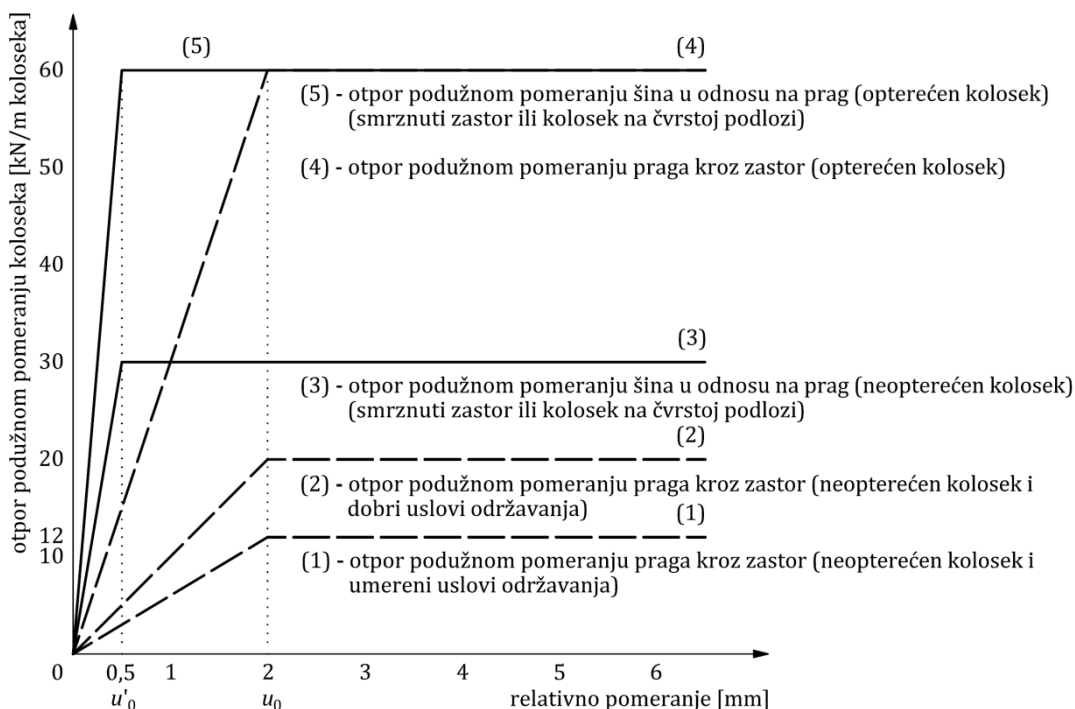
U skladu sa [49] parametri konstrukcije koloseka su:

- površina poprečnog preseka šine,
- otpor podužnom pomeranju koloseka.

Površina poprečnog preseka šine predstavlja parametar konstrukcije koloseka koji definiše tip profila šine i u velikoj meri utiče na rezultate proračuna interakcije kolosek/most. U geometrijske karakteristike profila šine pored površine poprečnog preseka spadaju još i momenti inercije, kao i otporni momenti. Takođe, pored geometrijskih karakteristika profila šine, u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most bitno je definisati i materijalne karakteristike šinskog čelika [5].

Otpor podužnom pomeranju koloseka je drugi bitan parametar konstrukcije koloseka koji utiče na rezultate proračuna interakcije kolosek/most. Otpor podužnom pomeranju koloseka definiše vezu između konstrukcija koloseka i mosta, tj. sistem šinskog pričvršćenja, tip konstrukcije gornjeg stroja (kolosek u zastoru od tucanika ili kolosek na čvrstoj podlozi), kao i njegovo ponašanje u zavisnosti od vrste opterećenja (opterećen ili neopterećen kolosek), načina održavanja i vremenskih (klimatskih) uslova.

Na slici 6.6 prikazani su dijagrami otpora podužnom pomeranju koloseka u funkciji relativnog pomeranja šine u odnosu na prag, tj. relativnog pomeranja praga u odnosu na zastor, kako za neopterećen, tako i za opterećen kolosek. Oblik dijagrama je bilinearan, pri čemu otpor podužnom pomeranju koloseka raste brzo do granične vrednosti relativnog pomeranja, nakon čega ima konstantnu vrednost [49].



u'_0 - granično relativno pomeranje šine u odnosu na prag u_0 - granično relativno pomeranje praga u odnosu na zastor

Slika 6.6 Dijagrami otpora podužnom pomeranju koloseka [49], [120]

Granične vrednosti relativnih pomeranja imaju sledeće vrednosti (slika 6.6) [49]:

- 0,5 mm (granično relativno pomeranje šine u odnosu na prag),
- 2 mm (granično relativno pomeranje praga u odnosu na zastor).

Za kolosek u zastoru od tucanika granične vrednosti otpora podužnom pomeranju koloseka imaju sledeće vrednosti (slika 6.6) [49]:

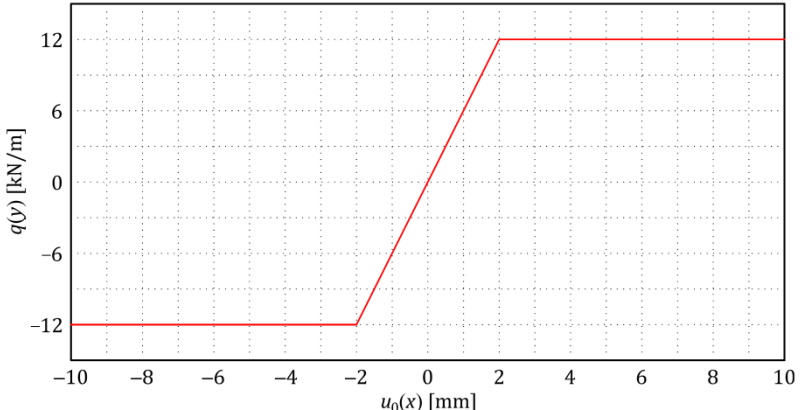
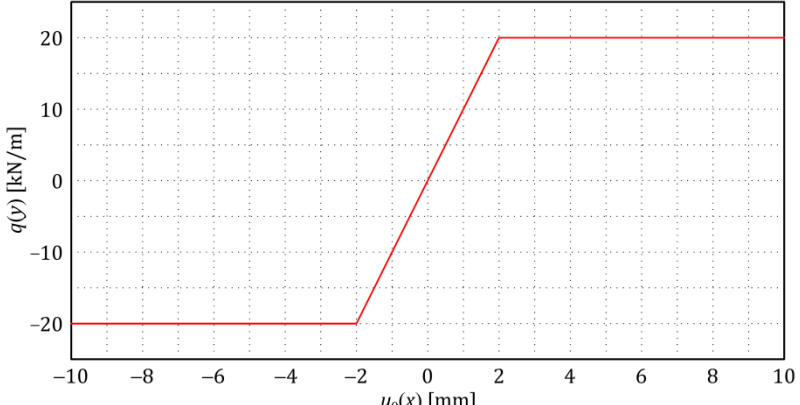
- 12 kN/m (otpor podužnom pomeranju praga kroz zastor za neopterećen kolosek i umerene uslove održavanja),
- 20 kN/m (otpor podužnom pomeranju praga kroz zastor za neopterećen kolosek i dobre uslove održavanja),
- 30 kN/m (otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag za neopterećen kolosek, smrznut zastor i silu podužnog otpora od 9 kN po jednom šinskom pričvršćenju),
- 60 kN/m (otpor podužnom pomeranju praga kroz zastor za opterećen kolosek; otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag za opterećen kolosek i smrznut zastor).

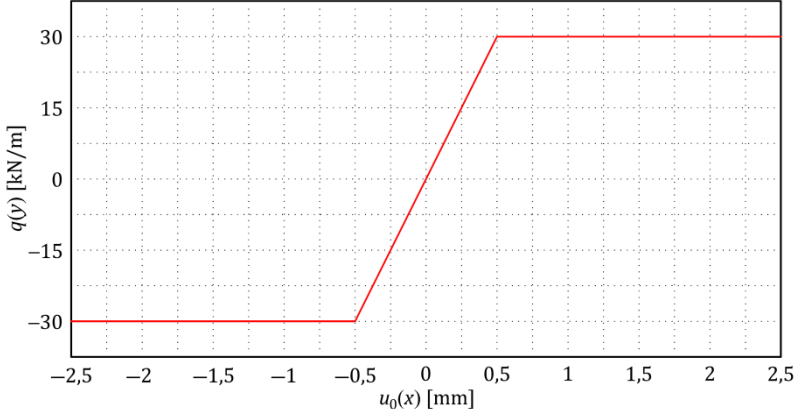
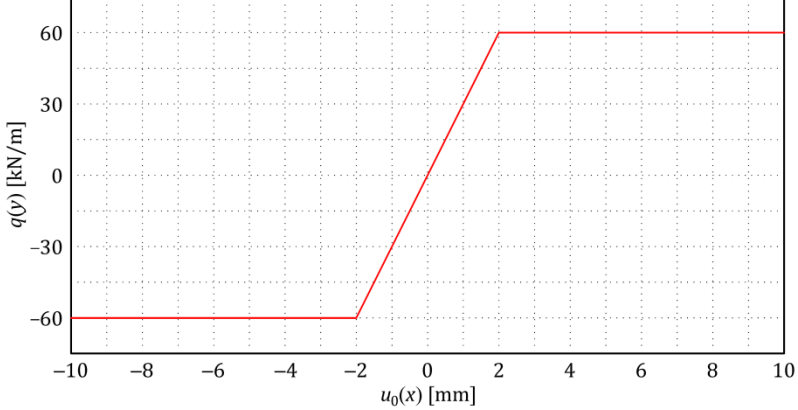
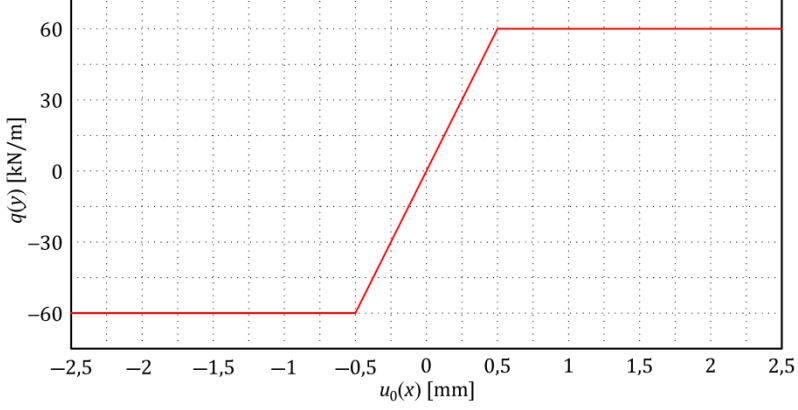
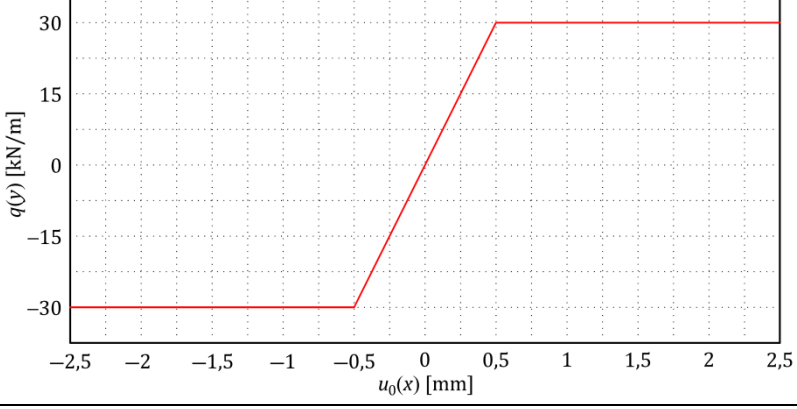
Za kolosek na čvrstoj podlozi granične vrednosti otpora podužnom pomeranju koloseka imaju sledeće vrednosti (slika 6.6) [49]:

- 30 kN/m (otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag za neopterećen kolosek na čvrstoj podlozi i silu podužnog otpora od 9 kN po jednom šinskom pričvršćenju),
- 60 kN/m (otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag za opterećen koloseka na čvrstoj podlozi).

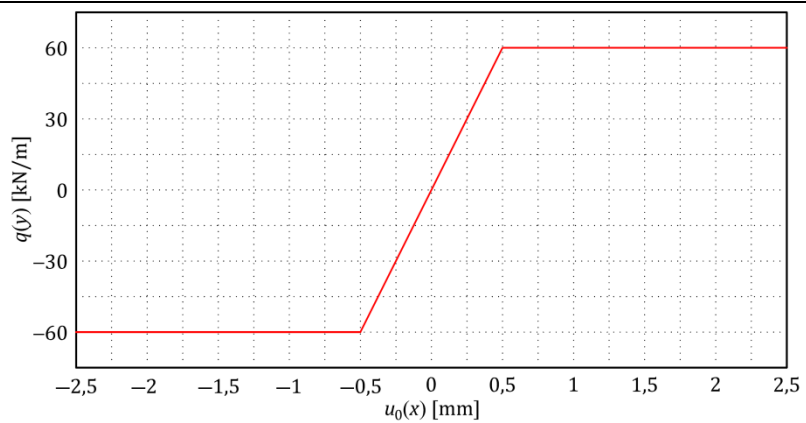
U softveru Midas Civil [114], [115] veza između koloseka i mosta definiše se preko bilinearnih elastičnih veza čije su karakteristike prikazane u tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Karakteristike elementa veze između koloseka i mosta za proračun dodatnih napona i pomeranja [49]

Stanje koloseka	Otpor podužnom pomeranju koloseka $q(y)$ [kN/m] Granično relativno pomeranje $u_0(x)$ [mm]
<p>Neopterećen kolosek u zastoru od tucanika (umereno održavanje) - letnji uslovi</p>	
<p>Neopterećen kolosek u zastoru od tucanika (dobro održavanje) - letnji uslovi</p>	

<p>Neopterećen kolosek u zastoru od tucanika - zimski uslovi</p>	
<p>Opterećen kolosek u zastoru od tucanika - letnji uslovi</p>	
<p>Opterećen kolosek u zastoru od tucanika - zimski uslovi</p>	
<p>Neopterećen kolosek na čvrstoj podlozi - letnji i zimski uslovi</p>	

Opterećen kolosek na
čvrstoj podlozi
- letnji i zimski uslovi



U skladu sa dijagramima otpora podužnom pomeranju koloseka prikazanim na slici 6.6, u slučaju koloseka na mostu koji je položen u zastoru od tucanika, merodavan otpor podužnom pomeranju koloseka određuje se kao manja vrednost između otpora podužnom pomeranju šina u odnosu na prag i otpora podužnom pomeranju praga kroz zastor. Kolosek u zastoru od tucanika za uticaje od temperature u letnjim uslovima ima merodavan otpor podužnom pomeranju praga kroz zastor, osim u situacijama kada se primenjuju sistemi šinskih pričvršćenja sa smanjenim otporom podužnom pomeranju šine ($< 7 \text{ kN}$ po jednom šinskom pričvršćenju na ograničenoj dužini koloseka na mostu), kada je merodavan otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag. U zimskim uslovima kada zastorna prizma zaledi, merodavan otpor podužnom pomeranju koloseka je otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag. U slučaju koloseka na čvrstoj podlozi merodavan je otpor podužnom pomeranju šina u odnosu na prag, tj. betonsku ploču, kako u letnjim, tako i u zimskim uslovima.

6.1.3 Parametri konstrukcije mosta

Parametrima konstrukcije mosta definišu se karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: donji stroj mosta, ležišta mosta i gornji stroj mosta. Kao i kod parametara konstrukcije koloseka, analizom parametara konstrukcije mosta moguće je uticati na preraspodelu naprezanja u cilju smanjenja dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu [56], [120], [121], [122]. Prilikom projektovanja nove trase železničkih pruga problem interakcije kolosek/most se rešava analizom i parametara konstrukcije koloseka i parametara konstrukcije mosta.

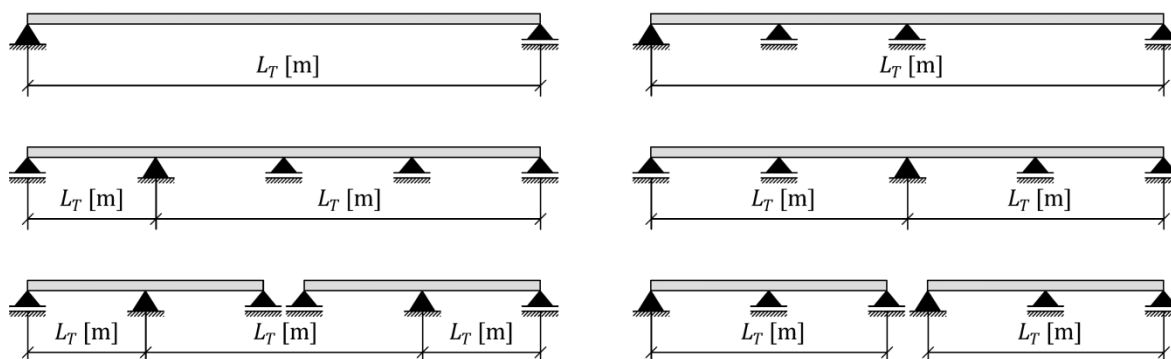
U skladu sa [49] parametri konstrukcije mosta su:

- dilataciona dužina mosta,
- raspon mosta,
- podužna krutost oslonca mosta,
- krutost na savijanje konstrukcije gornjeg stroja mosta,
- visina konstrukcije gornjeg stroja mosta.

Dilataciona dužina mosta predstavlja rastojanje između referentne tačke termičkog centra koja je nepromenljiva usled delovanja temperature i kraja konstrukcije mosta. Položaj referentne tačke termičkog centra zavisi od položaja i tipa oslonaca mosta [49]. Sa druge strane, raspon mosta predstavlja rastojanje između dva susedna oslonca mosta. Za uticaje od temperature od značaja je parametar dilatacione dužine mosta, dok je za uticaje od železničkog saobraćaja od značaja parametar raspona mosta [49].

Na slici 6.7 prikazani su principi određivanja dilatacionih dužina mostova (L_T) za različite statičke sisteme. Kada je konstrukcija mosta statičkog sistema proste grede, dilataciona dužina mosta odgovara rasponu mosta, tj. ukupnoj dužini konstrukcije mosta. Kada je

konstrukcija mosta statičkog sistema kontinualnog nosača, dilataciona dužina mosta predstavlja rastojanje od nepokretnog do krajnjeg pokretnog oslonca mosta. U situaciji kada nepokretni oslonac mosta nije krajnji, tada postoje dve dilatacione dužine mosta. U suprotnom kada je nepokretni oslonac krajnji, tada postoji jedna dilataciona dužina mosta.



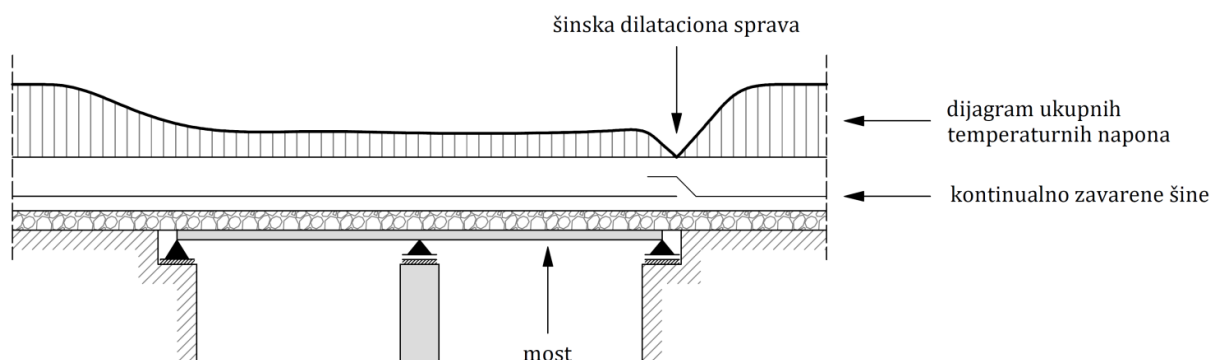
Slika 6.7 Dilatacione dužine mostova različitih statičkih sistema [49]

Maksimalne dilatacione dužine mostova (koje treba proveriti proračunom interakcije kolosek/most) na kojima je položen kolosek sa kontinualno zavarenim šinama (bez šinske dilatacione sprave u koloseku na mostu) iznose [49]:

- 60 m (za čelične konstrukcije mostova sa zastorom od tucanika, gde maksimalna dužina konstrukcije mosta sa jednim nepokretnim osloncem u sredini može iznositi do 120 m),
- 90 m (za betonske i spregnute konstrukcije mostova sa zastorom od tucanika, gde maksimalna dužina konstrukcije mosta sa jednim nepokretnim osloncem u sredini može iznositi do 180 m).

Na osnovu dilatacione dužine mosta i rezultata proračuna interakcije kolosek/most donosi se odluka o ugradnji šinske dilatacione sprave u koloseku na mostu. Šinske dilatacione sprave se ugrađuju iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u slučaju prekoračenja graničnih vrednosti dodatnih napona i/ili prekoračenja graničnih vrednosti pomeranja konstrukcija koloseka i mosta, kao i ukoliko usled dnevnih varijacija temperature izduženje/skraćenje konstrukcije mosta prelazi dozvoljene vrednosti koje su u opštem slučaju 10-15 mm [49].

Na slici 6.8 prikazan je dijagram ukupnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu u slučaju kada je ugrađena šinska dilataciona sprava.



Slika 6.8 Šematski prikaz raspodele ukupnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu u slučaju ugrađene šinske dilatacione sprave [81]

Podužna krutost oslonaca mosta uzima u obzir zbir krutosti: ležišta, stubova, temelja i temeljnog tla. Tipovi ležišta i njihove karakteristike imaju glavni uticaj na otpor podužnom pomeranju konstrukcije mosta. U opštem slučaju u obzir se uzimaju samo podužne krutosti nepokretnih oslonaca mosta [49].

Podužna krutost oslonca mosta (K) određuje se na osnovu sledećih izraza [49]:

$$K = \frac{H[\text{kN}]}{\sum \delta_i[\text{mm}]} \quad (6.20)$$

$$\delta_i = \delta_p + \delta_\phi + \delta_h + \delta_a \quad (6.21)$$

gde je:

H - podužna reakcija oslonca mosta,

δ_i - ukupno podužno pomeranje mosta u nivou ležišta,

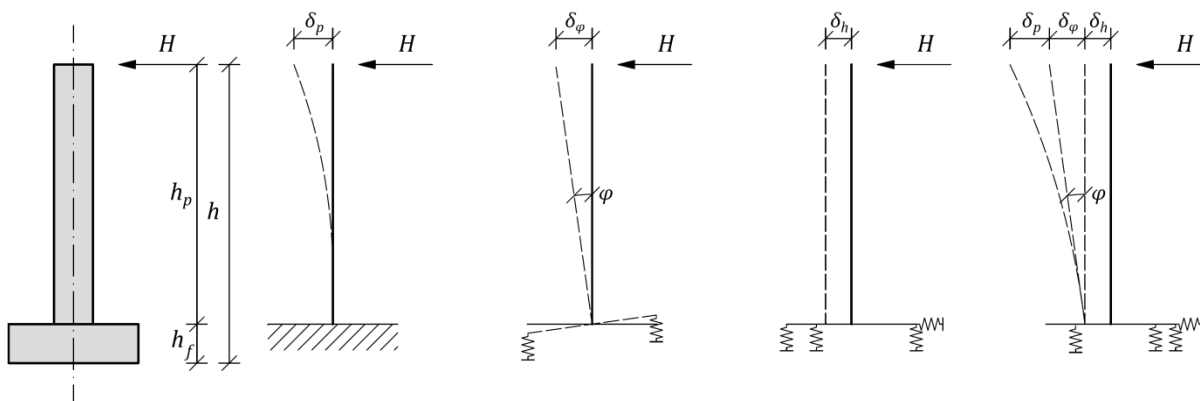
δ_p - pomeranje vrha stuba mosta usled elastične deformacije,

δ_ϕ - pomeranje vrha stuba mosta usled obrtanja temelja ili temeljne ploče,

δ_h - pomeranje vrha stuba mosta usled podužnog pomeranja temelja,

δ_a - relativno pomeranje između gornje i donje ivice ležišta mosta.

Na slici 6.9 prikazane su komponente pomeranja stuba od kojih zavisi podužna krutost oslonca mosta.



Slika 6.9 Komponente pomeranja mostovskog stuba [49]

Pri određivanju krutosti temelja moraju se uzeti u obzir odgovarajuće vrednosti modula elastičnosti okolnog tla koje odgovaraju različitim slučajevima opterećenja (temperaturni uticaji, uticaji usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila) u skladu sa geološkim uslovima i uslovima fundiranja. U slučaju temperaturnih uticaja u konstrukciji gornjeg stroja mosta u obzir se uzima statički modul elastičnosti tla, dok se za slučaj ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu u obzir uzima dinamički modul elastičnosti tla [49].

Za konstrukciju gornjeg stroja mosta sa zastorom od tucanika, sa nepokretnim osloncem na jednom kraju mosta i sa/bez šinske dilatacione sprave na pokretnom kraju mosta, podužna krutost oslonca mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da zadovolji sledeći uslov [49]:

$$K > \frac{20 \cdot \beta \cdot L_B}{5} \quad (6.22)$$

gde je:

K - podužna krutost oslonca mosta [kN/mm],

L_B - ukupna dužina konstrukcije mosta [m],

β - koeficijent redukcije (tabela 6.2).

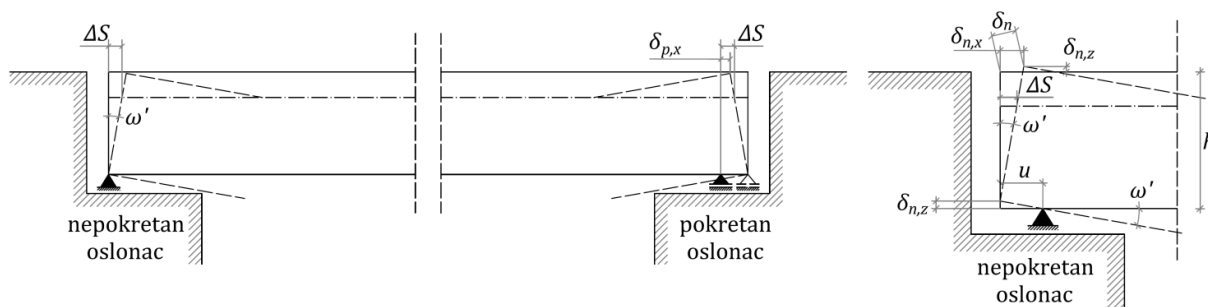
Kod koloseka na mostu sa šinskim dilatacionim spravama na oba kraja mosta usvaja se koeficijent redukcije $\beta = 1$, što znači da se ceo iznos podužne sile od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu prenosi na nepokretan oslonac mosta [49].

Tabela 6.2 Vrednosti koeficijenta redukcije (β) za određivanje dela podužne sile koja se prenosi na nepokretan oslonac mosta [49]

Ukupna dužina konstrukcije mosta [m]	Neprekinut kolosek	Kolosek sa šinskom dilatacionom spravom na jednom kraju mosta
	Jednokolosečna ili dvokolosečna pruga	Jednokolosečna ili dvokolosečna pruga
30	0,50	/
60	0,50	0,60
90	0,60	0,65
120	0,70	0,70
150	0,75	0,75
180	/	0,80
210	/	0,85
240	/	0,90
270	/	0,90
300	/	0,90

Krutost na savijanje i visina konstrukcije gornjeg stroja mosta su parametri koji su od značaja sa aspekta delovanja osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, dok sa aspekta temperaturnih uticaja u konstrukciji gornjeg stroja mosta nemaju uticaj. Usled delovanja osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu dolazi do obrtanja krajeva mosta, kao i do pomeranja koja dovode do interakcije kolosek/most. U skladu sa tim, što je krutost na savijanje konstrukcije gornjeg stroja mosta veća, deformacije u vertikalnoj ravni mosta, kao i obrtanja krajeva mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog saobraćaja su manja, pa je samim tim i efekat interakcije kolosek/most manji [49].

Na slici 6.10 prikazane su komponente pomeranja usled obrtanja krajeva konstrukcije gornjeg stroja mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila. Na slici 6.10 (levo) prikazana je komponenta podužnog pomeranja gornje ivice kraja mosta na mestu pokretnog oslonca ($\delta_{p,x}$), dok je na slici 6.10 (desno) prikazana komponenta podužnog pomeranja gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca ($\delta_{n,x}$), kao i komponenta vertikalnog pomeranja gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca ($\delta_{n,z}$) u slučaju postojanja prepusta mosta preko nepokretnog oslonca (u) [81].



ω' - ugao obrtanja kraja mosta,
 ΔS - podužno pomeranje neutralne ose mosta usled obrtanja kraja mosta,
 $\delta_{p,x}$ - podužno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu pokretnog oslonca,
 u - dužina prepusta mosta preko nepokretnog oslonca,
 h - visina konstrukcije gornjeg stroja mosta,
 δ_n - pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca,
 $\delta_{n,x}$ - podužno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca,
 $\delta_{n,z}$ - vertikalno pomeranje gornje ivice kraja mosta na mestu nepokretnog oslonca.

Slika 6.10 Podužno i vertikalno pomeranje krajeva mosta usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu [81]

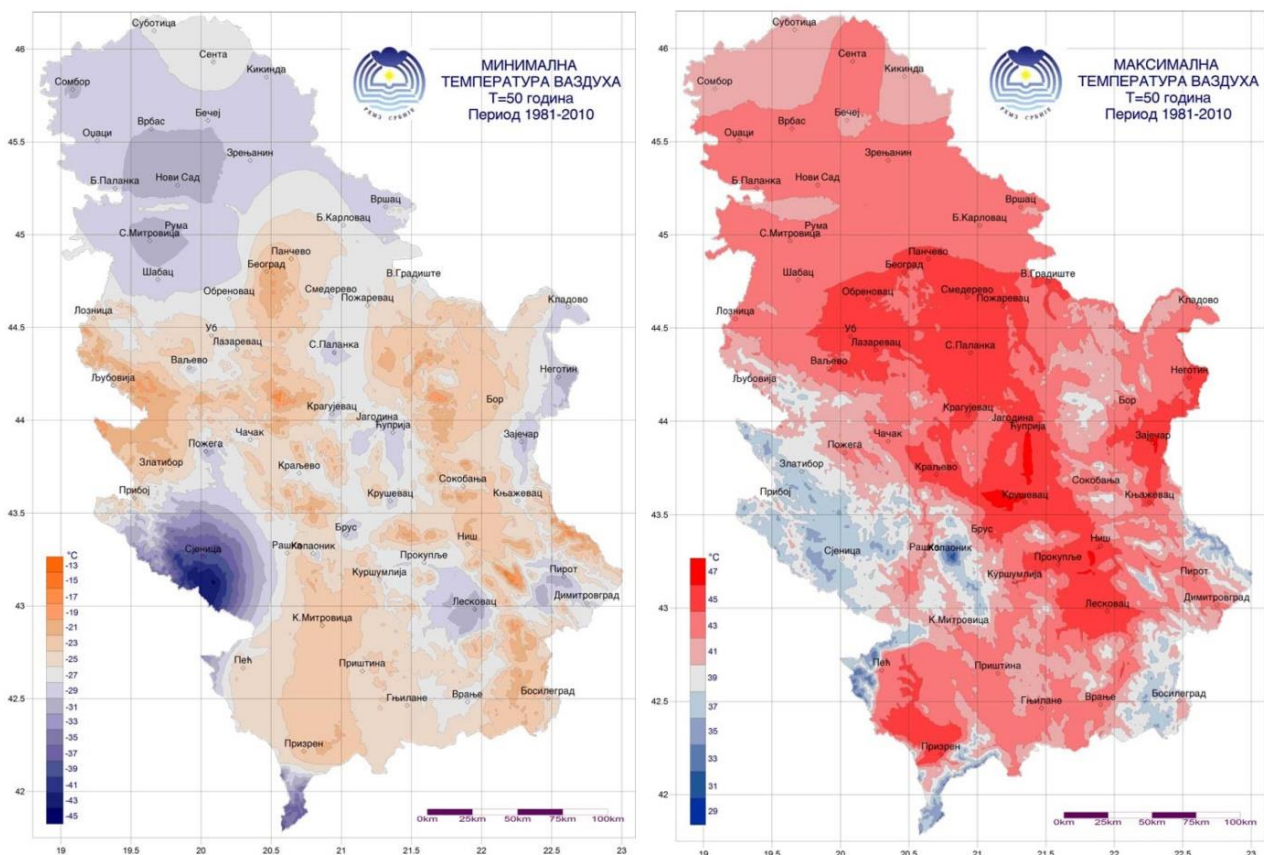
6.1.4 Razmatrana opterećenja u numeričkom modelu

U okviru numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most razmatrana su sledeća opterećenja [49]:

- temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta,
- ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu,
- osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu.

Za numeričku analizu dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu koriste se uticaji usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Takođe, razmatraju se i uticaji usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu u cilju poređenja vrednosti dodatnih napona u zavisnosti od primenjene metode proračuna dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu, kao i za kontrolu vrednosti ukupnih dodatnih napona pritiska i zatezanja [49].

Uticaji od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta zadaju se u skladu sa standardom EN 1991-1-5 [123], tj. SRPS EN 1991-1-5 [124], kao i nacionalnim aneksom SRPS EN 1991-1-5/NA [125] koji propisuju vrednosti ΔT_N prema određenom klimatskom području. Na slici 6.11 prikazana je karta Republike Srbije sa minimalnim ($T_{a,min}$) i maksimalnim ($T_{a,max}$) temperaturama vazduha u hladu za povratni period od 50 godina na osnovu kojih se određuju merodavne temperaturne promene za proračun temperaturnih uticaja u konstrukciji mosta. Za kontrolne proračune i u situacijama kada ne postoje klimatske karte može se uzeti u obzir temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $\Delta T_B = \pm 35$ °C u skladu sa [49], [51].



Slika 6.11 Karta minimalnih i maksimalnih temperatura vazduha u hladu za teritoriju Republike Srbije i povratni period od 50 godina [125]

Na slici 6.12 prikazane su zavisnosti između minimalne/maksimalne ($T_{a,min}$, $T_{a,max}$) temperature vazduha u hladu i minimalne/maksimalne ($T_{e,min}$, $T_{e,max}$) ravnomerne komponente temperature mosta u funkciji od tipa konstrukcije gornjeg stroja mosta.

Standard EN 1991-1-5 [123] razlikuje tri tipa konstrukcija gornjeg stroja mosta:

- Tip 1: Čelična konstrukcija (sandučasti, rešetkasti, pločasti nosači),
- Tip 2: Spregnuta konstrukcija,
- Tip 3: Betonska konstrukcija (pločasti, gredni, sandučasti nosači).

Početna temperatura mosta (T_0) se usvaja kao srednja temperatura tokom perioda izgradnje mosta. Takođe, SRPS EN 1991-1-5/NA [125] propisuje alternativne vrednosti, koje se mogu definisati i u konkretnom projektu. U slučaju da informacije tokom gradnje objekta nisu dostupne može se uzeti vrednost od $T_0 = 10$ °C.

Na osnovu početne temperature mosta određuju se temperature merodavne za proračun skraćanja/izduženja konstrukcije mosta. Karakteristična vrednost maksimalnog opsega skraćanja ($\Delta T_{N,con}$) usled ravnomerne komponente temperature mosta računa se preko sledeće jednačine u skladu sa [123]:

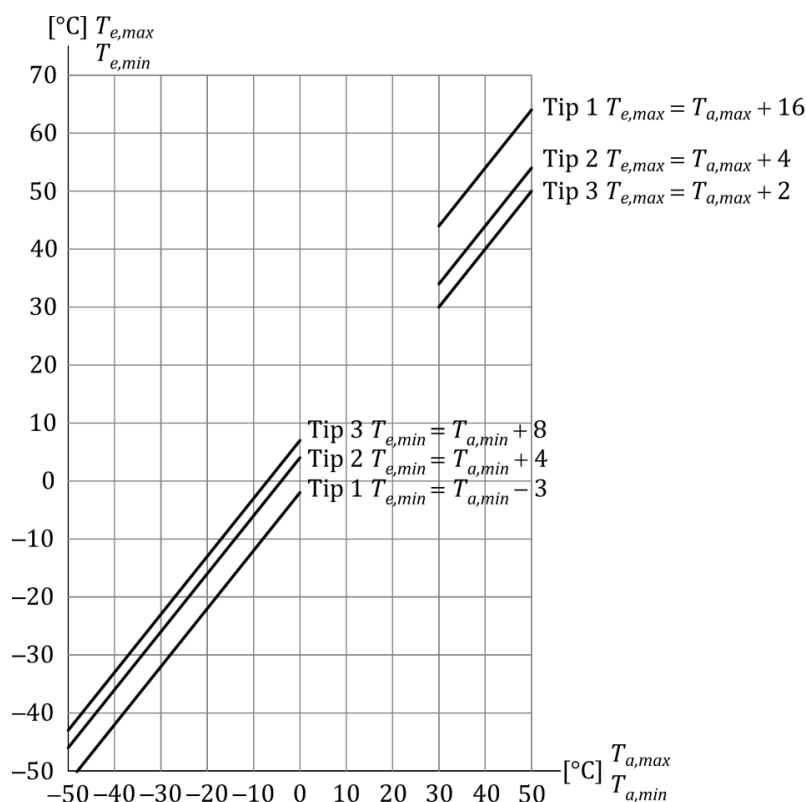
$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} \quad (6.23)$$

Sa druge strane, karakteristična vrednost maksimalnog opsega izduženja ($\Delta T_{N,exp}$) usled ravnomerne komponente temperature mosta računa se preko sledeće jednačine u skladu sa [123]:

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 \quad (6.24)$$

Ukupan opseg ravnomerne komponente temperature mosta računa se preko sledeće jednačine [123]:

$$\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} \quad (6.25)$$



Slika 6.12 Veza između temperature vazduha u hladu i ravnomerne komponente temperature mosta [123]

U skladu sa EN 1991-2 [51] sile usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila deluju na vrhu šina u podužnom pravcu koloseka. Zadaju se kao raspodeljeno linijsko opterećenje na odgovarajućoj uticajnoj dužini. Pravac sile ubrzanja/kočenja se zadaje u skladu sa dozvoljenim smerom vožnje na svakom koloseku.

U nastavku su prikazane karakteristične vrednosti sila ubrzanja/kočenja u zavisnosti od primenjene šeme opterećenja [51]:

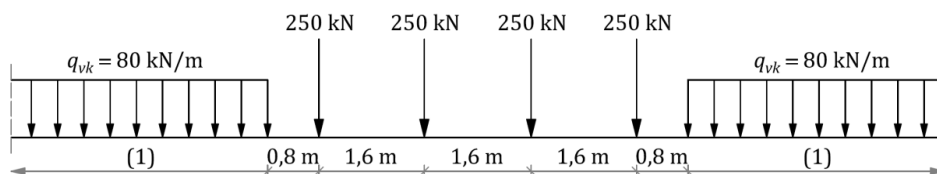
- sila ubrzanja 33 kN/m (≤ 1000 kN) za šeme opterećenja LM71, SW/0, SW/2,
- sila kočenja 20 kN/m (≤ 6000 kN) za šeme opterećenja LM71, SW/0,
- sila kočenja 35 kN/m za šemu opterećenja SW/2.

Sile usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila za šeme opterećenja LM71 i SW/0 množe se faktorom α_L u skladu sa [51] na linijama sa železničkim saobraćajem koji je teži ili lakši od normalnog. Faktor α_L može imati vrednosti iz opsega (0,75-0,83-0,91-1,00-1,10-1,2-1,33-1,46).

Sile usled ubrzanja/kočenja kombinuju se sa odgovarajućim osovinskim opterećenjem od železničkog vozila. U slučaju kada je kolosek na mostu neprekinut tj. bez šinskih dilatacionih sprava na jednom ili oba kraja mosta, deo sile ubrzanja/kočenja prenosi se kroz konstrukciju gornjeg stroja mosta na ležišta, a ostatak sile prihvata kolosek. U slučaju dvokolosečnog mosta sile kočenja na jednom koloseku kombinuju se sa silama ubrzanja na drugom koloseku [51].

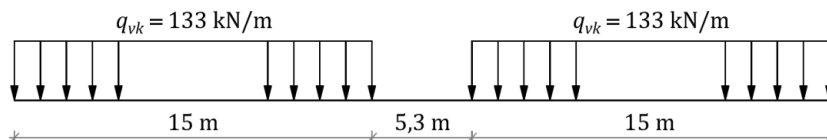
Osovinsko opterećenje od železničkih vozila se zadaje preko odgovarajućih šema opterećenja. Za proračun interakcije kolosek/most razmatraju se sledeće šeme opterećenja [51]: LM71, SW/0 i SW/2. Šeme opterećenja LM71 i SW/0 takođe se množe sa faktorom α_L u skladu sa [51] na linijama sa železničkim saobraćajem koji je teži ili lakši od normalnog.

Šema opterećenja LM71 predstavlja statički efekat osovinskog opterećenja usled normalnog železničkog saobraćaja [51]. Raspored opterećenja i karakteristične vrednosti zadaju se kao što je prikazano na slici 6.13.



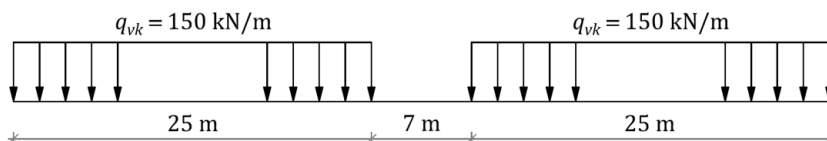
Slika 6.13 Šema opterećenja LM71 [51]

Šema opterećenja SW/0 predstavlja statički efekat osovinskog opterećenja usled normalnog železničkog saobraćaja na kontinualnim grednim nosačima [51]. Raspored opterećenja i karakteristične vrednosti zadaju se kao što je prikazano na slici 6.14.



Slika 6.14 Šema opterećenja SW/0 [51]

Šema opterećenja SW/2 predstavlja statički efekat osovinskog opterećenja usled teškog železničkog saobraćaja [51]. Raspored opterećenja i karakteristične vrednosti zadaju se kao što je prikazano na slici 6.15.



Slika 6.15 Šema opterećenja SW/2 [51]

6.2 Kriterijumi interakcije kolosek/most

U slučaju neprekinutog koloseka sa kontinualno zavarenim šinama na mostu treba da budu ispunjeni sledeći kriterijumi interakcije kolosek/most u skladu sa trenutno važećom tehničkom regulativom [49], [51], [52], [53]:

- Maksimalni dozvoljeni dodatni naponi pritiska u kontinualno zavarenoj šini na mostu usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu treba da budu $\sigma_{A,p} \leq -72 \text{ N/mm}^2$,
- Maksimalni dozvoljeni dodatni naponi zatezanja u kontinualno zavarenoj šini usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu treba da budu $\sigma_{A,t} \leq 92 \text{ N/mm}^2$,
- Maksimalni dozvoljeni dodatni naponi pritiska i zatezanja važe za: kolosek u zastoru od tucanika koji je na pravcu ili u kružnoj krivini minimalnog poluprečnika 1500 m, profil šine tipa 60E1 (minimalne zatezne čvrstoće 900 N/mm^2), elastične sisteme šinskih pričvršćenja, betonske pragove na maksimalnom međusobnom rastojanju od 65 cm, minimalno 30 cm zbijenog tucanika ispod pragova. U slučaju kada gore navedeni uslovi nisu ispunjeni, potrebno je sprovesti posebne studije ili obezbediti dodatne mere osiguranja bočne stabilnosti koloseka,
- Maksimalni dozvoljeni dodatni naponi pritiska u kontinualno zavarenoj šini na mostu kod koloseka na čvrstoj podlozi, kao i kod koloseka u zastoru od tucanika kod koga su obezbeđene dodatne mere osiguranja bočne stabilnosti koloseka (na mostu, kao i na zemljanom trupu neposredno ispred i iza mosta, na dužini koja je veća ili jednaka dilatacionoj dužini mosta) treba da budu $\sigma_{A,p} \leq -92 \text{ N/mm}^2$,
- Maksimalno dozvoljeno relativno podužno pomeranje između konstrukcija gornjeg stroja mosta i koloseka usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da bude $\delta_{rel} \leq 4 \text{ mm}$,
- Maksimalno dozvoljeno apsolutno podužno pomeranje konstrukcije gornjeg stroja mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da bude $\delta_{abs} \leq 5 \text{ mm}$,
- Maksimalno dozvoljeno podužno pomeranje između gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta i oporca, tj. između gornjih ivica krajeva dve uzastopne konstrukcije gornjeg stroja mosta, usled obrtanja krajeva mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila (uključujući dinamički faktor), treba da bude $\delta_{\theta,h} \leq 8 \text{ mm}$.

U slučaju koloseka sa šinskom dilatacionom spravom na jednom kraju mosta treba da budu ispunjeni sledeći kriterijumi u skladu sa [49], [51], [52], [53]:

- Maksimalno dozvoljeno relativno podužno pomeranje između konstrukcija gornjeg stroja mosta i koloseka usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da bude $\delta_{rel} \leq 4 \text{ mm}$,
- Maksimalno dozvoljeno apsolutno podužno pomeranje konstrukcije gornjeg stroja mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da bude $\delta_{abs} \leq 5 \text{ mm}$,
- Na kraju mosta gde ne postoji šinska dilataciona sprava maksimalno dozvoljeno podužno pomeranje između gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta i oporca, tj. između gornjih ivica krajeva dve uzastopne konstrukcije gornjeg stroja mosta, usled obrtanja krajeva mosta pod osovinskim opterećenjem od železničkog vozila (uključujući dinamički faktor), treba da bude $\delta_{\theta,h} \leq 8 \text{ mm}$,
- Na kraju mosta gde postoji šinska dilataciona sprava maksimalno dozvoljeno vertikalno pomeranje gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta treba da bude: $\delta_v \leq 3 \text{ mm}$ za maksimalnu brzinu $\leq 160 \text{ km/h}$, tj. $\delta_v \leq 2 \text{ mm}$ za maksimalnu brzinu $> 160 \text{ km/h}$.

U slučaju koloseka sa šinskim dilatacionim spravama na oba kraja mosta ili u slučaju koloseka sa mehaničkim šinskim spojevima treba da budu ispunjeni sledeći kriterijumi u skladu sa [49], [51], [52], [53]:

- Maksimalno dozvoljeno apsolutno podužno pomeranje konstrukcije gornjeg stroja mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu treba da bude $\delta_{abs} \leq 30$ mm,
- Maksimalno dozvoljeno vertikalno pomeranje gornje ivice kraja konstrukcije gornjeg stroja mosta treba da bude: $\delta_v \leq 3$ mm za maksimalnu brzinu ≤ 160 km/h, tj. $\delta_v \leq 2$ mm za maksimalnu brzinu > 160 km/h.

6.3 Metode za analizu dodatnih napona

Za analizu dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu koriste se sledeće metode [49]:

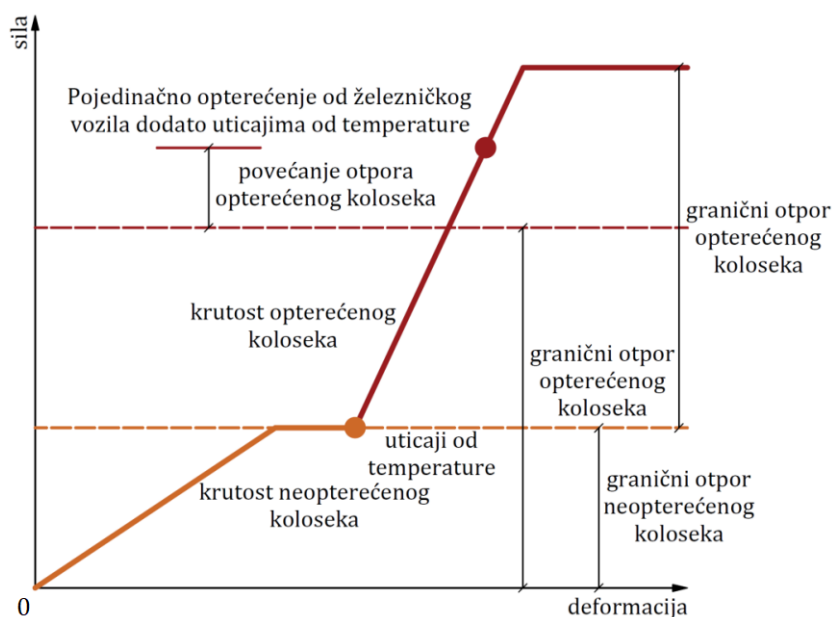
- pojedinačna analiza,
- kompletna analiza.

Pojedinačna analiza dodatnih napona usled: temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, kao i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu razmatra odvojeno nelinearne modele sa svakim pojedinačnim opterećenjem nakon čega se rezultati kombinuju. Ovo je jednostavniji način proračuna dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu jer pretpostavlja da je superponiranje dobijenih rezultata dozvoljeno, što nije slučaj u nelinearnoj analizi [126], [127].

Kompletna analiza dodatnih napona usled: temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, kao i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu razmatra uticaje od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta pre primene opterećenja od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. Početno izduženje/skraćenje (preddeformacija) usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta ima uticaj na rezultate proračuna dodatnih napona u fazi opterećenog koloseka [126], [127].

6.3.1 Pojedinačna analiza

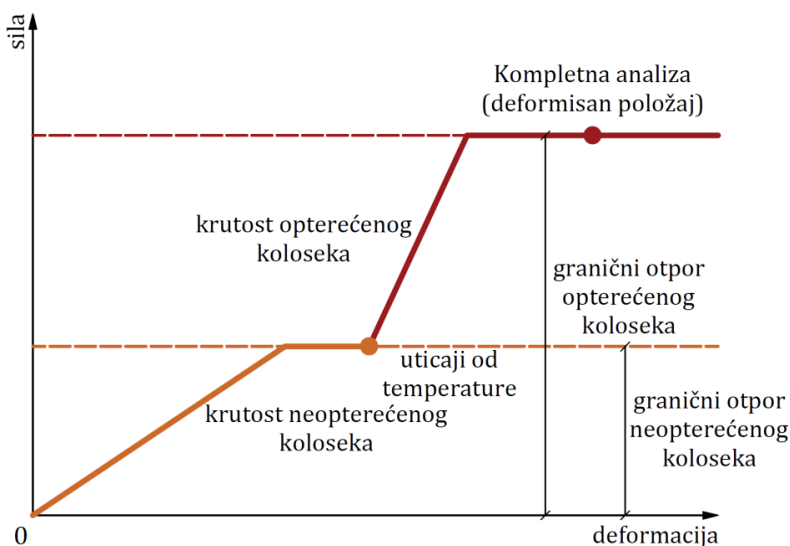
Kako početni uticaji od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta nisu poznati, pretpostavlja se da su početna naprezanja i deformacije mosta pre opterećenja od železničkog vozila jednaka nuli. Kada se uticaji od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta primenjuju pojedinačno (slika 6.16), u početku otpor podužnom pomeranju koloseka prati liniju „krutost neopterećenog koloseka” sve do vrednosti „granični otpor neopterećenog koloseka”, odnosno prati liniju „krutost neopterećenog koloseka” dok ne dostigne vrednost u tački „uticaji od temperature”. Takođe, ako se i opterećenje od železničkog vozila primenjuje pojedinačno, otpor podužnom pomeranju koloseka počinje u tački „uticaji od temperature” i prati liniju „krutost opterećenog koloseka” sve dok ne dostigne vrednost „Pojedinačno opterećenje od železničkog vozila dodato uticajima od temperature”. U analizi opterećenja od železničkog vozila otpor podužnom pomeranju koloseka prati liniju „krutost opterećenog koloseka”, ali konačni rezultat se dobija kombinovanjem rezultata analize opterećenja od železničkog vozila sa rezultatima analize uticaja od temperature. Kao rezultat toga, dolazi do povećanja otpora podužnom pomeranju koloseka za vrednost „povećanje otpora opterećenog koloseka”, što ukazuje na to da je napon u kontinualno zavarenim šinama na mostu precenjen, tj. na strani sigurnosti primenom pojedinačne analize [126], [127].



Slika 6.16 Dijagram sila-deformacija za pojedinačnu analizu [126], [127]

6.3.2 Kompletna analiza

Kod kompletne analize pre nego što se primeni opterećenje od železničkog vozila na mostu, uticaji od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta već postoje (slika 6.17). Početno stanje deformacija konstrukcije gornjeg stroja mosta uzima se u obzir tokom opterećenja od železničkog vozila. Drugim rečima, ako se opterećenje od železničkog vozila primenjuje kada je već došlo do relativnog pomeranja šine u odnosu na most usled uticaja od temperature, ponašanje elemenata veze između praga i zastora od tucanika, tj. između šina i praga prebacuje se iz neopterećenog u opterećeno stanje. Pri tome se zadržavaju naprezanja i deformacije u šinama i mostu usled uticaja od temperature [126], [127].



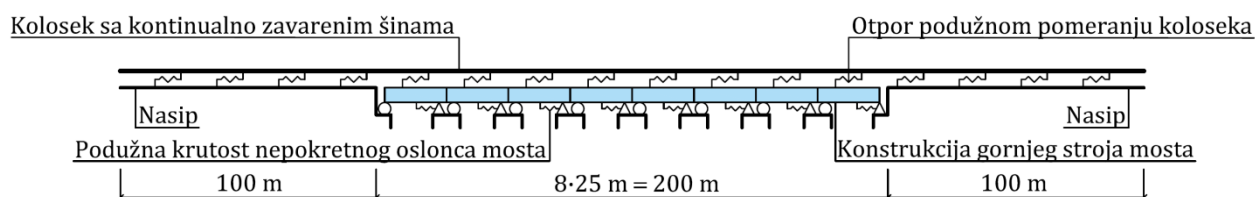
Slika 6.17 Dijagram sila-deformacija za kompletnu analizu [126], [127]

Kao i kod pojedinačne analize, u fazi neopterećenog koloseka kada deluju samo uticaji od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, otpor podužnom pomeranju koloseka prati liniju „krutost neopterećenog koloseka” i dostiže vrednost u tački „uticaji od temperature”. Razlika kompletne analize u poređenju sa pojedinačnom analizom odnosi se na opterećenja od železničkog vozila koja se u kompletnoj analizi primenjuje na već postojeće naprezanje i deformacije usled uticaja od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja

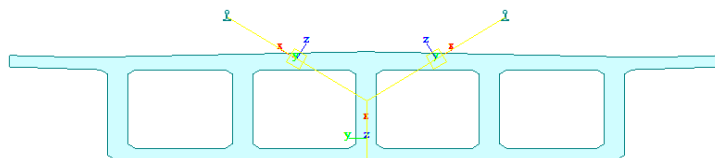
mosta. Otpor podužnom pomeranju koloseka se prebacuje na liniju „krutost opterećenog koloseka“ za deo koloseka na kome se primenjuje opterećenje od železničkog vozila. Otpor podužnom pomeranju koloseka prati liniju „krutost opterećenog koloseka“ od tačke „uticaji od temperature“, ali vrednost graničnog otpora ostaje u granicama od koordinatnog početka do vrednosti „granični otpor opterećenog koloseka“, a ne od tačke „uticaji od temperature“ i označen je tačkom „Kompletna analiza (deformisan položaj)“. Primenom kompletne analize dobijaju se znatno niže i realnije vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu u poređenju sa pojedinačnom analizom [126], [127].

6.3.3 Poređenje rezultata pojedinačne i kompletne analize

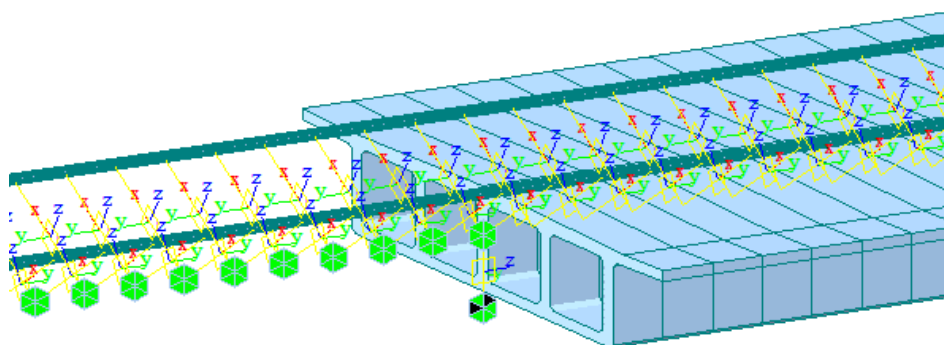
U ovom poglavlju sproveden je proračun interakcije kolosek/most primenom pojedinačne i kompletne analize u cilju poređenja vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu u zavisnosti od primenjene metode proračuna. Na slikama 6.18, 6.19 i 6.20 prikazani su dispozicija, poprečni presek, kao i karakteristični detalj numeričkog modela pri prelasku koloseka sa zemljanog trupa na most.



Slika 6.18 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom [10]



Slika 6.19 Poprečni presek numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.20 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonske proste grede u nizu raspona $8 \cdot 25 \text{ m} = 200 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

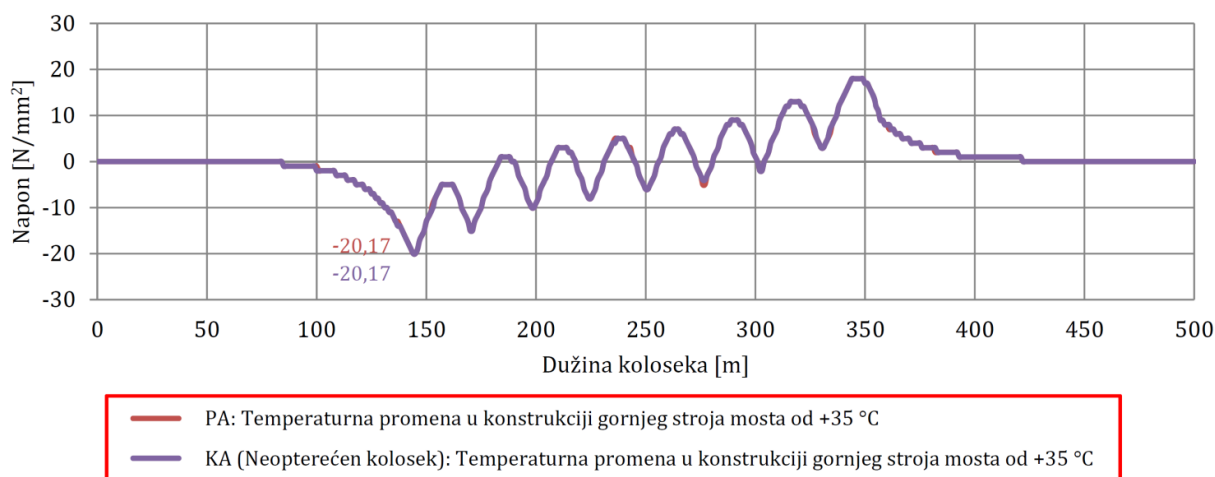
U tabeli 6.3 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

Tabela 6.3 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu od 8·25 m = 200 m sa neprekinutim kolosekom [10]

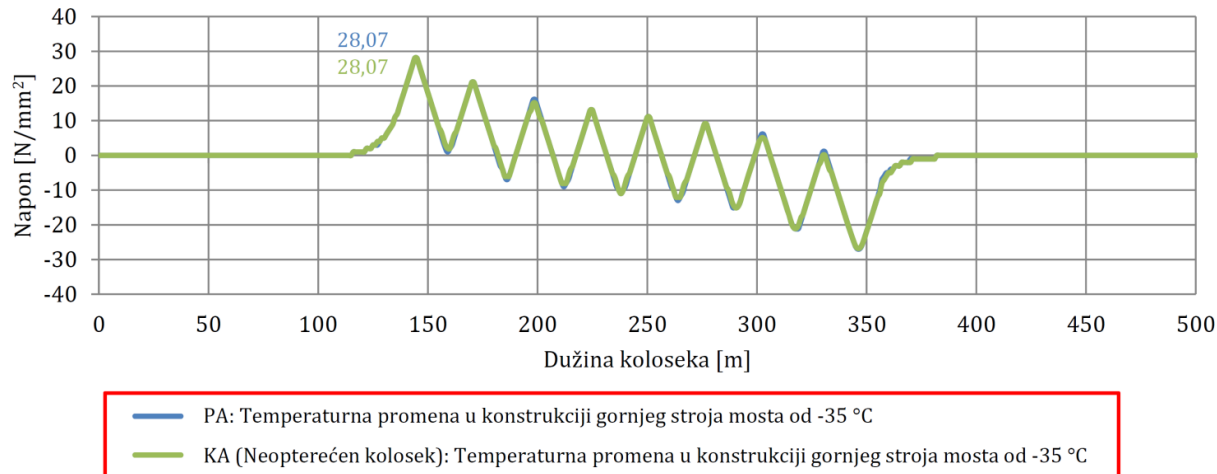
Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (1836)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (618) Rigid elastic link (16) Multi linear elastic link (3304)
Konstrukcija koloseka	
Tip profila šine:	60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi):	20 kN/m (neopterećen kolosek) 60 kN/m (opterećen kolosek) 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi):	30 kN/m (neopterećen kolosek) 60 kN/m (opterećen kolosek) 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Konstrukcija mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	proste grede u nizu
Rasponi i ukupna dužina mosta:	8·25 m = 200 m
Dilatacione dužine mosta:	25 m
Raspored oslonaca mosta:	P (pokretno) - N (nepokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	150000 kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	$A = 7,46 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 3,52 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 72,74 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) $h = 2 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta) $W = 12,5 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	C 35/45 (klasa betona) $E = 3,33 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+35 °C (letnji uslovi) -35 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Na slikama 6.21 i 6.22 prikazani su rezultati proračuna dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu primenom pojedinačne (PA) i kompletne (KA)

analize (neopterećen kolosek). Na osnovu dobijenih rezultata proračuna može se zaključiti da dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama na mostu ne zavise od primenjene metode proračuna i imaju iste vrednosti za pojedinačnu i kompletnu analizu. Pored toga, dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama na mostu u zimskim uslovima veći su nego dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama na mostu u letnjim uslovima (za istu temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $\pm 35\text{ }^{\circ}\text{C}$). To se može objasniti većim otporom podužnom pomeranju šina u odnosu na prag u smrznutoj zastornoj prizmi od 30 kN/m i graničnim relativnim pomeranjem od $0,5\text{ mm}$ u poređenju sa otporom podužnom pomeranju praga u odnosu na zastor tokom letnjeg perioda od 20 kN/m i graničnim relativnim pomeranjem od 2 mm [10].



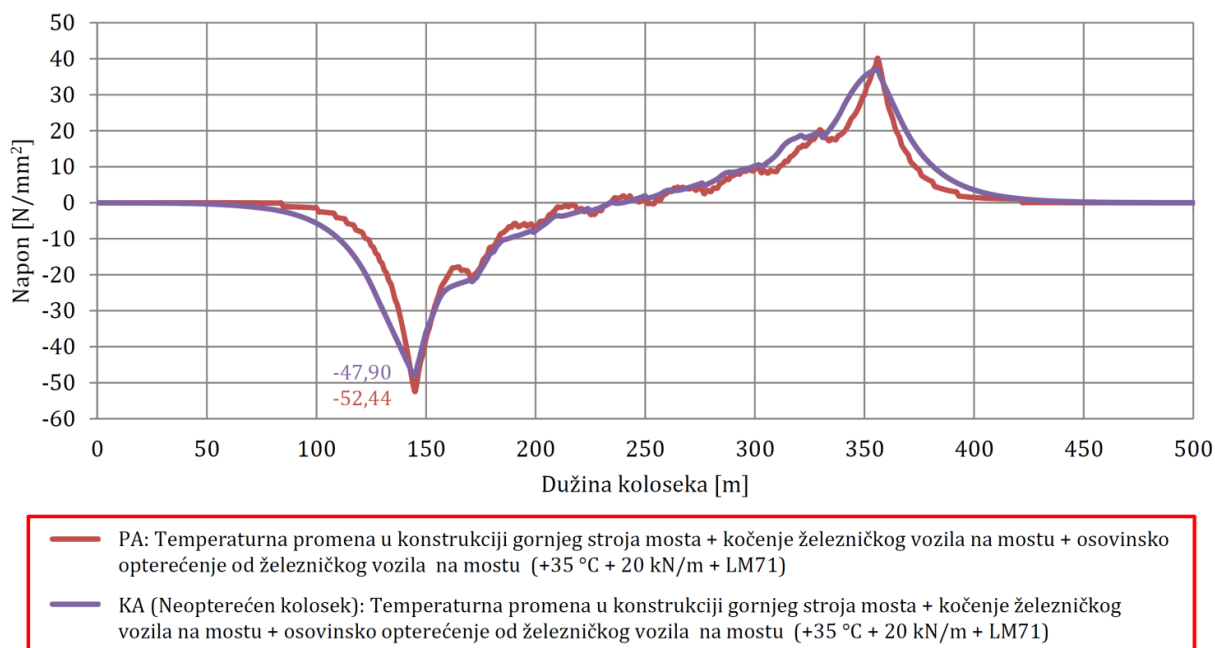
Slika 6.21 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi) [10]



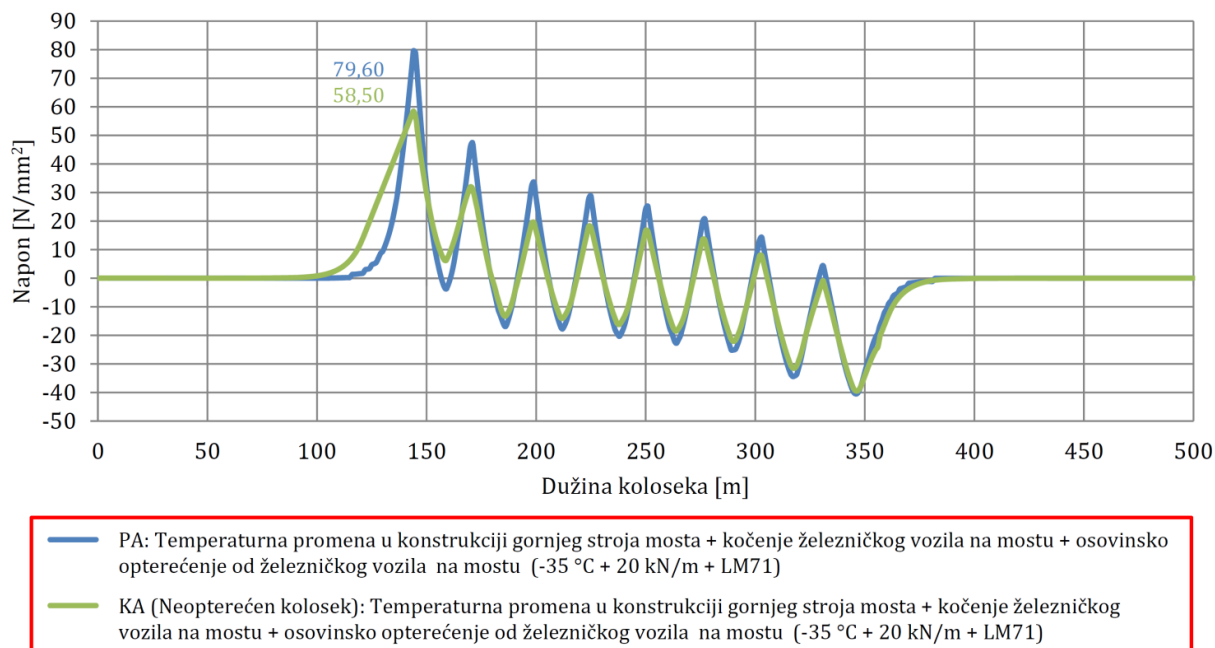
Slika 6.22 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi) [10]

Na slikama 6.23, 6.24, 6.25 i 6.26 prikazani su rezultati proračuna ukupnih dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu za uticaje usled temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. Ukupni dodatni naponi određeni kompletnom analizom niži su od ukupnih dodatnih napona određenih pojedinačnom analizom. Generalno, kompletna analiza smanjuje ukupne dodatne napone u kontinualno zavarenim šinama na mostu u poređenju sa pojedinačnom analizom, jer otpor podužnom pomeranju koloseka (opterećen kolosek) kod kompletne analize deluje samo ispod železničkog vozila, za razliku od pojedinačne analize gde deluje na celoj dužini proračunskog modela. U skladu sa tim, kod kompletne analize u letnjim uslovima otpor podužnom pomeranju koloseka ispod železničkog vozila iznosi 60 kN/m za

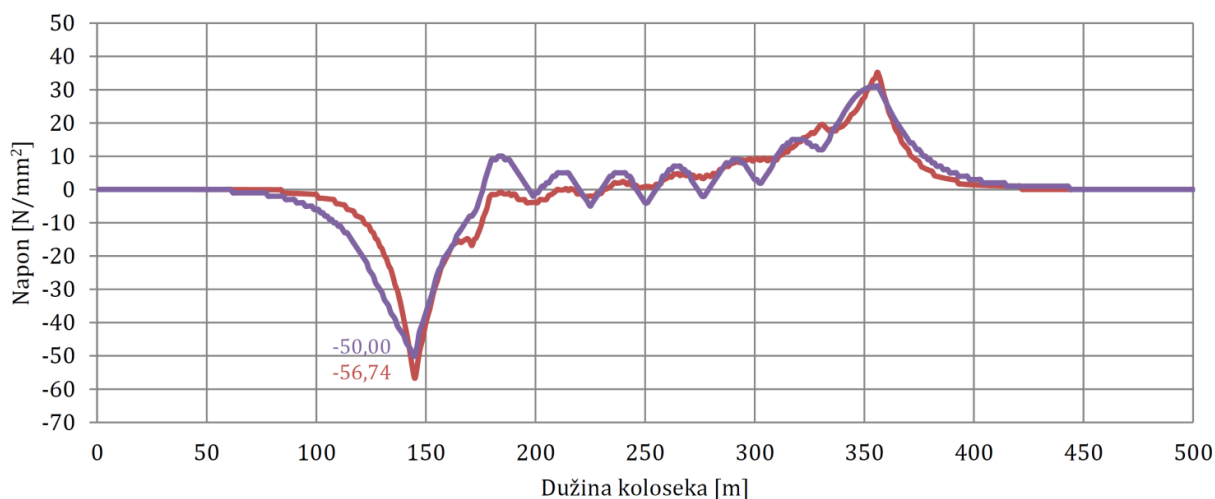
granično relativno pomeranje od 2 mm, dok je otpor podužnom pomeranju koloseka na delu modela koji nije opterećen železničkim vozilom 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Kod pojedinačne analize u letnjim uslovima otpor podužnom pomeranju koloseka iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini proračunskog modela. Sa druge strane, kod kompletne analize u zimskim uslovima otpor podužnom pomeranju koloseka ispod železničkog vozila iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, dok je otpor podužnom pomeranju koloseka na delu modela koji nije opterećen železničkim vozilom 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, kod pojedinačne analize u zimskim uslovima otpor podužnom pomeranju koloseka iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini proračunskog modela [10].



Slika 6.23 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi)

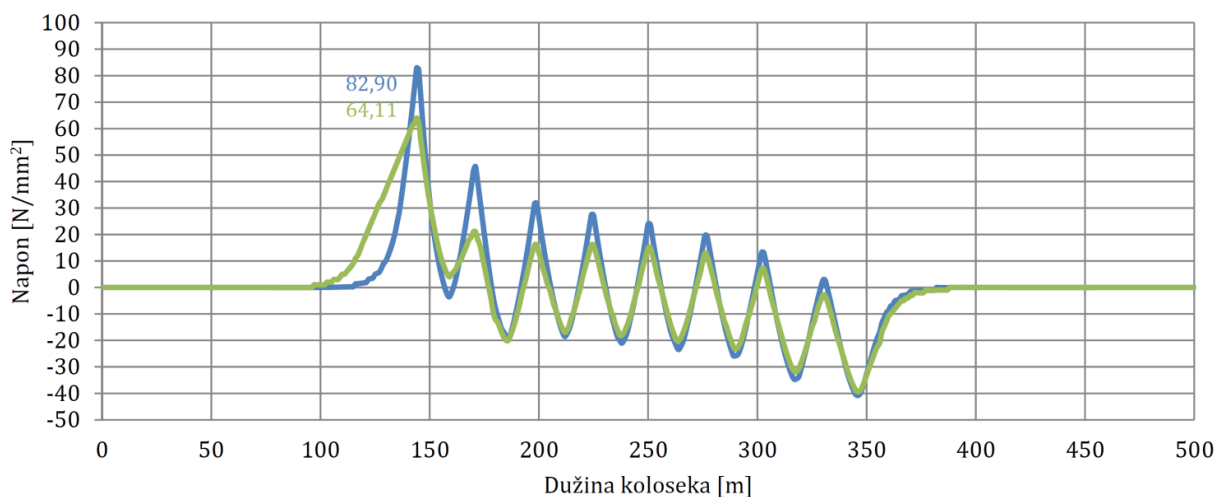


Slika 6.24 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi)



— PA: Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + ubrzanje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (+35 °C + 33 kN/m + LM71)
 — KA (Neopterećen kolosek): Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + ubrzanje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (+35 °C + 33 kN/m + LM71)

Slika 6.25 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (letnji uslovi) [10]



— PA: Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + ubrzanje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (-35 °C + 33 kN/m + LM71)
 — KA (Neopterećen kolosek): Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + ubrzanje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (-35 °C + 33 kN/m + LM71)

Slika 6.26 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) za pojedinačnu i kompletnu analizu (zimski uslovi) [10]

U tabeli 6.4 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona i ukupnih dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu za pojedinačnu i kompletnu analizu. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona iste za obe analize, dok maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona imaju različite vrednosti u zavisnosti od primenjene analize. Takođe, u skladu sa [49] obe metode proračuna mogu se primenjivati pri određivanju dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu. Jedina razlika je u stepenima sigurnosti koje ove dve metode obezbeđuju. Pojedinačna analiza pruža veći stepen sigurnosti zbog pomenutih pojednostavljenja proračunskog modela za opterećen kolosek, dok kompletna analiza pruža manji stepen sigurnosti i znatno realnije vrednosti dodatnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu. U skladu sa tim, ukupni dodatni naponi u letnjim uslovima su do 11,88 %

manji u kompletnoj analizi u poređenju sa pojedinačnom analizom, dok su u zimskim uslovima do 26,51 % manji u kompletnoj analizi u poređenju sa pojedinačnom analizom, za konkretan model interakcije kolosek/most [10].

Tabela 6.4 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona i ukupnih dodatnih napona za pojedinačnu i kompletnu analizu [10]

Krajnji pokretni oslonac mosta	Neopterećen kolosek		Opterećen kolosek (sa ubrzanjem)		Opterećen kolosek (sa kočenjem)	
	Letnji uslovi	Zimski uslovi	Letnji uslovi	Zimski uslovi	Letnji uslovi	Zimski uslovi
Dodatni naponi - PA [N/mm ²]	-20,17	28,07	-56,74	82,90	-52,44	79,60
Dodatni naponi - KA [N/mm ²]	-20,17	28,07	-50,00	64,11	-47,90	58,50
Smanjenje dodatnih napona određenih KA u poređenju sa PA [%]	0	0	-11,88	-22,60	-8,66	-26,51

6.4 Parametarska analiza dodatnih temperaturnih napona

Parametarska analiza dodatnih temperaturnih napona sprovodi se za granične slučajeve dilatacionih dužina mostovskih konstrukcija, koje se mogu izvesti bez ugradnje šinskih dilatacionih sprava u skladu sa UIC Code 774-3 [49], i koje kao takve treba proveriti proračunom interakcije kolosek/most.

U okviru parametarske analize dodatnih temperaturnih napona sprovode se sledeće studije slučaja:

- Studija slučaja 1: Mostovska konstrukcija tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom,
- Studija slučaja 2: Mostovska konstrukcija tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom,
- Studija slučaja 3: Mostovska konstrukcija tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom,
- Studija slučaja 4: Mostovska konstrukcija tipa betonskog kontinualnog nosača raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom,
- Studija slučaja 5: Mostovska konstrukcija tipa betonskih prostih greda u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.

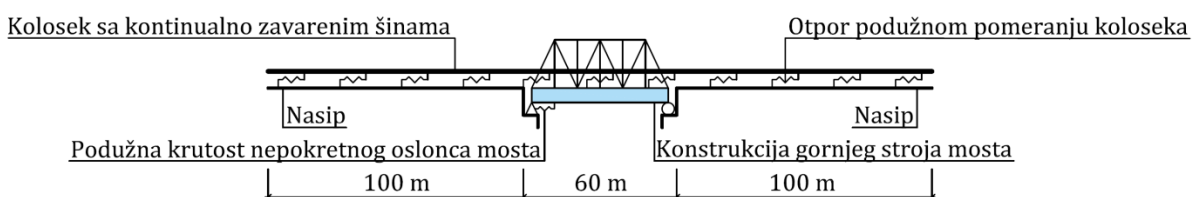
Prve četiri studije slučaja, koje se odnose na granične slučajeve dilatacionih dužina mostovskih konstrukcija u skladu sa [49], sprovode se sa ciljem analize parametara koloseka i mosta kako bi se sagledao i kvantifikovao njihov uticaj na vrednosti dodatnih temperaturnih napona. Peta studija slučaja predstavlja reprezentativni primer mostovskih konstrukcija tipa prostih greda u nizu čija primena je česta kod železničkih mostova velikih dužina, kod kojih može doći do akumuliranja dodatnih temperaturnih napona na mestima iznad krajnjih pokretnih oslonaca mosta, tj. pri prelasku koloseka sa mosta na zemljani trup. Iz tog razloga je od značaja i kod ovakvog tipa mostovskih konstrukcija sprovesti parametarsku analizu dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu.

U nastavku ovog poglavlja za svih pet studija slučaja prikazani su numerički modeli za analizu interakcije kolosek/most, ulazni parametri konstrukcija koloseka i mosta, kao i dobijeni rezultati proračuna. Kod parametara konstrukcije koloseka analiziraju se tri tipa profila šina različitih površina poprečnog preseka i geometrijskih karakteristika, kao i pet varijanti otpora podužnom pomeranju neopterećenog koloseka u letnjim uslovima i šest varijanti otpora

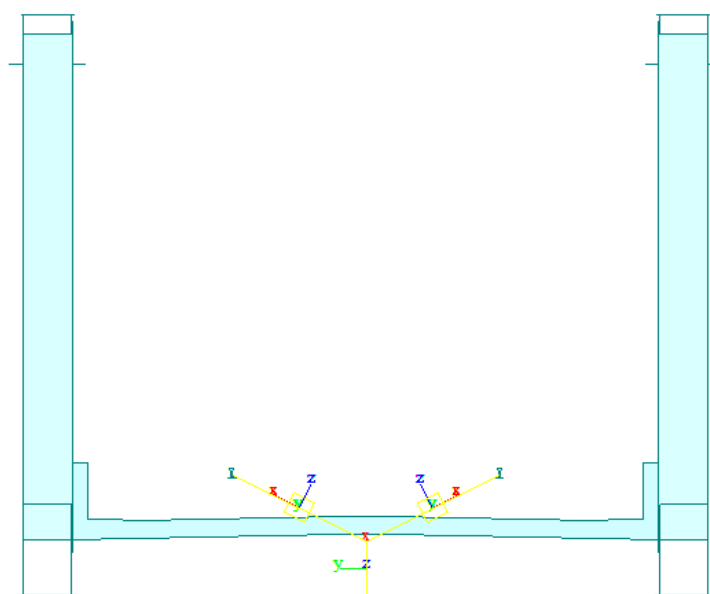
podužnom pomeranju neopterećenog koloseka u zimskim uslovima. Otpori podužnom pomeranju neopterećenog koloseka u letnjim uslovima usvajaju se tako da kolosek proklizava po zastoru od tucanika, osim u slučajevima kada se primenjuju sistemi šinskih pričvršćenja sa redukovanim otporom podužnom pomeranju koloseka manjim od 20 kN/m na ograničenoj dužini koloseka na mostu, kada šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima. U slučaju neopterećenog koloseka u zimskim uslovima kada zastorna prizma zaledi, šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima. Takođe, razmatraju su i otpori podužnom pomeranju neopterećenog koloseka na čvrstoj podlozi, kako u letnjim, tako i u zimskim uslovima, gde u oba slučaja šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima. U slučaju opterećenog koloseka pri kontroli ukupnih dodatnih napona, u letnjim uslovima kolosek proklizava po zastoru od tucanika, dok u zimskim uslovima šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima. Sa druge strane, kod parametara konstrukcije mosta analiziraju se tri varijante dilatacionih dužina mosta u zavisnosti od dužine konstrukcije mosta, kao i pet varijanti podužnih krutosti nepokretnog oslonca mosta. Mostovske konstrukcije usvojene su u skladu sa inženjerskom praksom tako da zadovoljavaju osnovne deformacijske uslove za primenu koloseka sa kontinualno zavarenim šinama i sprovođenje proračuna interakcije kolosek/most prema UIC Code 774-3 [49].

6.4.1 Studija slučaja 1: Mostovska konstrukcija tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

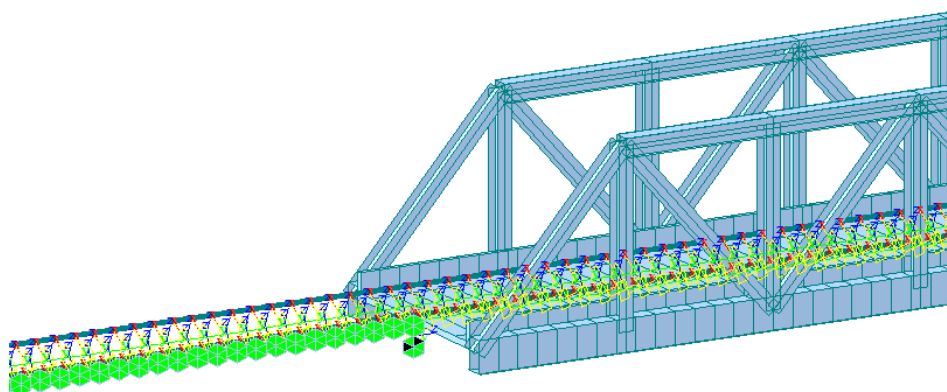
U ovoj studiji slučaja sproveden je proračun interakcije kolosek/most i ispitan je uticaj parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u slučaju mostovske konstrukcije tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom. Na slikama 6.27, 6.28 i 6.29 prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosek/most.



Slika 6.27 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.28 Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.29 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.5 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

Tabela 6.5 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

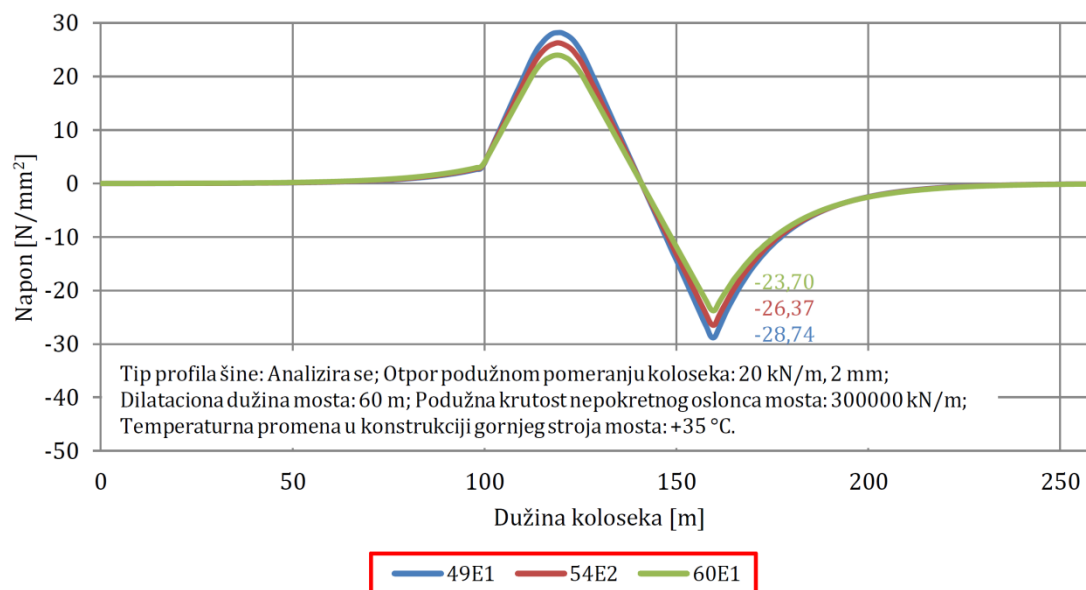
Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (1405)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (604) Rigid elastic link (2) Multi linear elastic link (2654)
Parametri konstrukcije koloseka	
Tip profila šine:	49E1, 54E2, 60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (letnji uslovi):	Varijanta 1: 20 kN/m (na celoj dužini koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje)

Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (letnji uslovi):	60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (zimski uslovi):	Varijanta 1: 30 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 23,33 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 6: ZLR (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (zimski uslovi):	60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	prosta greda
Rasponi i ukupna dužina mosta:	40 m, 50 m, 60 m
Dilatacione dužine mosta:	40 m, 50 m, 60 m
Raspored oslonaca mosta:	N (nepokretno) - P (pokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	0 kN/m, 150000 kN/m, 300000 kN/m, 450000 kN/m, ∞ kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	Gornji pojas: $A = 0,12 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,02 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 3,50 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Dijagonale i vertikale: $A = 0,12 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,01 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 3,40 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Donji pojas: $A = 0,20 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,08 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 5,95 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Kolosečno korito: $A = 3,49 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,22 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 35,95 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Visina i širina poprečnog preseka: $h = 8,5 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta) $W = 11 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)

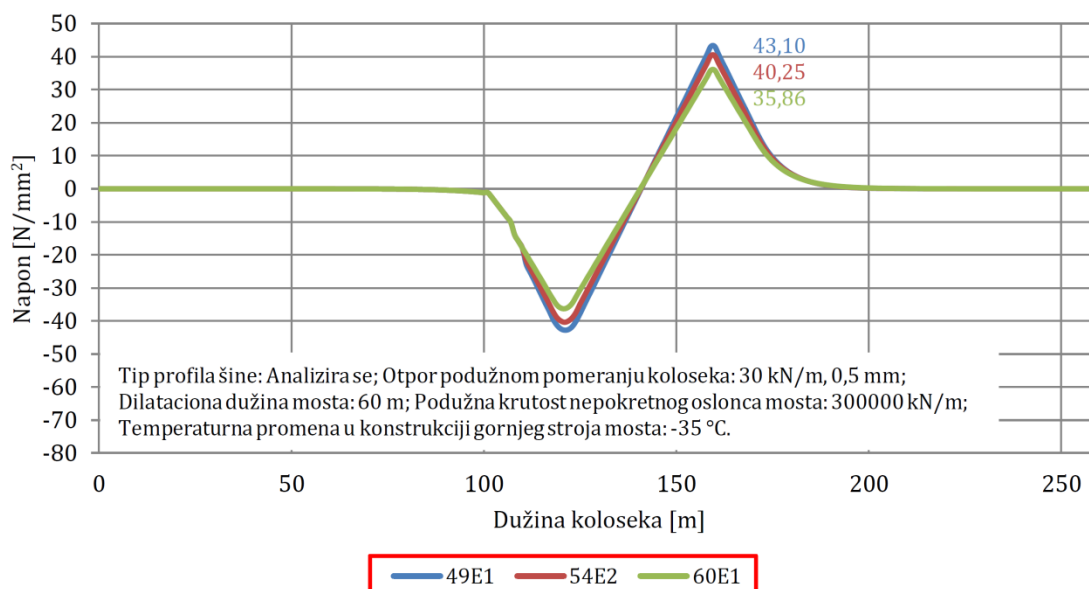
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	Rešetkasta konstrukcija: S355 (klasa čelika) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
	Kolosečno korito: C 35/45 (klasa betona) $E = 3,33 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+30 °C, +35 °C, +40 °C (letnji uslovi) -30 °C, -35 °C, -40 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od tipa profila šine

Na slikama 6.30 i 6.31 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine. Analizirano je tri tipa profila šine: 49E1, 54E2 i 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 300000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.30 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.31 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.6 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem površine poprečnog preseka šine. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 5,04 N/mm² (17,54 %) u letnjim uslovima, odnosno za 7,24 N/mm² (16,80 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1.

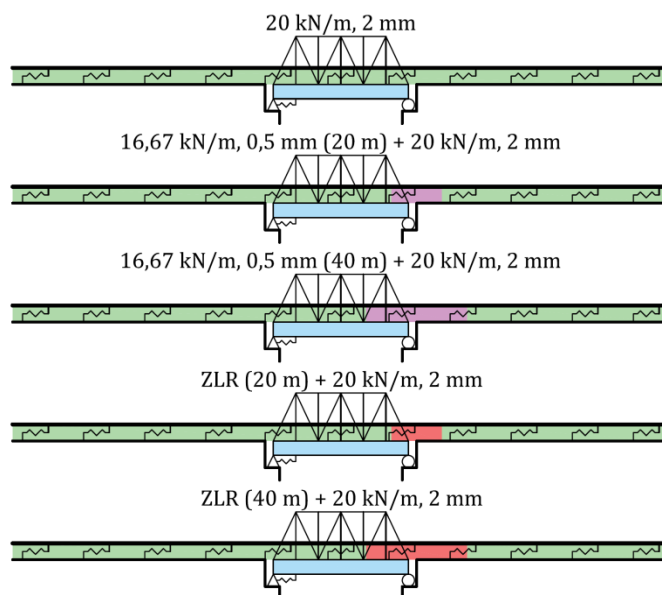
Tabela 6.6 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Tip profila šine	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
49E1	-28,74	43,10	/	/
54E2	-26,37	40,25	-8,25	-6,61
60E1	-23,70	35,86	-17,54	-16,80

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka

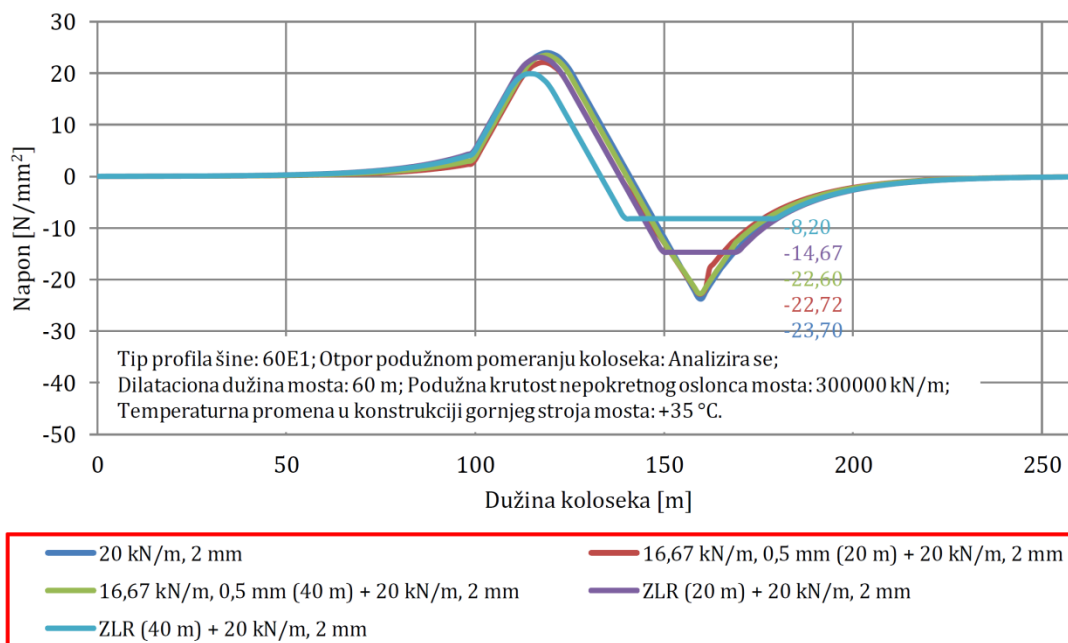
Na slici 6.32 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za pet varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U drugoj i trećoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U četvrtoj i petoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m, dok je

usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 300000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C.



Slika 6.32 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Na slici 6.33 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima (slika 6.32).



Slika 6.33 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.7 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 1,10 N/mm² (4,64 %) u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani

otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 15,50 N/mm² (65,40 %).

Tabela 6.7 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
20 kN/m, 2 mm	-23,70	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-22,72	-4,14
16,67 kN/m, 0,5 mm (40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-22,60	-4,64
ZLR (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-14,67	-38,10
ZLR (40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-8,20	-65,40

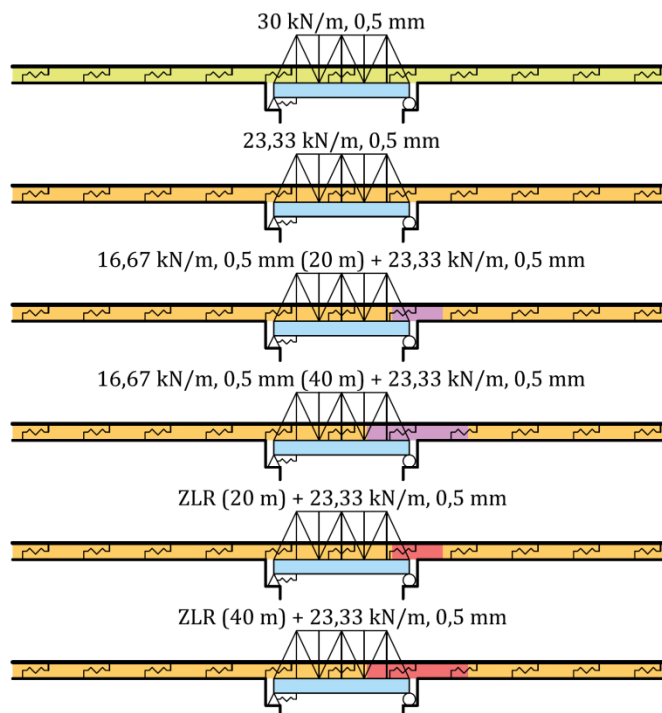
U tabeli 6.8 prikazane su maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna smanjenja sile pritiska za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Sile pritiska određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od +42,5 °C i mostu od +35 °C. Dobijeni rezultati pokazuju da se sila pritiska može smanjiti za 237771 N (12,27 %) u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint).

Tabela 6.8 Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Sila pritiska [N]	Smanjenje sile pritiska [%]
20 kN/m, 2 mm	-1938057	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1923022	-0,78
16,67 kN/m, 0,5 mm (40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1921182	-0,87
ZLR (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1799535	-7,15
ZLR (40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1700286	-12,27

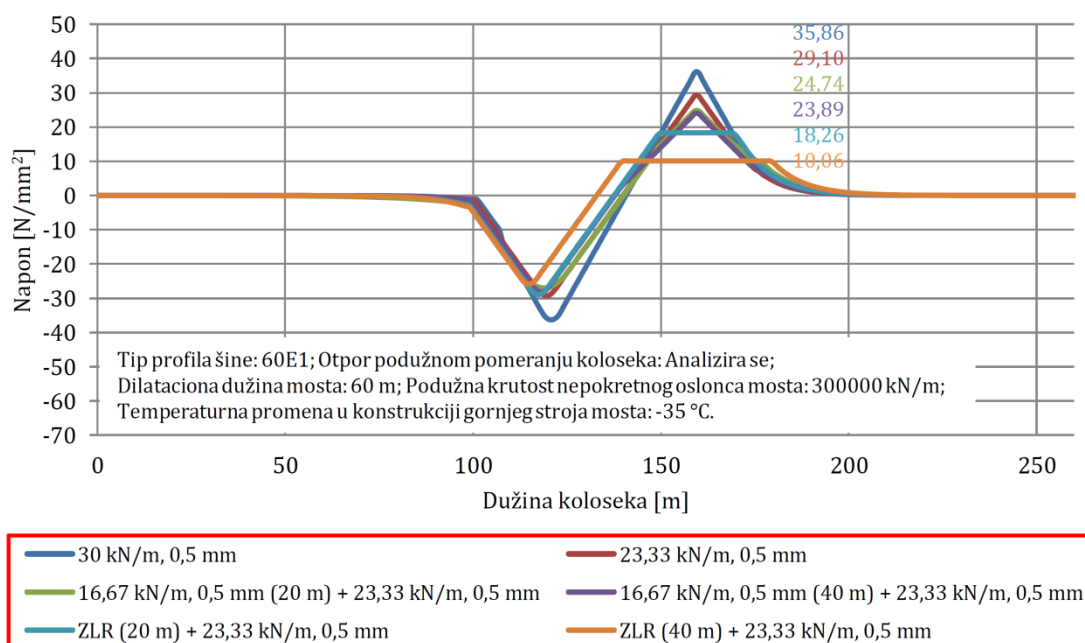
Na slici 6.34 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za šest varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U drugoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U trećoj i četvrtoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U petoj i šestoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm

(šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 300000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

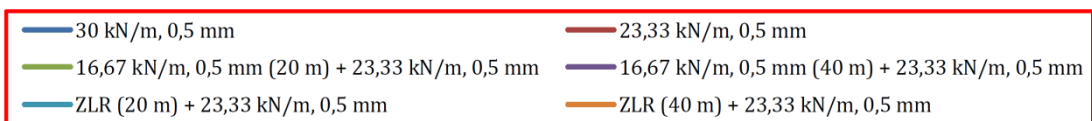
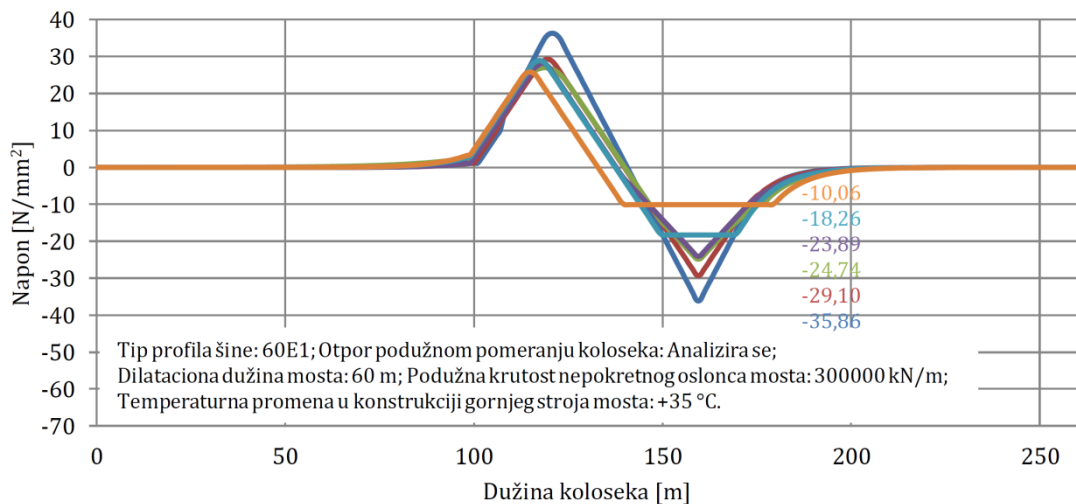


Slika 6.34 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Na slikama 6.35 i 6.36 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima, kao i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima (slika 6.34).



Slika 6.35 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



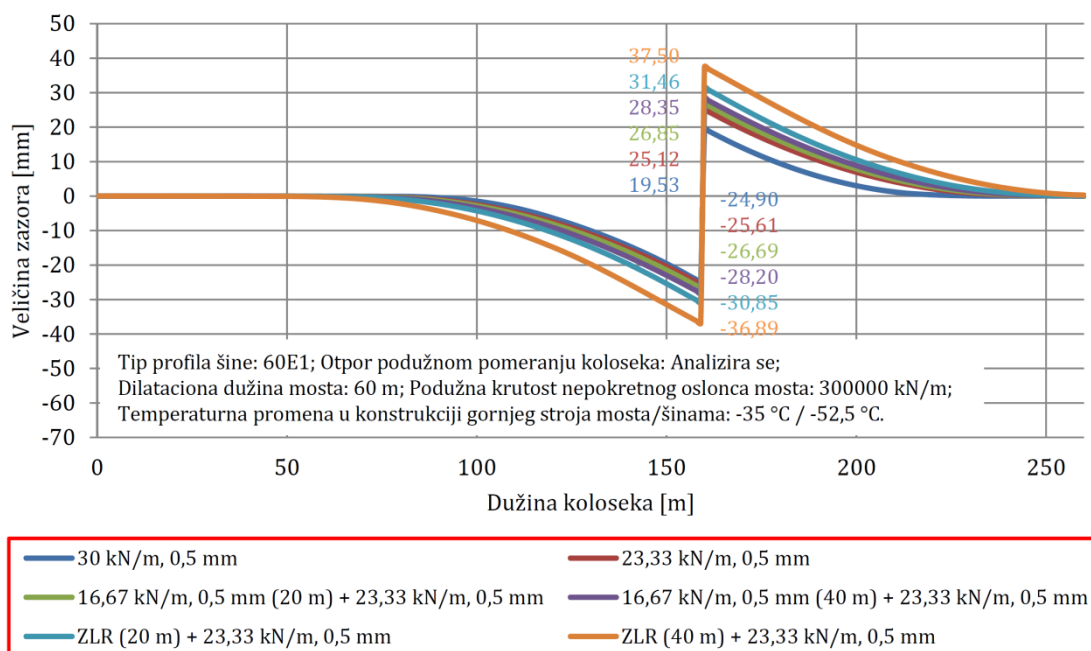
Slika 6.36 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.9 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 6,76 N/mm² (18,85 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 11,97 N/mm² (33,38 %). Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 25,80 N/mm² (71,95 %).

Tabela 6.9 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
30 kN/m, 0,5 mm	±35,86	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	±29,10	-18,85
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±24,74	-31,01
16,67 kN/m, 0,5 mm (40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±23,89	-33,38
ZLR (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±18,26	-49,08
ZLR (40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±10,06	-71,95

Kao ograničavajući faktor pri smanjenju otpora podužnom pomeranju koloseka treba uzeti u obzir veličinu zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima. Na slici 6.37 prikazane su vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi u zimskim uslovima. Smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka dovodi do povećanja veličine zazora pri pucanju šine.



Slika 6.37 Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.10 prikazane su maksimalne vrednosti veličine zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna povećanja veličine zazora za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Veličine zazora određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od -52,5 °C i mostu od -35 °C.

Tabela 6.10 Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

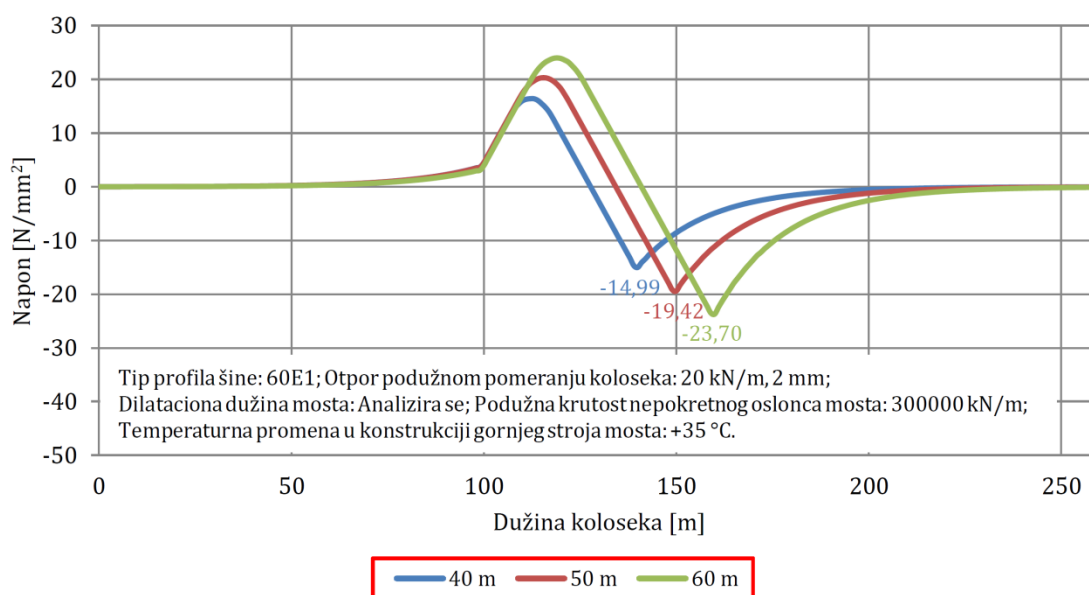
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Veličina zazora pri pucanju šine [mm]	Povećanje veličine zazora pri pucanju šine [%]
30 kN/m, 0,5 mm	44,43	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	50,73	+14,18
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	53,54	+20,50
16,67 kN/m, 0,5 mm (40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	56,55	+27,28
ZLR (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	62,31	+40,24
ZLR (40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	74,39	+67,43

Dobijeni rezultati pokazuju da se veličina zazora pri pucanju šine može povećati za 6,30 mm (14,18 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 12,12 mm (27,28 %). Takođe, u slučaju kada se iznad

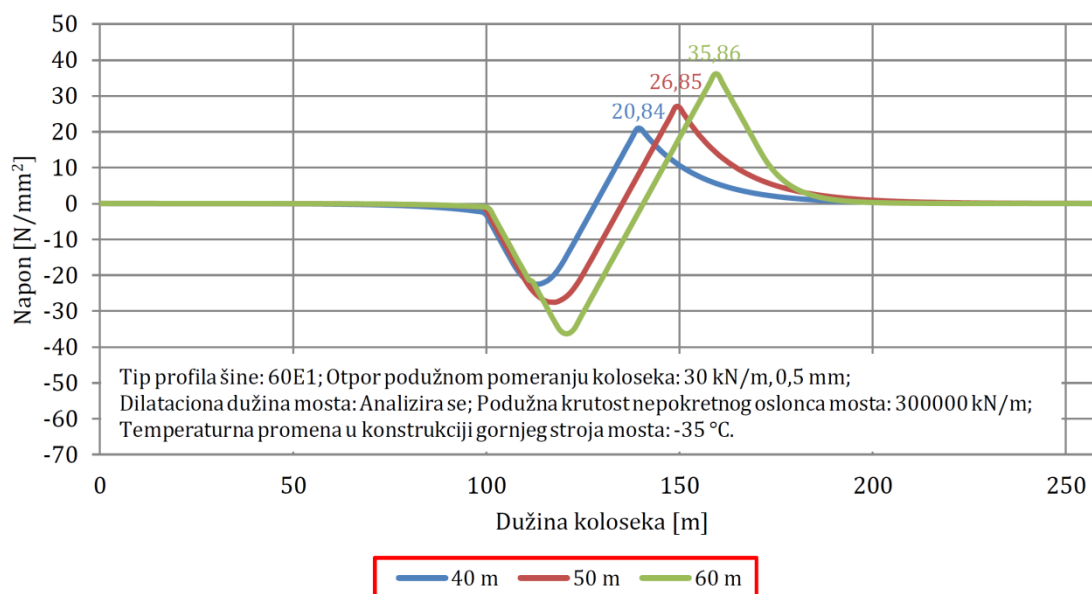
pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 29,96 mm (67,43 %).

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od dilatacione dužine mosta

Na slikama 6.38 i 6.39 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od dilatacione dužine mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 300000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.38 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.39 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

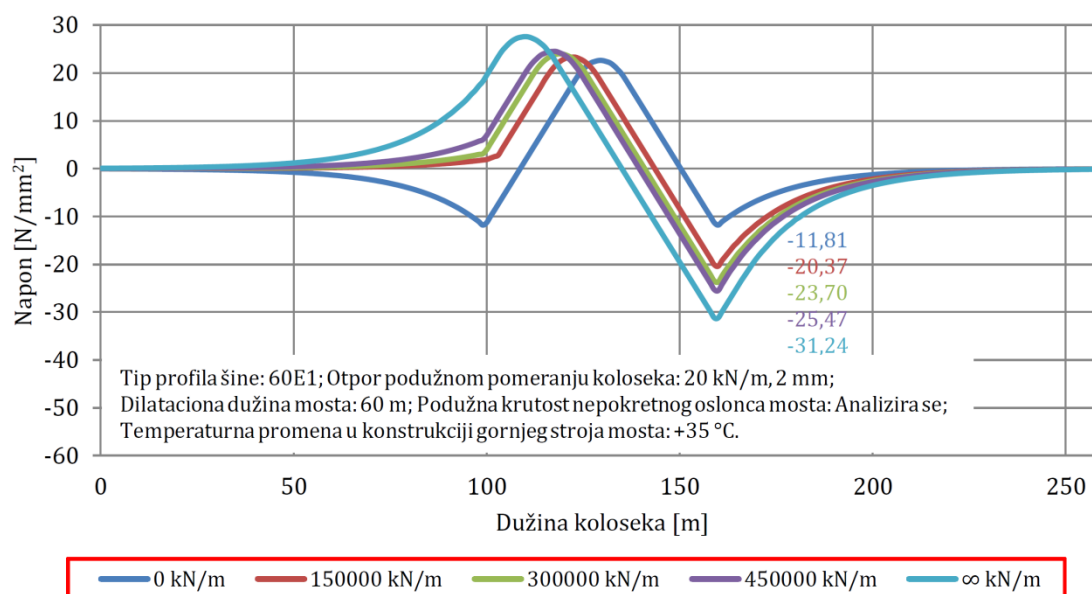
U tabeli 6.11 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojene dilatacione dužine mosta, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa smanjenjem dilatacione dužine mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju smanjenja dilatacione dužine mosta za 10 m dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 4,28 N/mm² (18,06 %) u letnjim uslovima, odnosno za 9,01 N/mm² (25,13 %) u zimskim uslovima.

Tabela 6.11 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

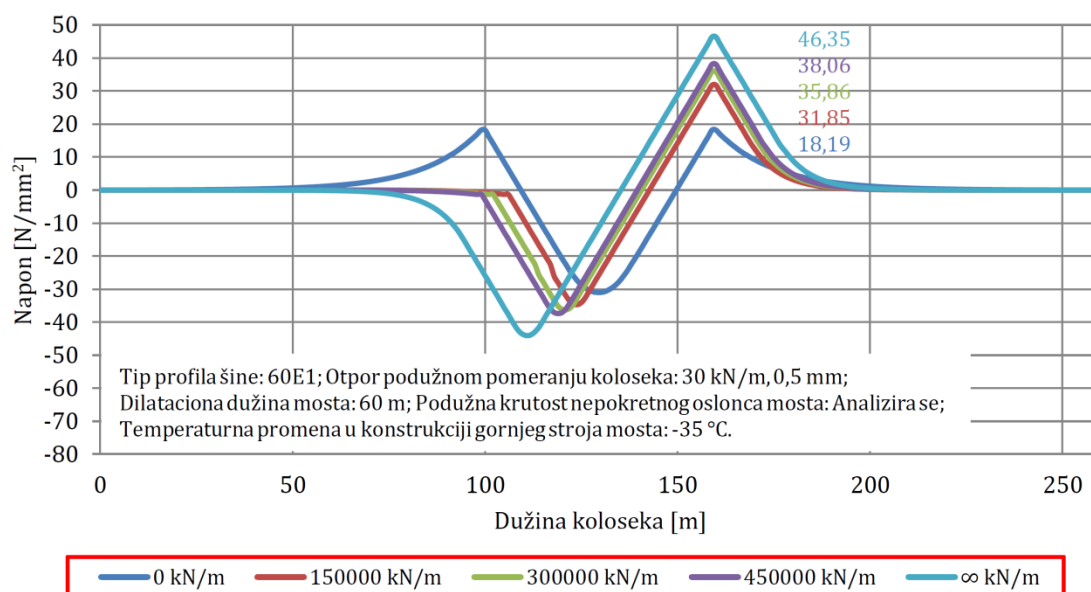
Dilataciona dužina mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
60 m	-23,70	35,86	/	/
50 m	-19,42	26,85	-18,06	-25,13
40 m	-14,99	20,84	-36,75	-41,89

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta

Na slikama 6.40 i 6.41 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimске uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Analizirane granične vrednosti podužne krutosti oslonca mosta od 0 kN/m i ∞ kN/m predstavljaju teorijske vrednosti koje se odnose na idealno podužno pokretan, odnosno idealno podužno nepokretan oslonac mosta.



Slika 6.40 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.41 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.12 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, kao i procentualno povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem/smanjenjem podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U teorijskom smislu, dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 11,89 N/mm² (50,17 %) u letnjim uslovima, odnosno za 17,67 N/mm² (49,27 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta smanji sa 300000 kN/m na 0 kN/m. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 7,54 N/mm² (31,81 %) u letnjim uslovima, odnosno za 10,49 N/mm² (29,25 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta poveća sa 300000 kN/m na ∞ kN/m.

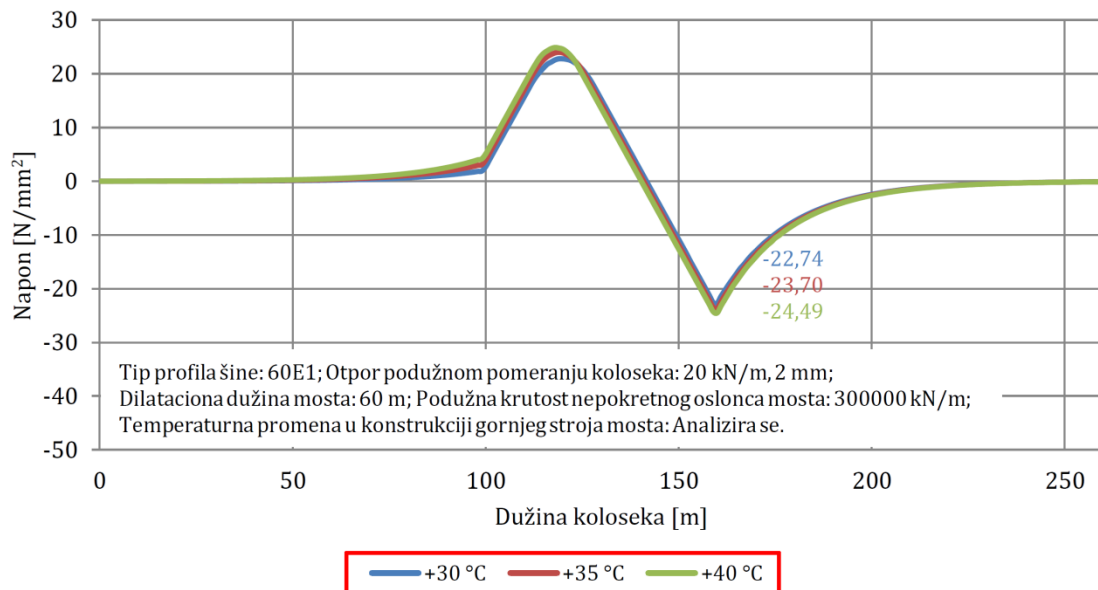
Tabela 6.12 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
∞ kN/m	-31,24	46,35	+31,81	+29,25
450000 kN/m	-25,47	38,06	+7,47	+6,13
300000 kN/m	-23,70	35,86	/	/
150000 kN/m	-20,37	31,85	-14,05	-11,18
0 kN/m	-11,81	18,19	-50,17	-49,27

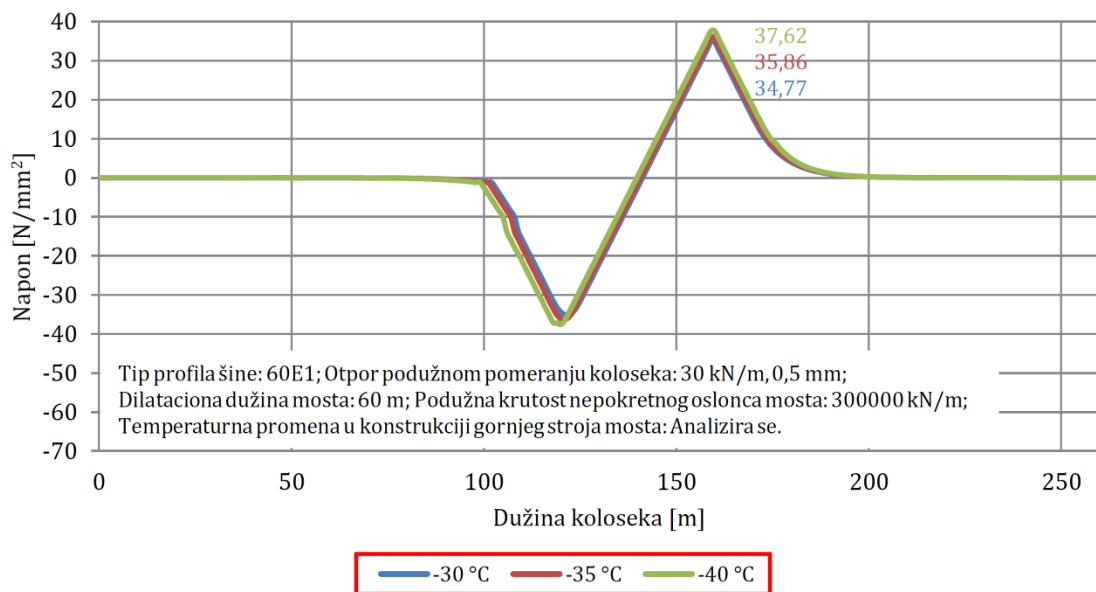
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Na slikama 6.42 i 6.43 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za

granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m, dok podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 300000 kN/m.



Slika 6.42 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.43 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.13 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i procentualna povećanja/smanjenja dodatnih temperaturnih napona usled povećanja/smanjenjem temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 0,96 N/mm² (4,05 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,09 N/mm² (3,04 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta smanji sa ±35 °C na ±30 °C. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 0,79 N/mm² (3,33 %) u letnjim uslovima,

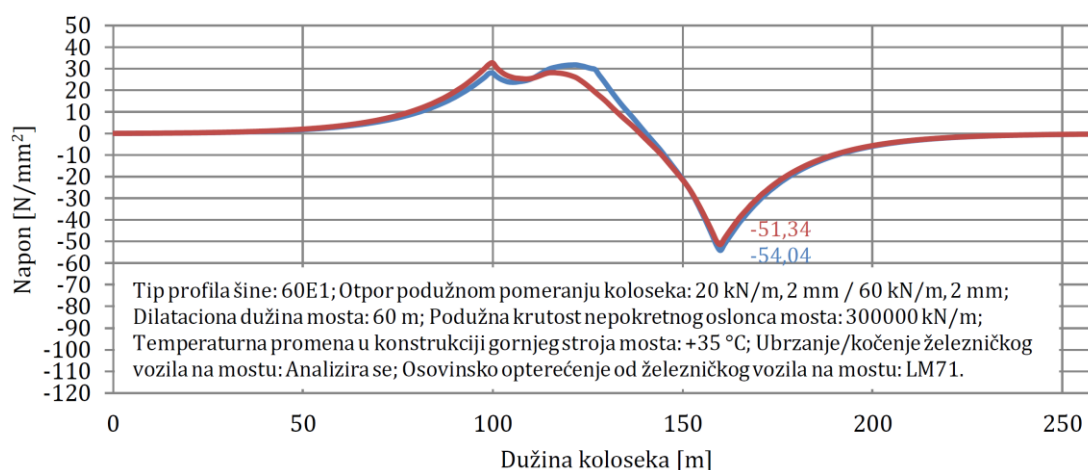
odnosno za 1,76 N/mm² (4,91 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta poveća sa ±35 °C na ±40 °C.

Tabela 6.13 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
±40 °C	-24,49	37,62	+3,33	+4,91
±35 °C	-23,70	35,86	/	/
±30 °C	-22,74	34,77	-4,05	-3,04

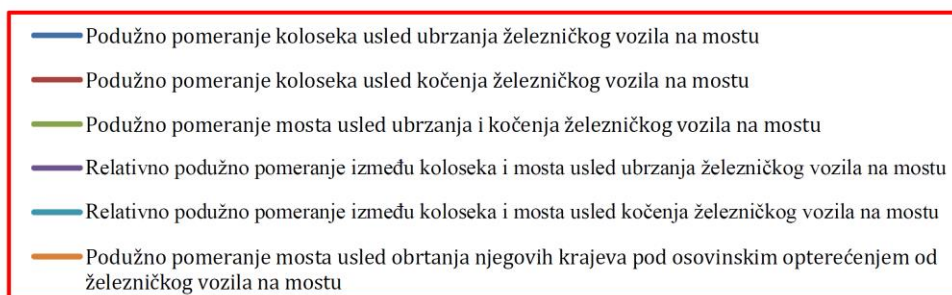
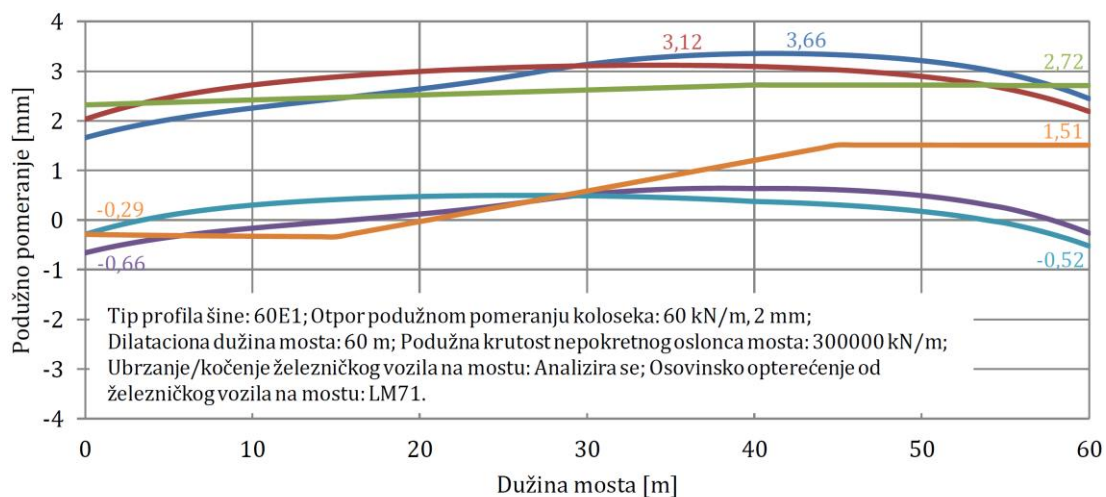
Ukupni dodatni naponi i podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta

Na slikama 6.44 i 6.45 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti ukupnih dodatnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka, dok je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 300000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), dok opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.

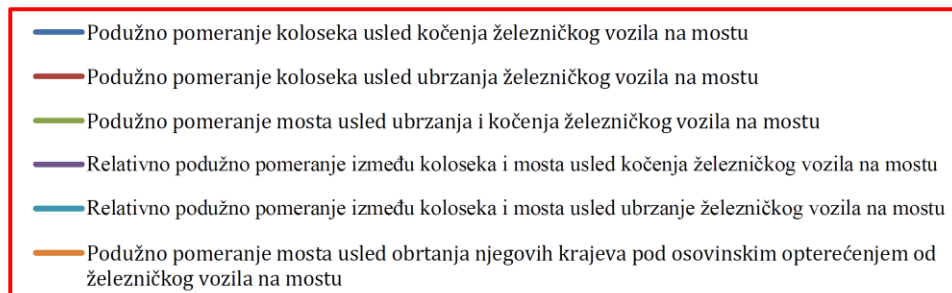
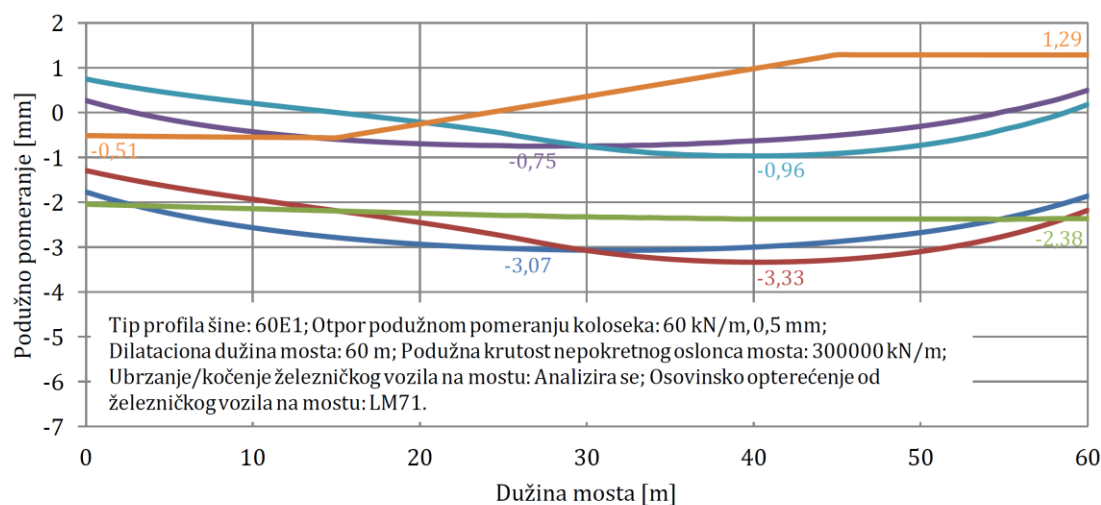


- Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + ubrzanje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (+35 °C + 33 kN/m + LM71)
- Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta + kočenje železničkog vozila na mostu + osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu (+35 °C + 20 kN/m + LM71)

Slika 6.44 Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.46 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.47 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

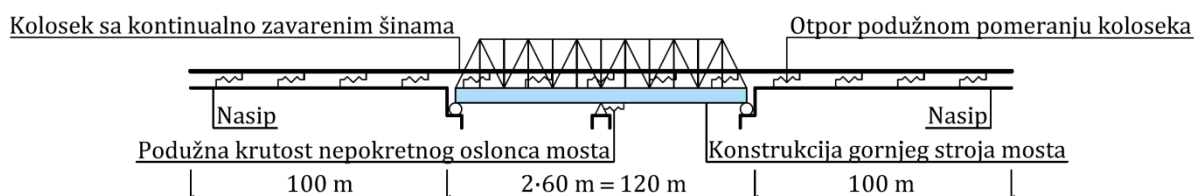
U tabeli 6.15 prikazane su maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima podužnih pomeranja. U skladu sa dobijenim rezultatima, podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta zadovoljavaju dozvoljene vrednosti podužnih pomeranja.

Tabela 6.15 Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - čelična prosta greda raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom

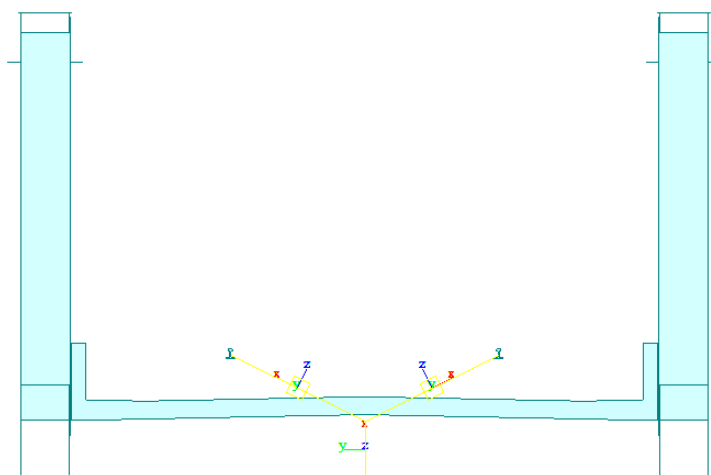
Konstrukcija (opterećenje)	Podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	2,72	≤ 5	2,38	≤ 5
Kolosek/most (ubrzanje)	0,66	≤ 4	0,96	≤ 4
Kolosek/most (kočenje)	0,52	≤ 4	0,75	≤ 4
Most (LM71)	1,51	≤ 8	1,29	≤ 8

6.4.2 Studija slučaja 2: Mostovska konstrukcija tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

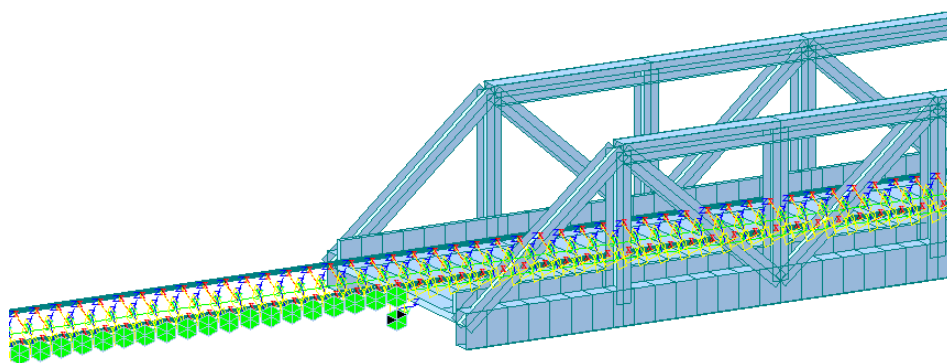
U ovoj studiji slučaja sproveden je proračun interakcije kolosek/most i ispitan je uticaj parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u slučaju mostovske konstrukcije tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom. Na slikama 6.48, 6.49 i 6.50 prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosek/most.



Slika 6.48 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.49 Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.50 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.16 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

Tabela 6.16 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

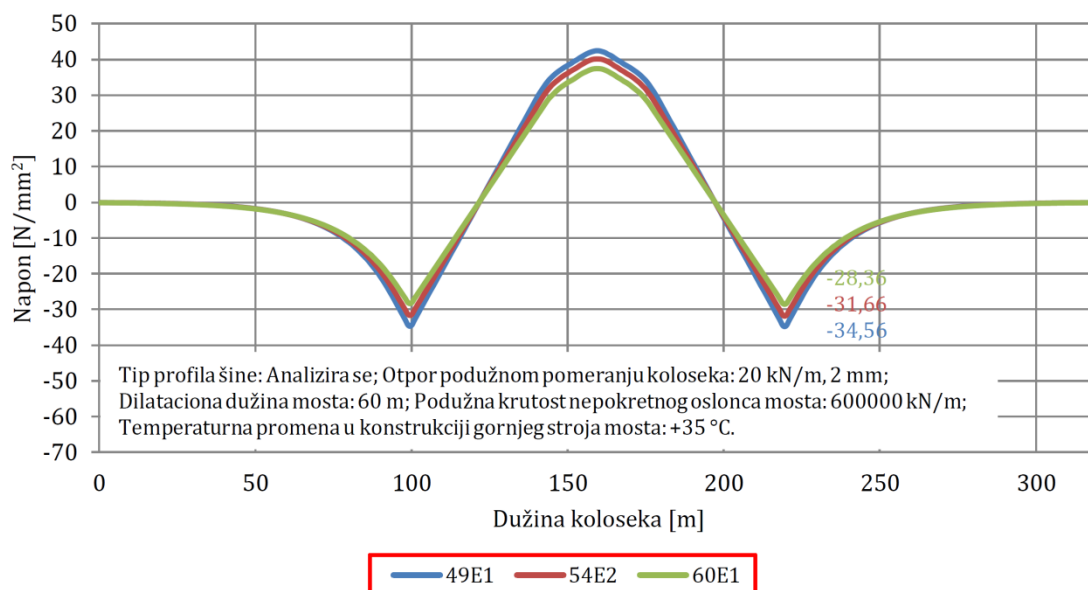
Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (1613)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (605) Rigid elastic link (3) Multi linear elastic link (2895)
Parametri konstrukcije koloseka	
Tip profila šine:	49E1, 54E2, 60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (letnji uslovi):	Varijanta 1: 20 kN/m (na celoj dužini koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje)

Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (letnji uslovi):	60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (zimski uslovi):	Varijanta 1: 30 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 23,33 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 6: ZLR (na dužini koloseka od 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (zimski uslovi):	60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	kontinualni nosač
Rasponi i ukupna dužina mosta:	2·40 m = 80 m, 2·50 m = 100 m, 2·60 m = 120 m
Dilatacione dužine mosta:	40 m, 50 m, 60 m
Raspored oslonaca mosta:	P (pokretno) - N (nepokretno) - P (pokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	0 kN/m, 450000 kN/m, 600000 kN/m, 750000 kN/m, ∞ kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	Gornji pojas: $A = 0,12 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,02 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 3,50 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Dijagonale i vertikale: $A = 0,12 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,01 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 3,40 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Donji pojas: $A = 0,20 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,08 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 5,95 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Kolosečno korito: $A = 3,49 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 0,22 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 35,95 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) Visina i širina poprečnog preseka: $h = 6,5 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta) $W = 11 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)

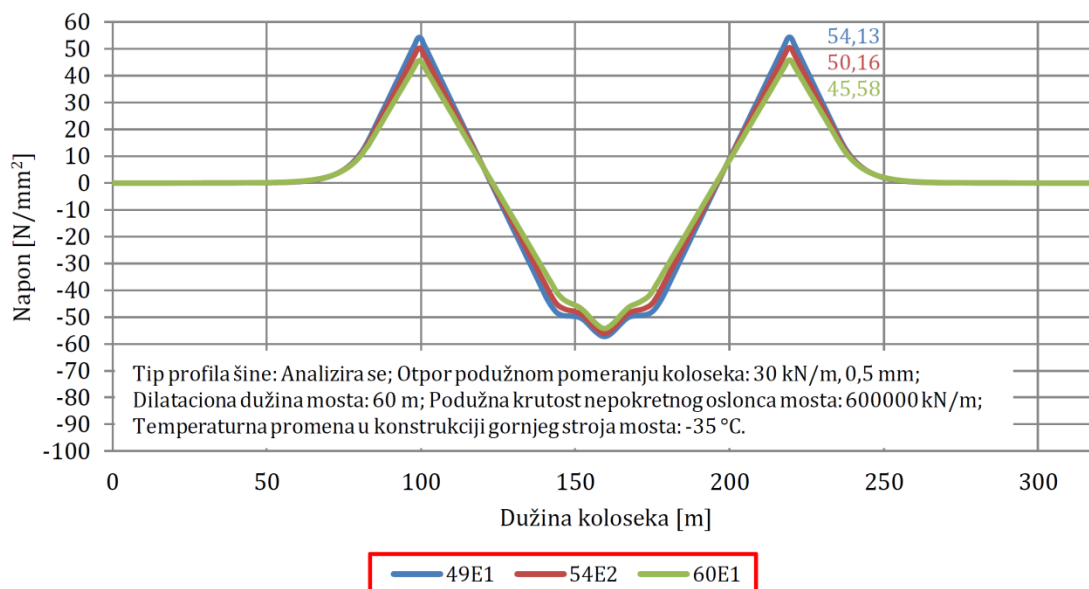
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	Rešetkasta konstrukcija: S355 (klasa čelika) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala) Kolosečno korito: C 35/45 (klasa betona) $E = 3,33 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+30 °C, +35 °C, +40 °C (letnji uslovi) -30 °C, -35 °C, -40 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od tipa profila šine

Na slikama 6.51 i 6.52 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine. Analizirano je tri tipa profila šine: 49E1, 54E2 i 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.51 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.52 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.17 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem površine poprečnog preseka šine. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 6,20 N/mm² (17,94 %) u letnjim uslovima, odnosno za 8,55 N/mm² (15,80 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1.

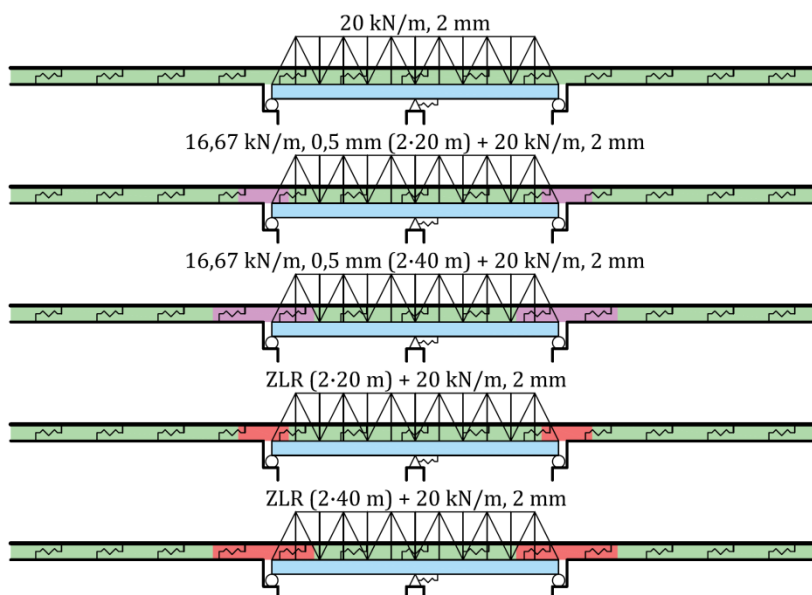
Tabela 6.17 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Tip profila šine	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
49E1	-34,56	54,13	/	/
54E2	-31,66	50,16	-8,39	-7,33
60E1	-28,36	45,58	-17,94	-15,80

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka

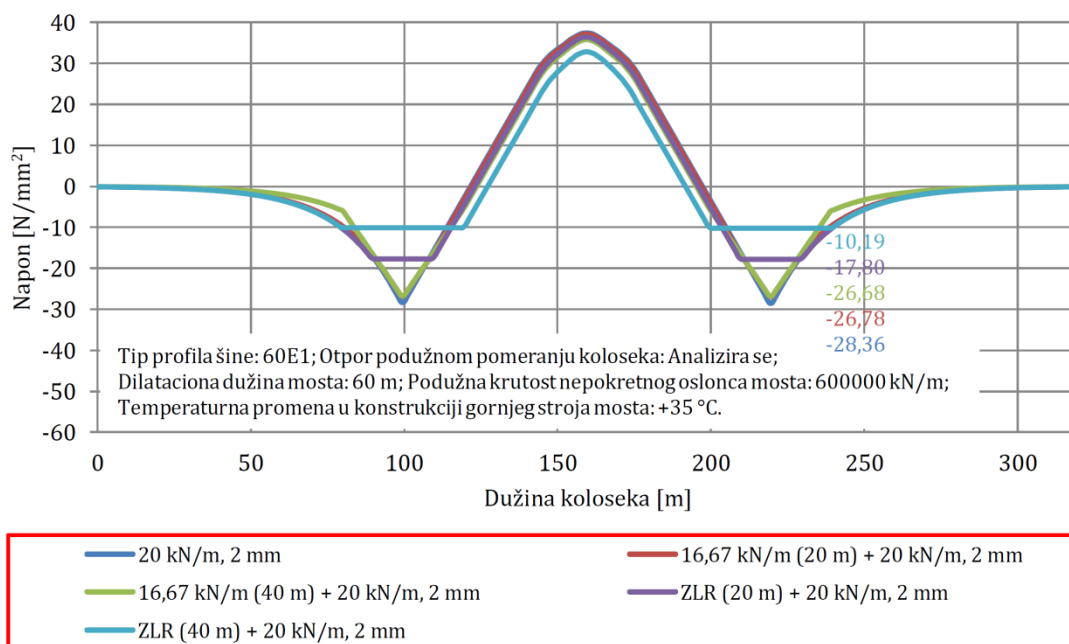
Na slici 6.53 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za pet varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U drugoj i trećoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U četvrtoj i petoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60

m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C.



Slika 6.53 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Na slici 6.54 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima (slika 6.53).



Slika 6.54 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.18 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 1,68 N/mm² (5,92 %) u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani

otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 18,17 N/mm² (64,07 %).

Tabela 6.18 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
20 kN/m, 2 mm	-28,36	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-26,78	-5,57
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-26,68	-5,92
ZLR (2·20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-17,80	-37,24
ZLR (2·40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-10,19	-64,07

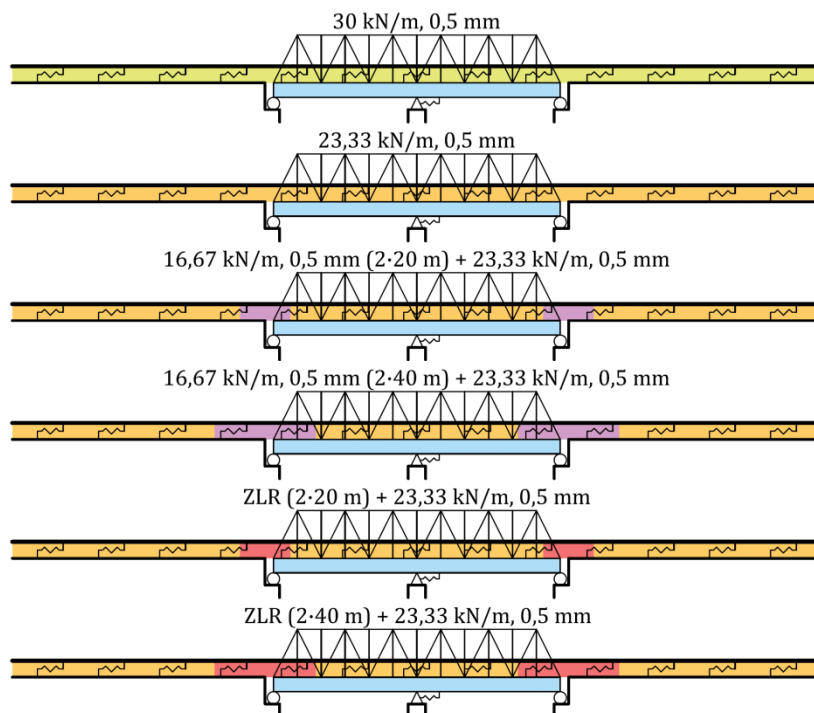
U tabeli 6.19 prikazane su maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna smanjenja sile pritiska za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Sile pritiska određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od +42,5 °C i mostu od +35 °C. Dobijeni rezultati pokazuju da se sila pritiska može smanjiti za 278728 N (13,87 %) u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint).

Tabela 6.19 Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Sila pritiska [N]	Smanjenje sile pritiska [%]
20 kN/m, 2 mm	-2009502	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1985264	-1,21
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1983730	-1,28
ZLR (2·20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1847511	-8,06
ZLR (2·40 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1730774	-13,87

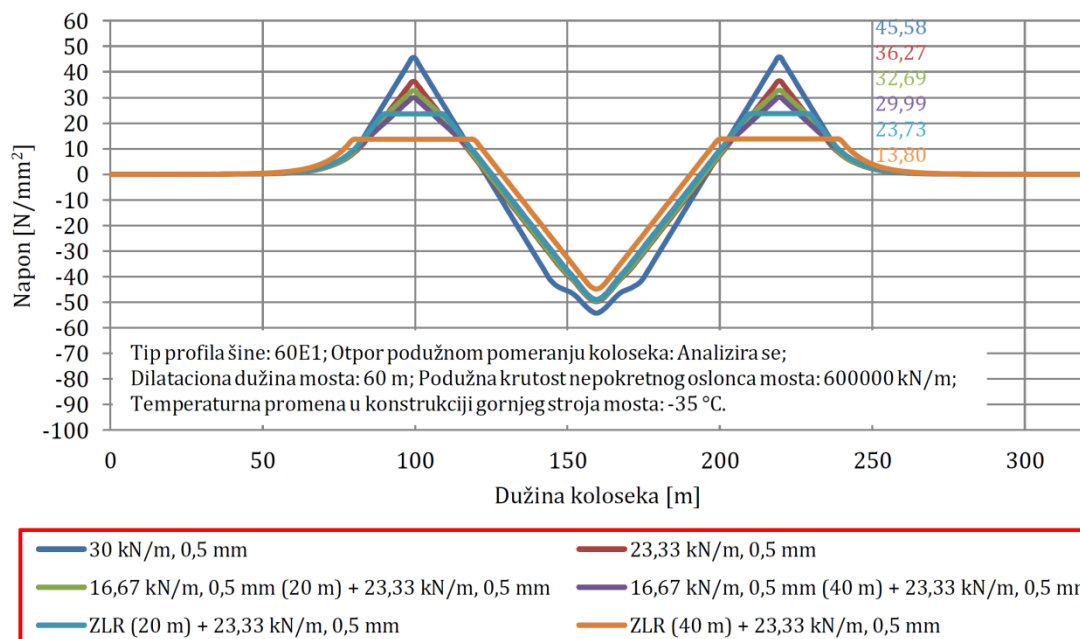
Na slici 6.55 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za šest varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U drugoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U trećoj i četvrtoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U petoj i šestoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m / 40 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm

(šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

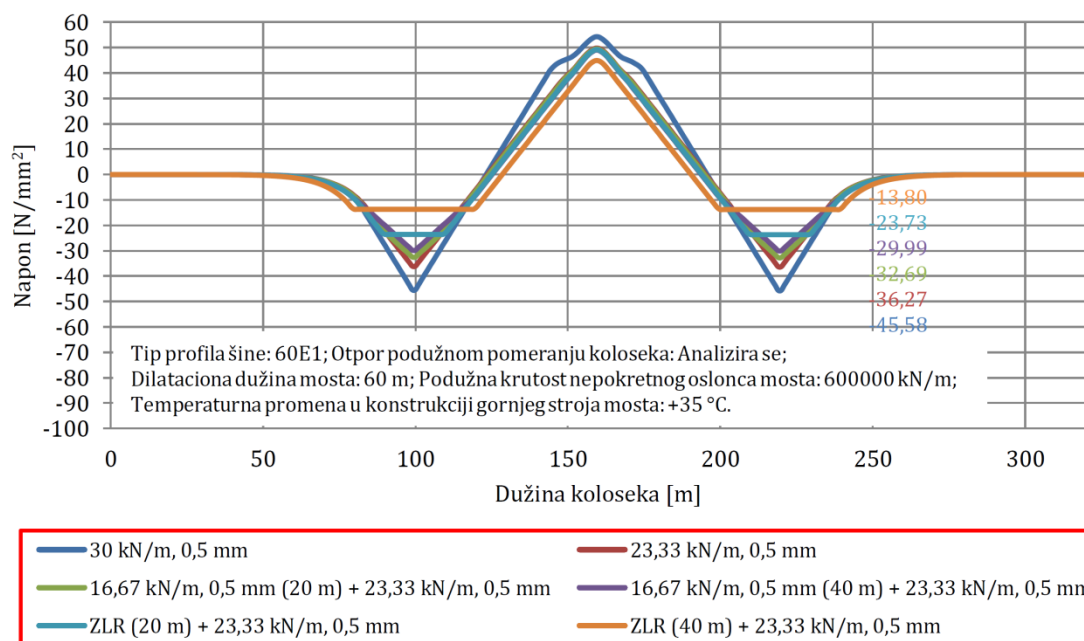


Slika 6.55 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60\text{ m} = 120\text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Na slikama 6.56 i 6.57 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima, kao i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima (slika 6.55).



Slika 6.56 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60\text{ m} = 120\text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



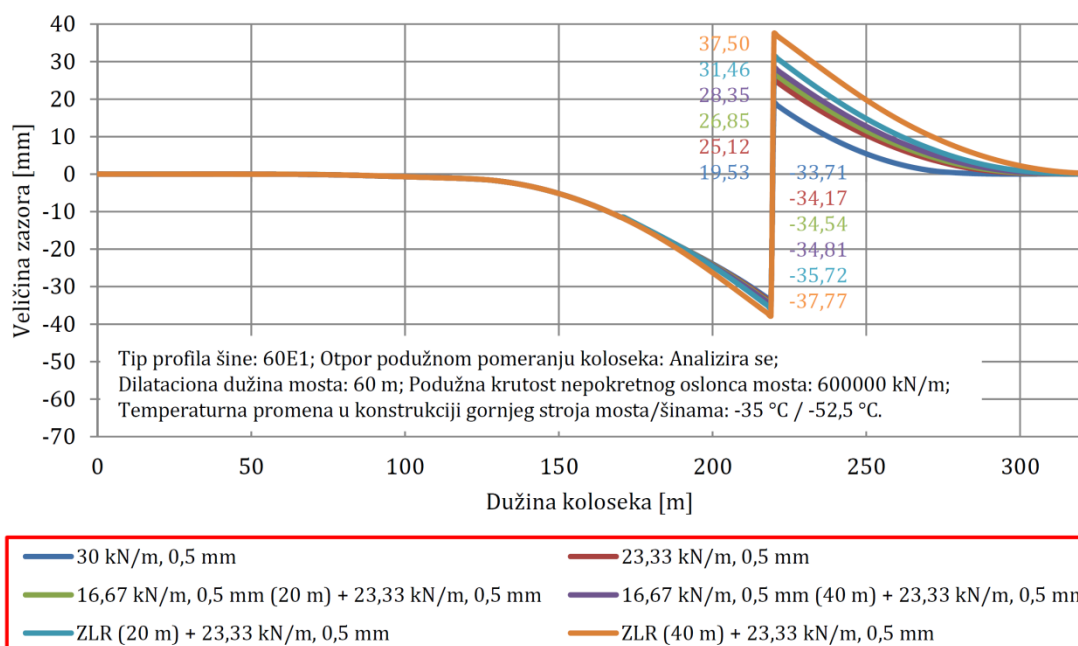
Slika 6.57 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.20 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 9,31 N/mm² (20,43 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 15,59 N/mm² (34,20 %). Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 31,78 N/mm² (69,72 %).

Tabela 6.20 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
30 kN/m, 0,5 mm	±45,58	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	±36,27	-20,43
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±32,69	-28,28
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±29,99	-34,20
ZLR (2·20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±23,73	-47,94
ZLR (2·40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±13,80	-69,72

Kao ograničavajući faktor pri smanjenju otpora podužnom pomeranju koloseka treba uzeti u obzir veličinu zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima. Na slici 6.58 prikazane su vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi u zimskim uslovima. Smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka dovodi do povećanja veličine zazora pri pucanju šine.



Slika 6.58 Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.21 prikazane su maksimalne vrednosti veličine zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna povećanja veličine zazora za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Veličine zazora određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od $-52,5 \text{ °C}$ i mostu od -35 °C .

Tabela 6.21 Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

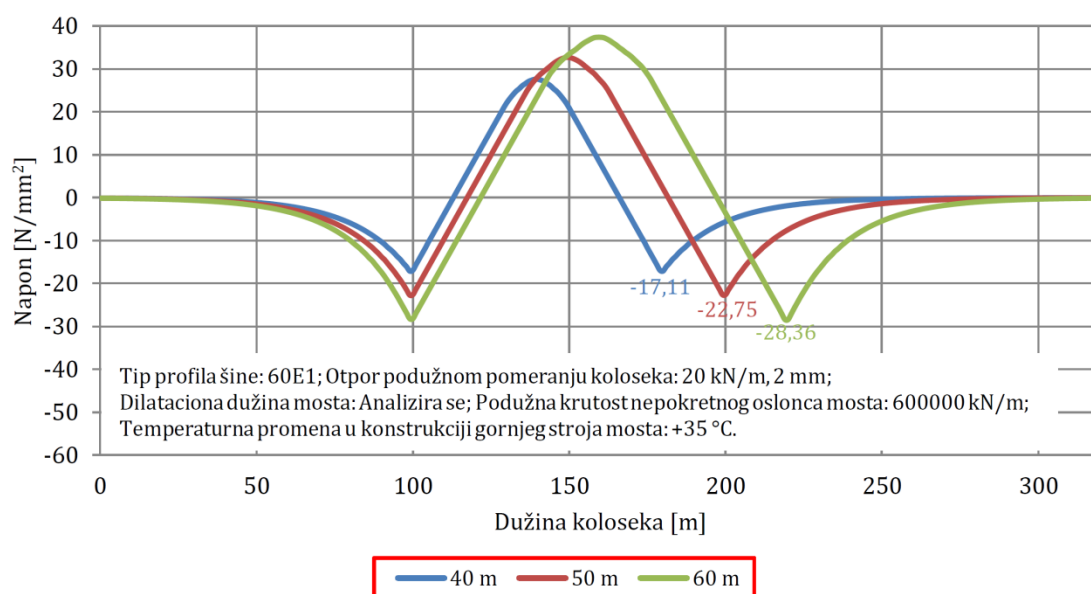
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Veličina zazora pri pucanju šine [mm]	Povećanje veličine zazora pri pucanju šine [%]
30 kN/m, 0,5 mm	53,24	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	59,29	+11,36
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	61,39	+15,31
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	63,16	+18,63
ZLR (2·20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	67,18	+26,18
ZLR (2·40 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	75,27	+41,38

Dobijeni rezultati pokazuju da se veličina zazora pri pucanju šine može povećati za 6,05 mm (11,36 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 9,92 mm (18,63 %). Takođe, u slučaju kada

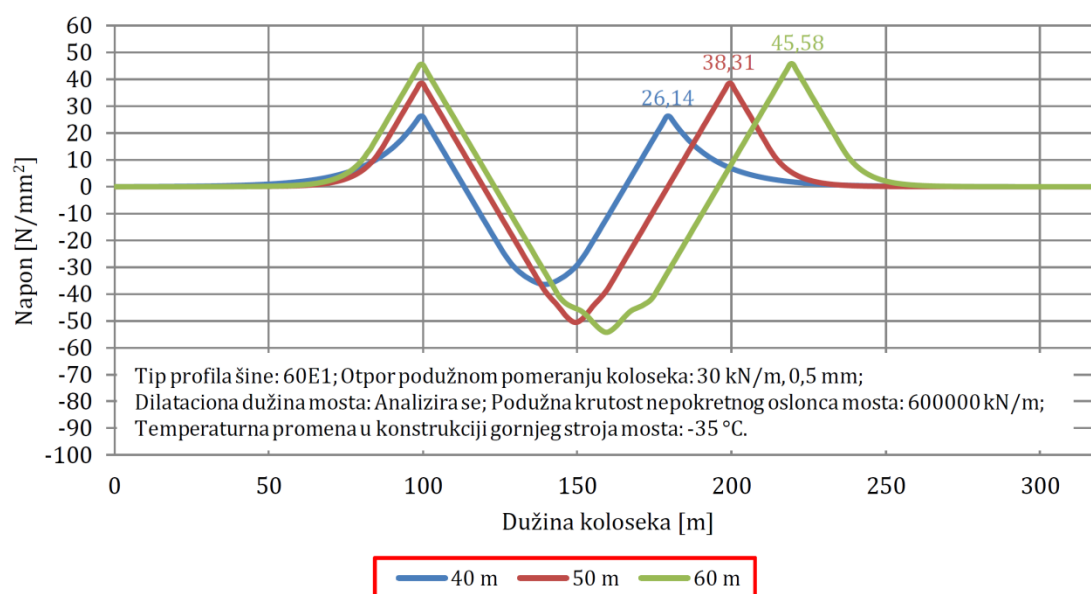
se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 22,03 mm (41,38 %).

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od dilatacione dužine mosta

Na slikama 6.59 i 6.60 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od dilatacione dužine mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 600000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.59 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.60 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

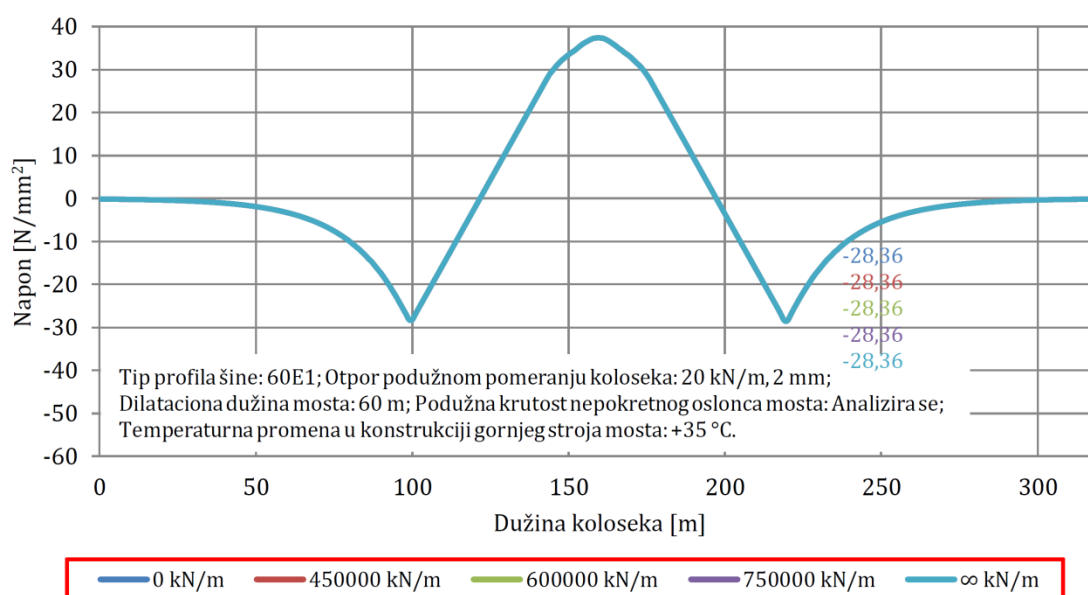
U tabeli 6.22 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojene dilatacione dužine mosta, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa smanjenjem dilatacione dužine mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju smanjenja dilatacione dužine mosta za 10 m dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 5,61 N/mm² (19,78 %) u letnjim uslovima, odnosno za 7,27 N/mm² (15,95 %) u zimskim uslovima.

Tabela 6.22 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

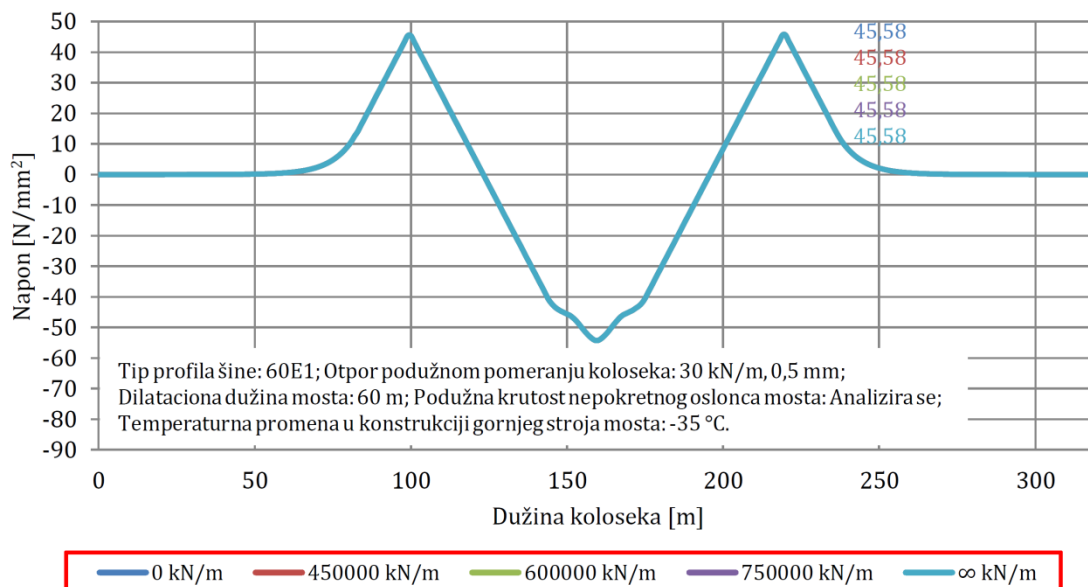
Dilataciona dužina mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
60 m	-28,36	45,58	/	/
50 m	-22,75	38,31	-19,78	-15,95
40 m	-17,11	26,14	-39,67	-42,65

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta

Na slikama 6.61 i 6.62 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimске uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 120 m, dok dilatacione dužine mosta iznose 60 m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Analizirane granične vrednosti podužne krutosti oslonca mosta od 0 kN/m i ∞ kN/m predstavljaju teorijske vrednosti koje se odnose na idealno podužno pokretan, odnosno idealno podužno nepokretan oslonac mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi ne menjaju u zavisnosti od promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. Razlog je taj što je konstrukcija mosta simetrična. U slučajevima kada je konstrukcija mosta asimetrična, tada postoji i promena vrednosti dodatnih temperaturnih napona usled promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta.



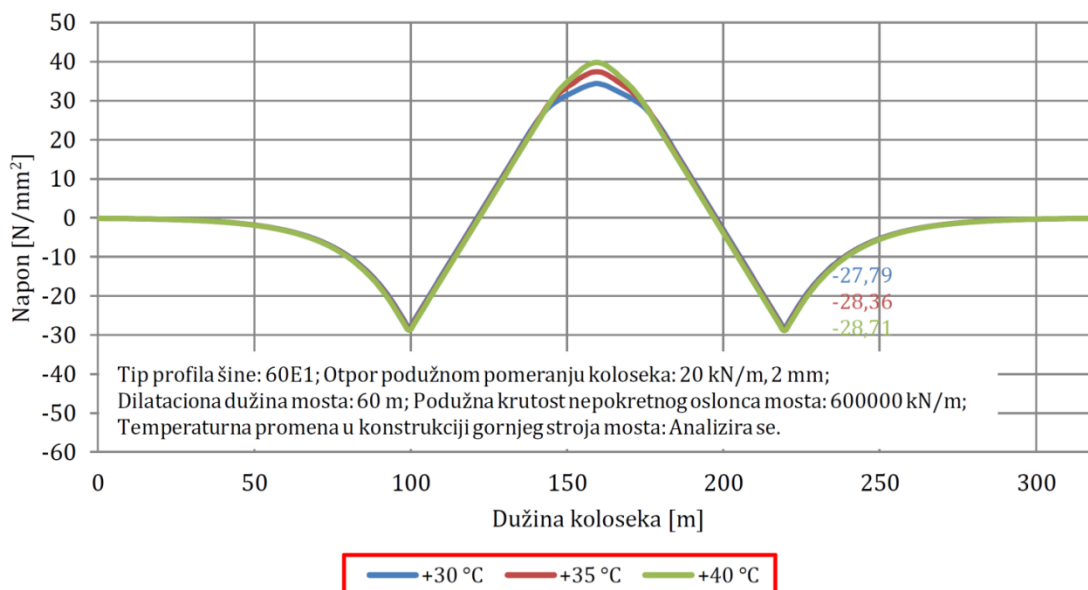
Slika 6.61 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



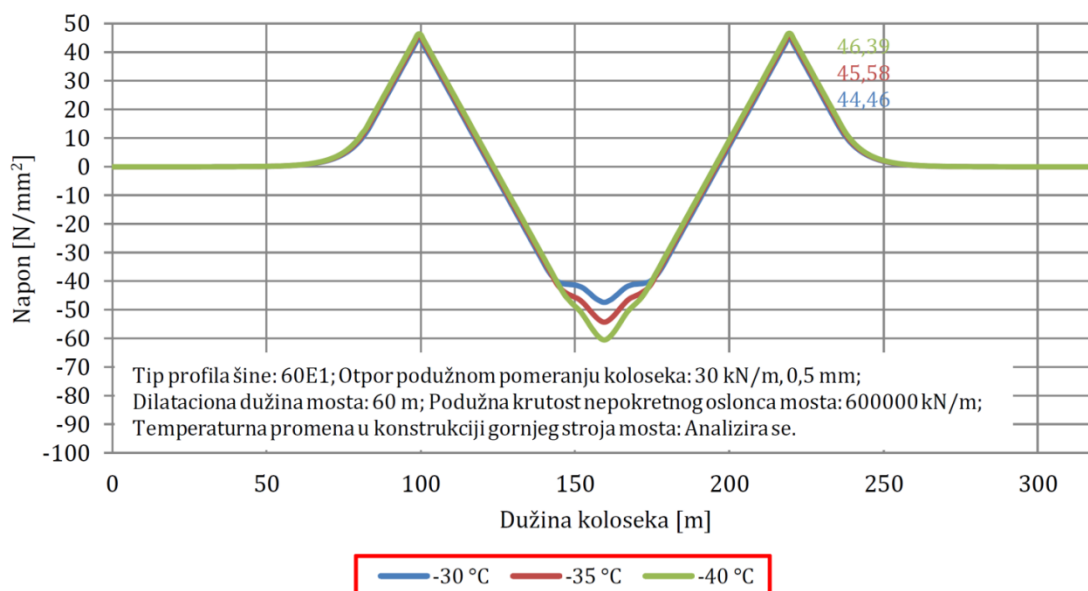
Slika 6.62 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Na slikama 6.63 i 6.64 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60 m, dok je podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m.



Slika 6.63 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.64 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.23 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i procentualna povećanja/smanjenja dodatnih temperaturnih napona usled povećanja/smanjenjem temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 0,57 N/mm² (2,01 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,12 N/mm² (2,46 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta smanji sa ±35 °C na ±30 °C. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 0,35 N/mm² (1,23 %) u letnjim uslovima, odnosno za 0,81 N/mm² (1,78 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta poveća sa ±35 °C na ±40 °C.

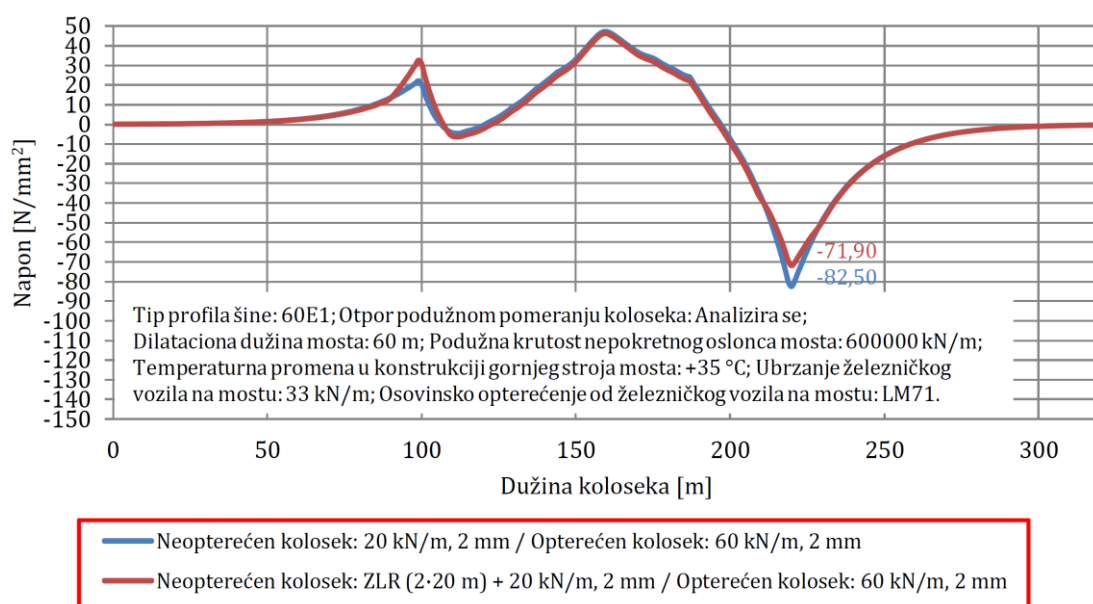
Tabela 6.23 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
±40 °C	-28,71	46,39	+1,23	+1,78
±35 °C	-28,36	45,58	/	/
±30 °C	-27,79	44,46	-2,01	-2,46

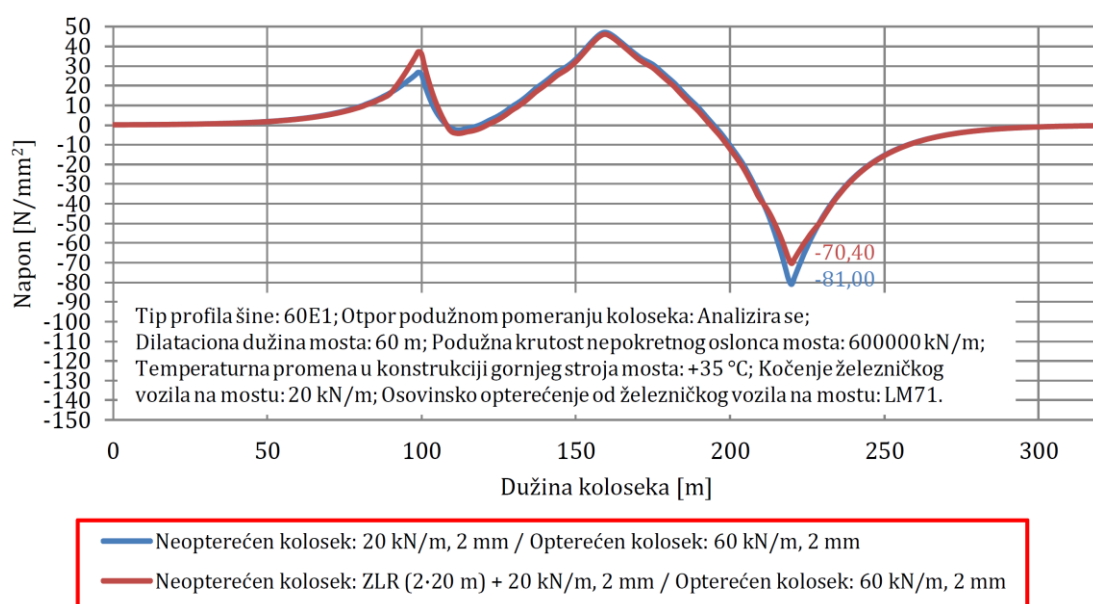
Ukupni dodatni naponi i podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta

Na slikama 6.65, 6.66, 6.67 i 6.68 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti ukupnih dodatnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove, u prvoj varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka u letnjim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za

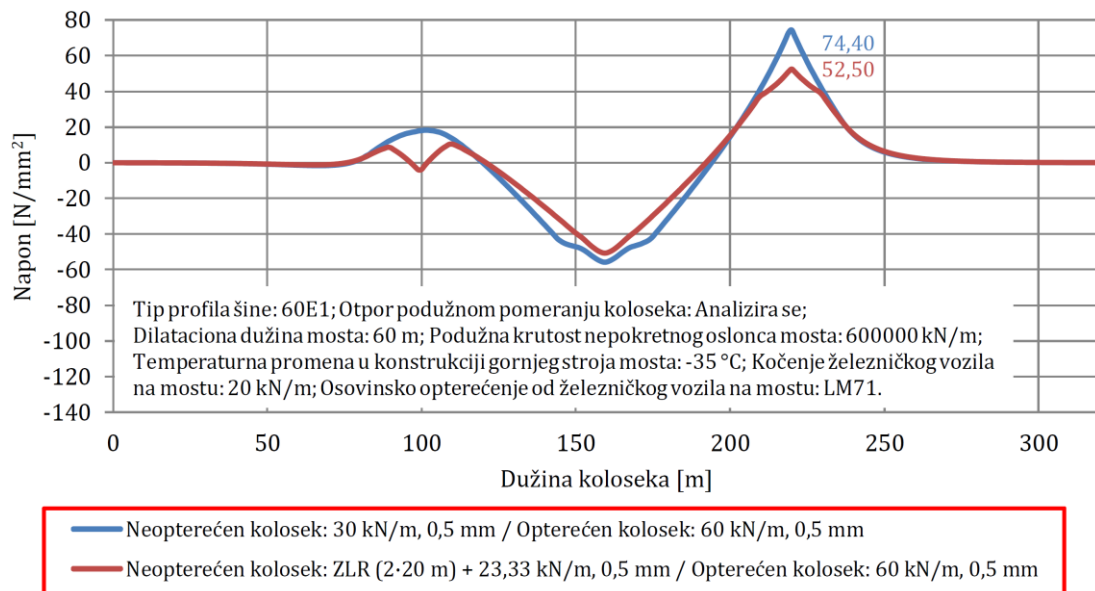
zimске uslove, u prvij varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 20 m iznad pokretnih oslonaca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka u zimskim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), dok opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



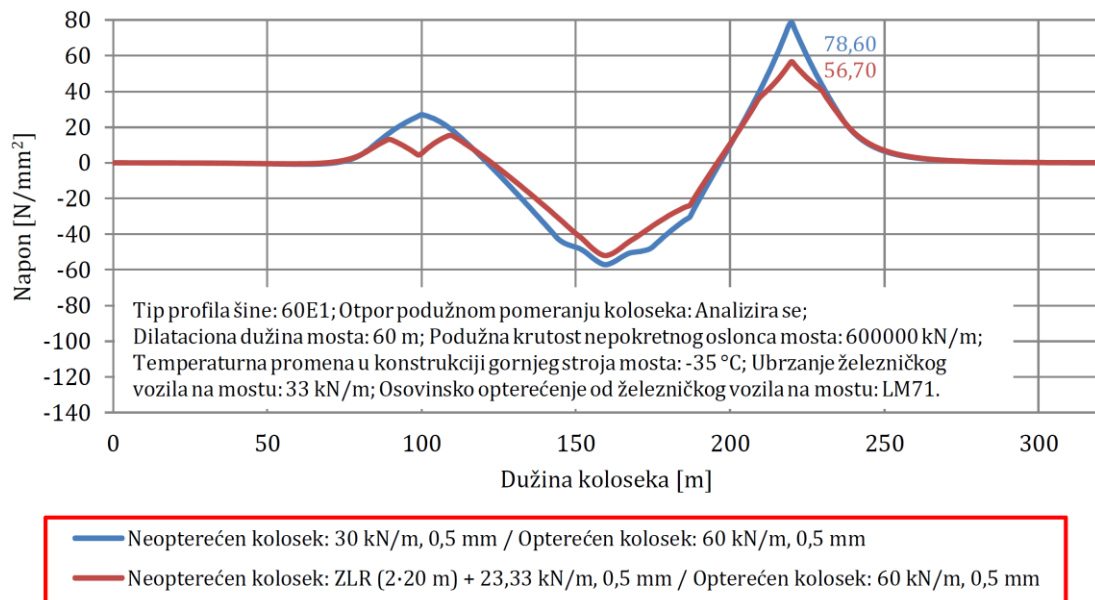
Slika 6.65 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.66 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.67 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



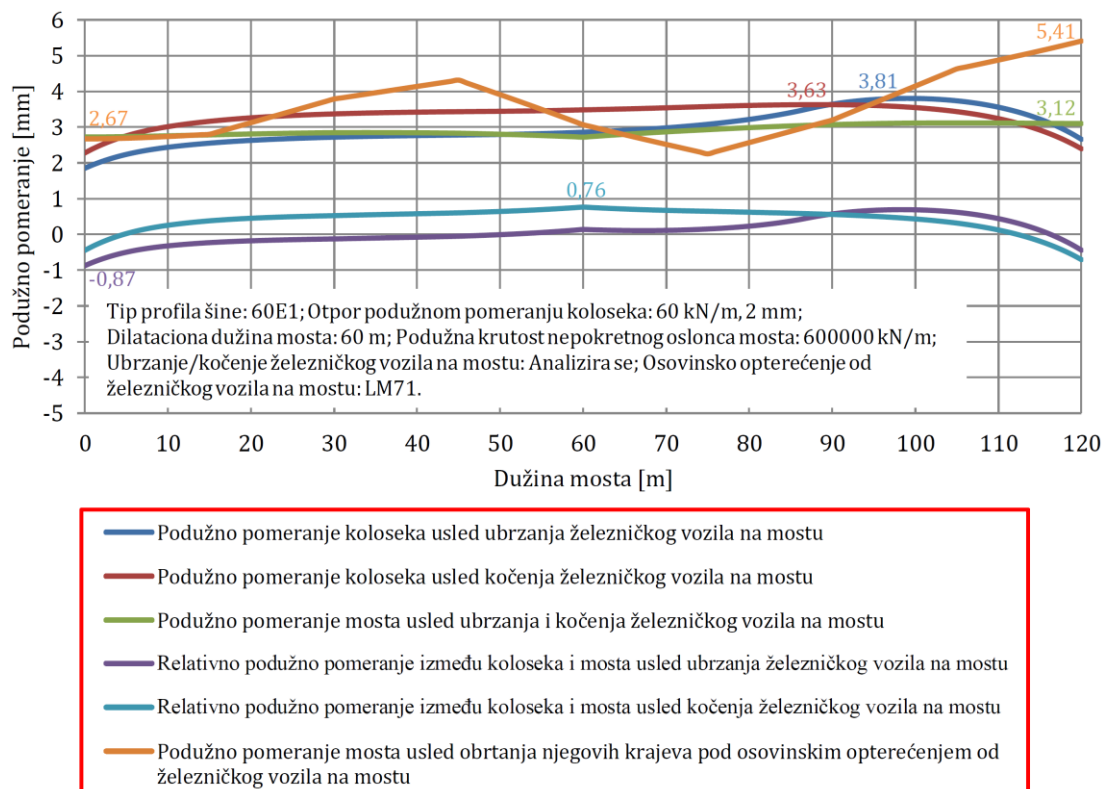
Slika 6.68 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.24 prikazane su maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima dodatnih napona pritiska i zatezanja. Primenom redukovanih otpora podužnom pomeranju neopterećenog koloseka maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona pritiska u letnjim uslovima $-71,90 \text{ N/mm}^2 < -72 \text{ N/mm}^2$, kao i maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona zatezanja u zimskim uslovima $56,70 \text{ N/mm}^2 < 92 \text{ N/mm}^2$ ne prekoračuju dozvoljene vrednosti dodatnih napona pritiska i zatezanja.

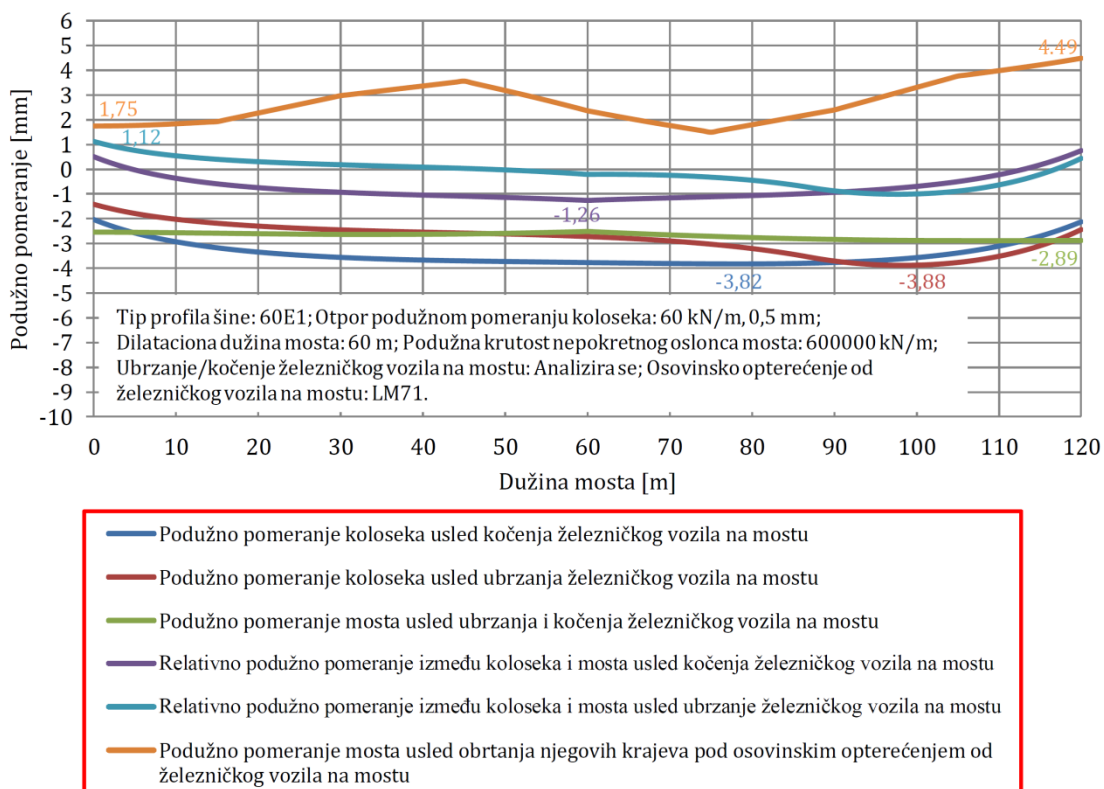
Tabela 6.24 Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju neopterećenog/opterećenog koloseka	Ukupni dodatni naponi (sa ubrzanjem) [N/mm ²]	Ukupni dodatni naponi (sa kočenjem) [N/mm ²]	Dozvoljeni dodatni naponi [N/mm ²]
Letnji uslovi			
20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm	-82,50	-81,00	> -72
ZLR (2·20 m) + 20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm	-71,90	-70,40	≤ -72
Zimski uslovi			
30 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm	78,60	74,40	≤ 92
ZLR (2·20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm	56,70	52,50	≤ 92

Na slikama 6.69 i 6.70 prikazani su rezultati proračuna interakcije koloseka/most i vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta u letnjim i zimskim uslovima usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta iznosi 120 m, dilatacione dužine mosta iznose 60 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 600000 kN/m. Proračun je sproveden za opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu koje iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), kao i opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu koje iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



Slika 6.69 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.70 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

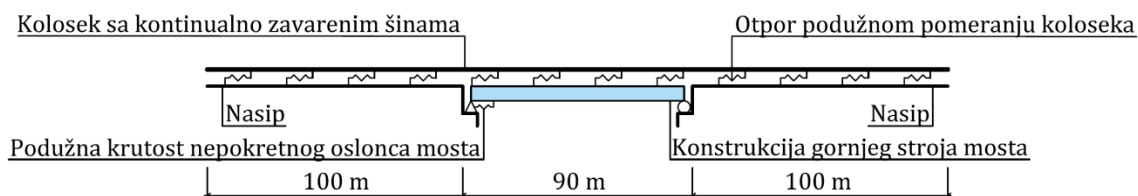
U tabeli 6.25 prikazane su maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima podužnih pomeranja. U skladu sa dobijenim rezultatima, podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta zadovoljavaju dozvoljene vrednosti podužnih pomeranja.

Tabela 6.25 Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - čelični kontinualni nosač raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom

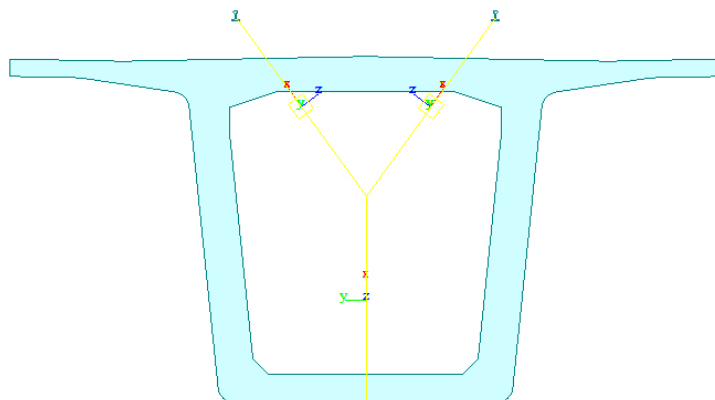
Konstrukcija (opterećenje)	Podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	3,12	≤ 5	2,89	≤ 5
Kolosek/most (ubrzanje)	0,87	≤ 4	1,12	≤ 4
Kolosek/most (kočenje)	0,76	≤ 4	1,26	≤ 4
Most (LM71)	5,41	≤ 8	4,49	≤ 8

6.4.3 Studija slučaja 3: Mostovska konstrukcija tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

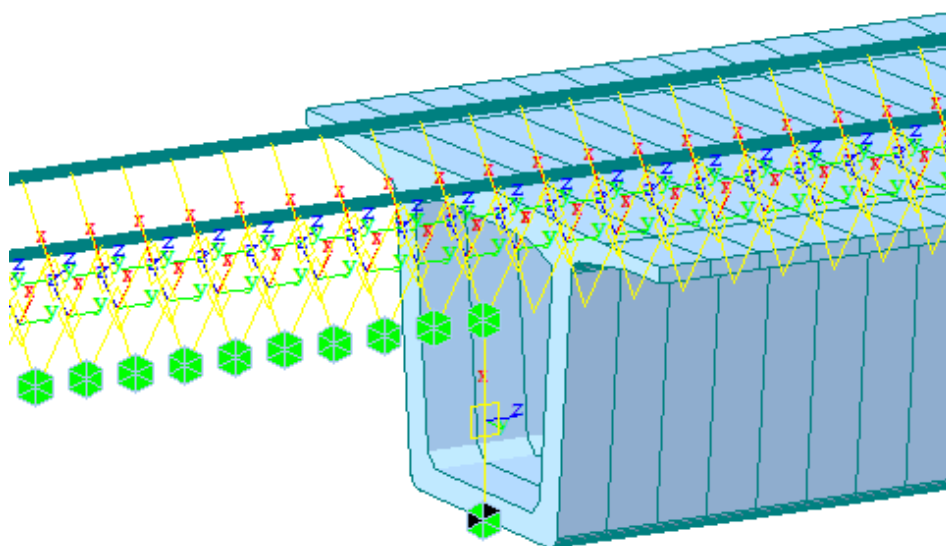
U ovoj studiji slučaja sproveden je proračun interakcije kolosek/most i ispitan je uticaj parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u slučaju mostovske konstrukcije tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom. Na slikama 6.71, 6.72 i 6.73 prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosek/most.



Slika 6.71 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.72 Poprečni presjek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.73 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.26 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

Tabela 6.26 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

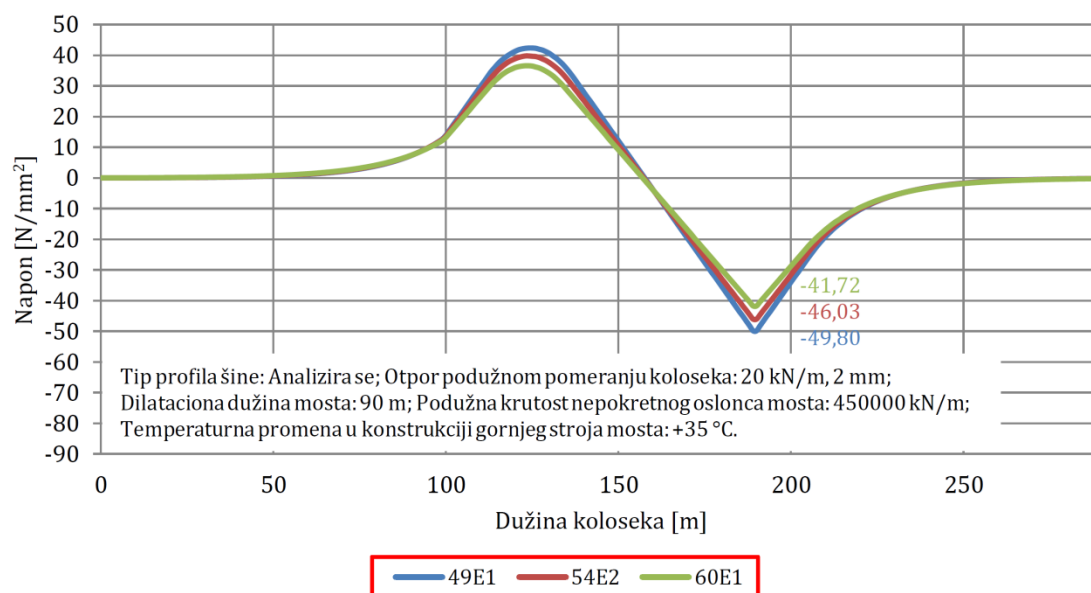
Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (1470)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (604) Rigid elastic link (2) Multi linear elastic link (2774)

Parametri konstrukcije koloseka	
Tip profila šine:	49E1, 54E2, 60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (letnji uslovi):	Varijanta 1: 20 kN/m (na celoj dužini koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: ZLR (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (letnji uslovi):	60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (zimski uslovi):	Varijanta 1: 30 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 23,33 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 6: ZLR (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (zimski uslovi):	60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	prosta greda

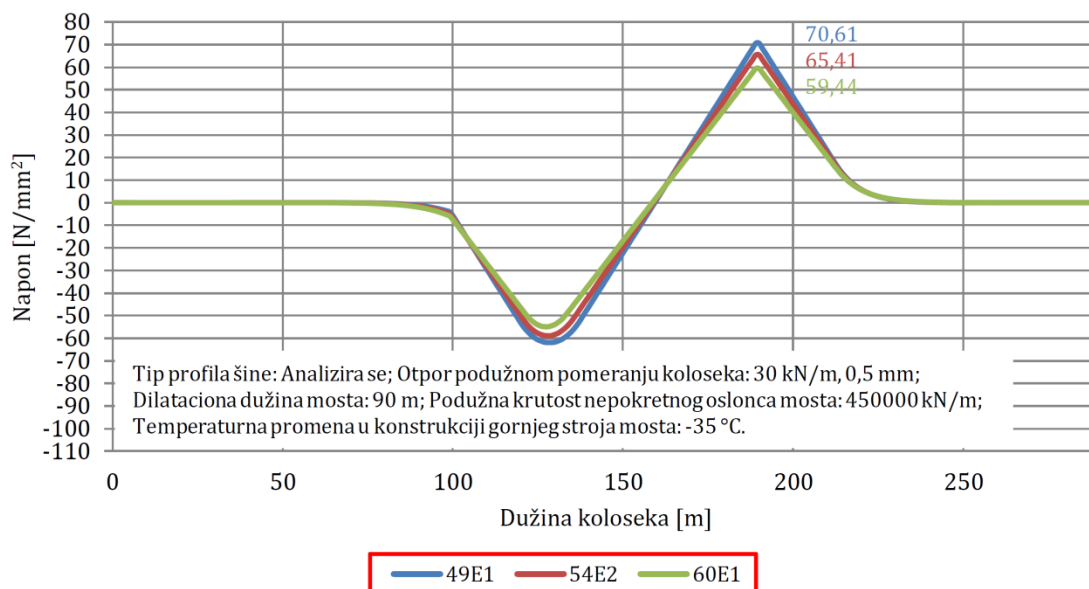
Rasponi i ukupna dužina mosta:	70 m, 80 m, 90 m
Dilatacione dužine mosta:	70 m, 80 m, 90 m
Raspored oslonaca mosta:	N (nepokretno) - P (pokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	0 kN/m, 300000 kN/m, 450000 kN/m, 600000 kN/m, ∞ kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	$A = 15,15 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 71,25 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 105,85 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) $h = 6 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta) $W = 12,5 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	C 40/50 (klasa betona) $E = 3,52 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+30 °C, +35 °C, +40 °C (letnji uslovi) -30 °C, -35 °C, -40 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od tipa profila šine

Na slikama 6.74 i 6.75 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine. Analizirano je tri tipa profila šine: 49E1, 54E2 i 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 450000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.74 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.75 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.27 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem površine poprečnog preseka šine. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 8,08 N/mm² (16,22 %) u letnjim uslovima, odnosno za 11,17 N/mm² (15,82 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1.

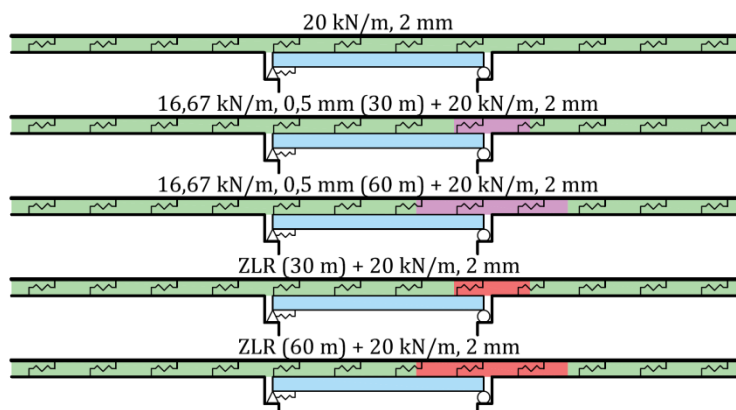
Tabela 6.27 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Tip profila šine	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
49E1	-49,80	70,61	/	/
54E2	-46,03	65,41	-7,57	-7,36
60E1	-41,72	59,44	-16,22	-15,82

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka

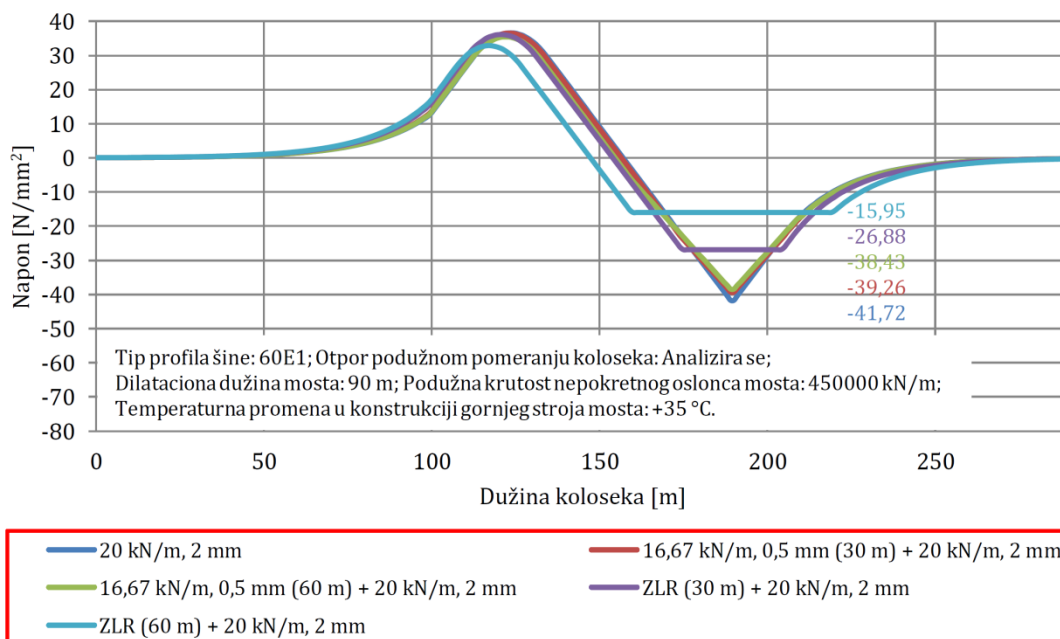
Na slici 6.76 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za pet varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U drugoj i trećoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U četvrtoj i petoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca

mosta 450000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C.



Slika 6.76 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Na slici 6.77 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima (slika 6.76).



Slika 6.77 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.28 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 3,29 N/mm² (7,89 %) u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 25,77 N/mm² (61,77 %).

Tabela 6.28 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
20 kN/m, 2 mm	-41,72	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-39,26	-5,90
16,67 kN/m, 0,5 mm (60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-38,43	-7,89
ZLR (30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-26,88	-35,57
ZLR (60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-15,95	-61,77

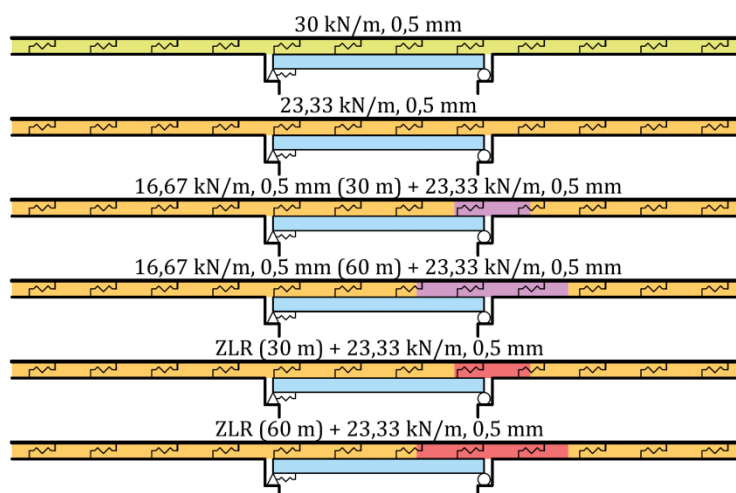
U tabeli 6.29 prikazane su maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna smanjenja sile pritiska za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Sile pritiska određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od +42,5 °C i mostu od +35 °C. Dobijeni rezultati pokazuju da se sila pritiska može smanjiti za 395312 N (17,85 %) u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint).

Tabela 6.29 Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Sila pritiska [N]	Smanjenje sile pritiska [%]
20 kN/m, 2 mm	-2214444	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-2176708	-1,70
16,67 kN/m, 0,5 mm (60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-2163975	-2,28
ZLR (30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1986798	-10,28
ZLR (60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1819132	-17,85

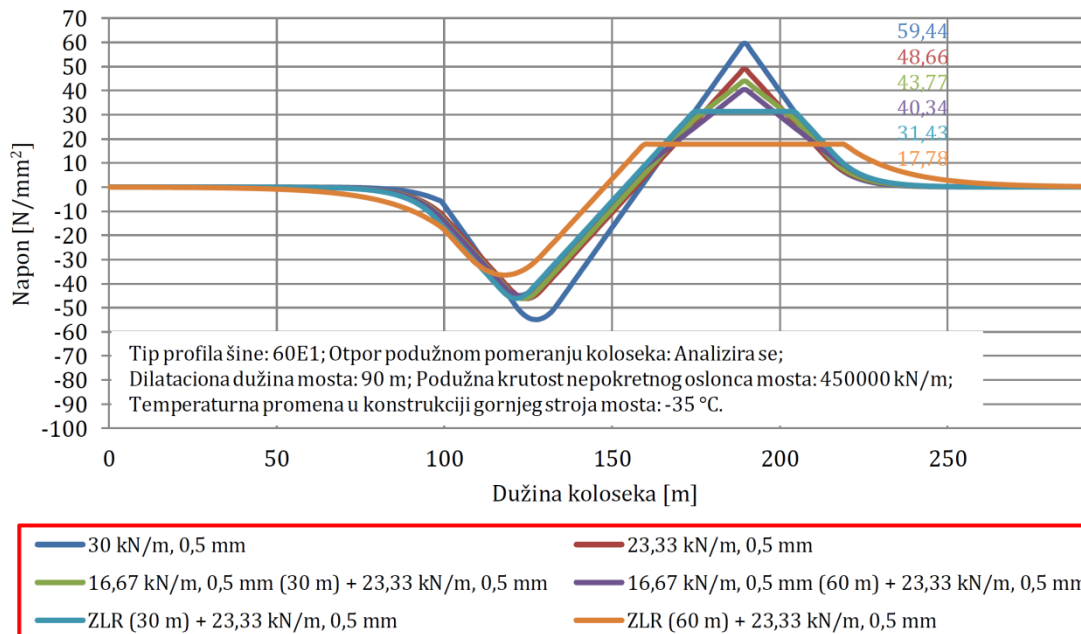
Na slici 6.78 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za šest varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U drugoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U trećoj i četvrtoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U petoj i šestoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca

mosta 450000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

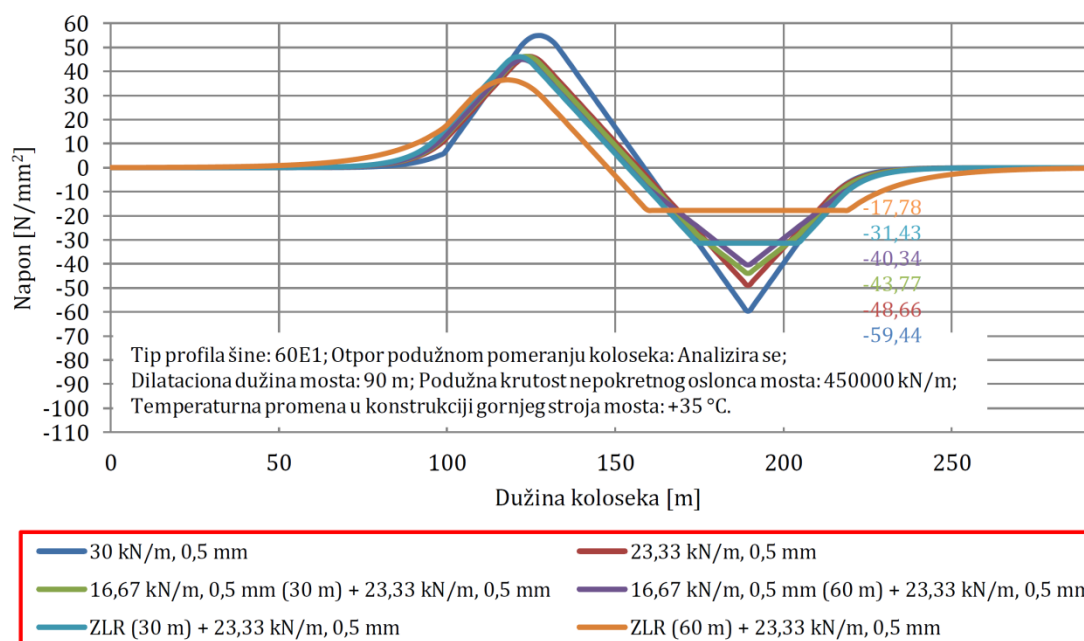


Slika 6.78 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Na slikama 6.79 i 6.80 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima, kao i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima (slika 6.34).



Slika 6.79 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



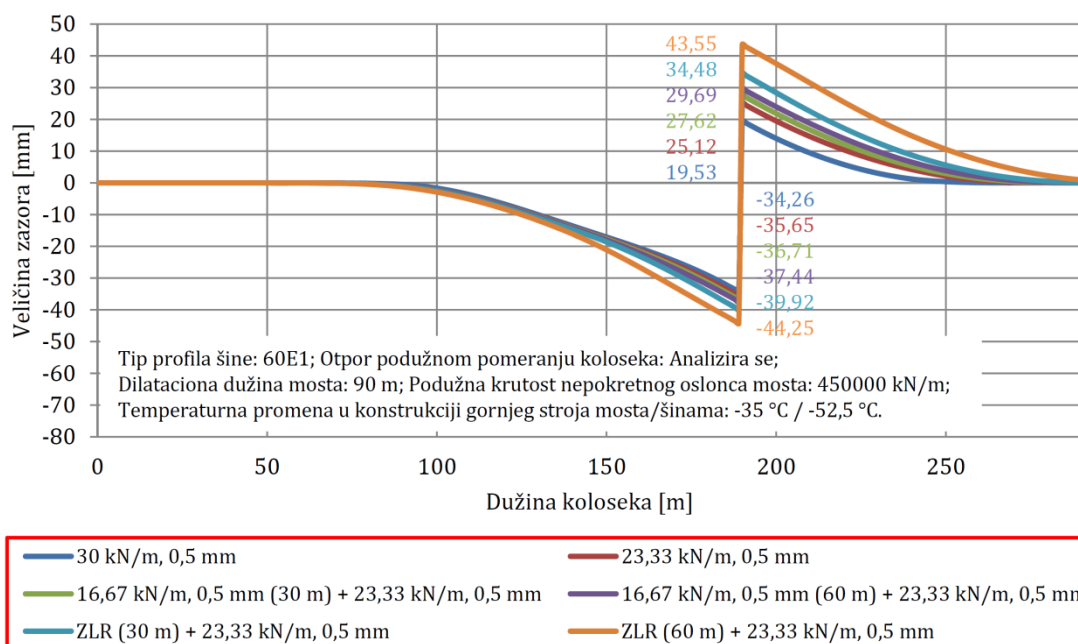
Slika 6.80 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.30 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 10,78 N/mm² (18,14 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 19,10 N/mm² (32,13 %). Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 41,66 N/mm² (70,09 %).

Tabela 6.30 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
30 kN/m, 0,5 mm	±59,44	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	±48,66	-18,14
16,67 kN/m, 0,5 mm (30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±43,77	-26,36
16,67 kN/m, 0,5 mm (60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±40,34	-32,13
ZLR (30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±31,43	-47,12
ZLR (60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±17,78	-70,09

Kao ograničavajući faktor pri smanjenju otpora podužnom pomeranju koloseka treba uzeti u obzir veličinu zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima. Na slici 6.81 prikazane su vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi u zimskim uslovima. Smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka dovodi do povećanja veličine zazora pri pucanju šine.



Slika 6.81 Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.31 prikazane su maksimalne vrednosti veličine zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna povećanja veličine zazora za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Veličine zazora određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od -52,5 °C i mostu od -35 °C.

Tabela 6.31 Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

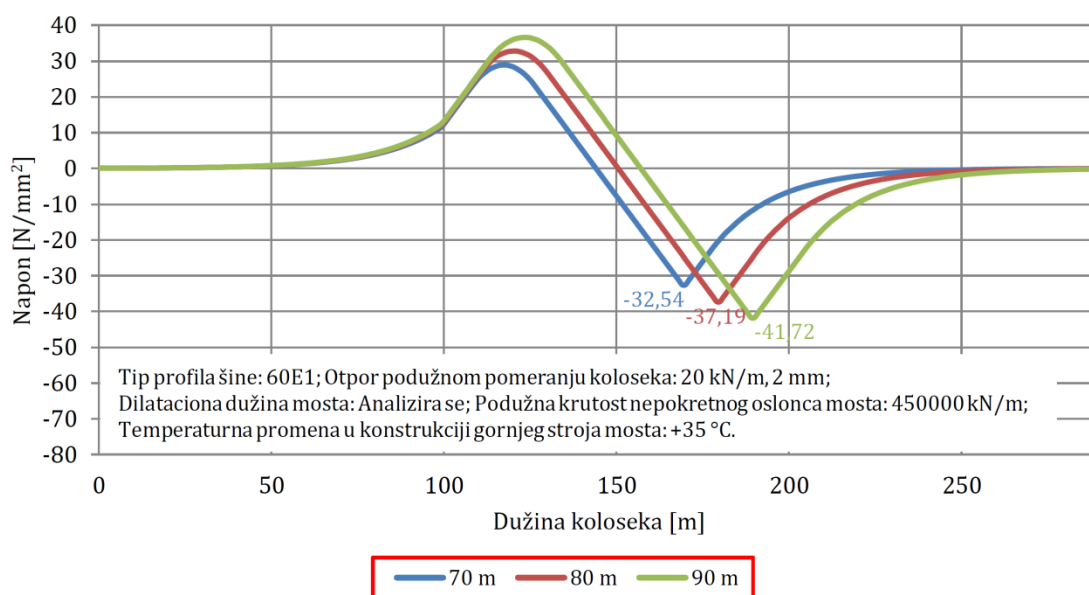
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Veličina zazora pri pucanju šine [mm]	Povećanje veličine zazora pri pucanju šine [%]
30 kN/m, 0,5 mm	53,79	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	60,77	+12,98
16,67 kN/m, 0,5 mm (30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	64,33	+19,59
16,67 kN/m, 0,5 mm (60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	67,13	+24,80
ZLR (30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	74,40	+38,32
ZLR (60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	87,80	+63,23

Dobijeni rezultati pokazuju da se veličina zazora pri pucanju šine može povećati za 6,98 mm (12,98 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 13,34 mm (24,80 %). Takođe, u slučaju kada se iznad

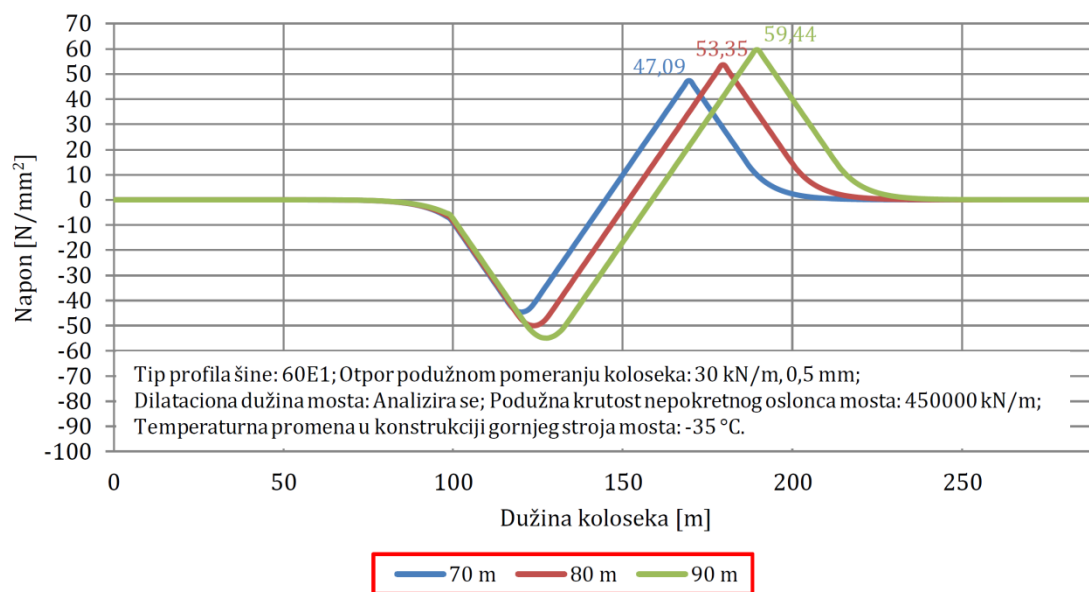
pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 34,01 mm (63,23 %).

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od dilatacione dužine mosta

Na slikama 6.82 i 6.83 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od dilatacione dužine mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 450000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.82 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.83 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

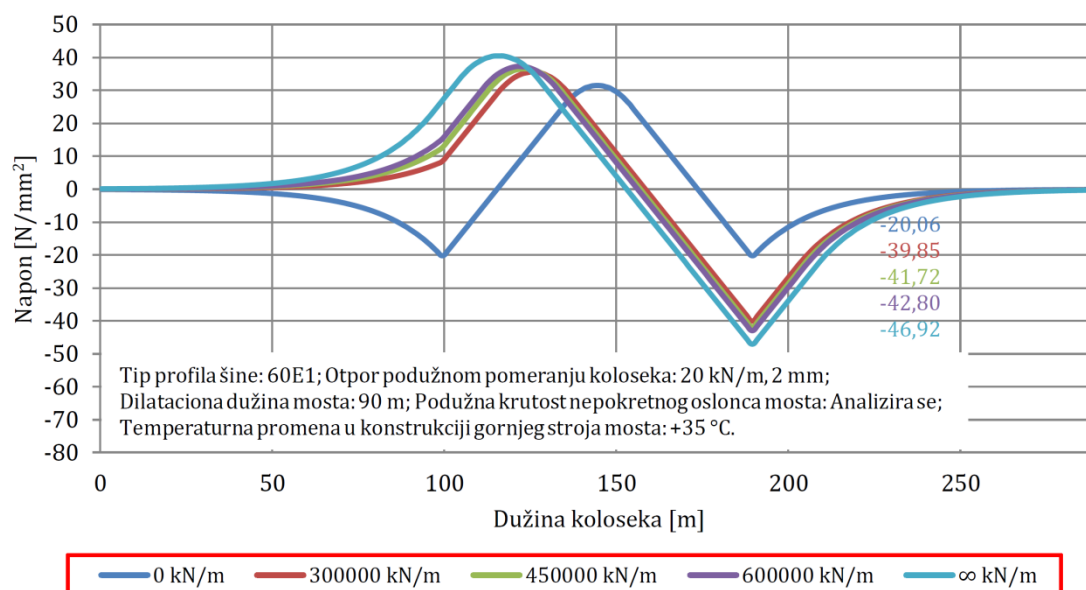
U tabeli 6.32 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojene dilatacione dužine mosta, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa smanjenjem dilatacione dužine mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju smanjenja dilatacione dužine mosta za 10 m dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 4,53 N/mm² (10,86 %) u letnjim uslovima, odnosno za 6,09 N/mm² (10,25 %) u zimskim uslovima.

Tabela 6.32 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

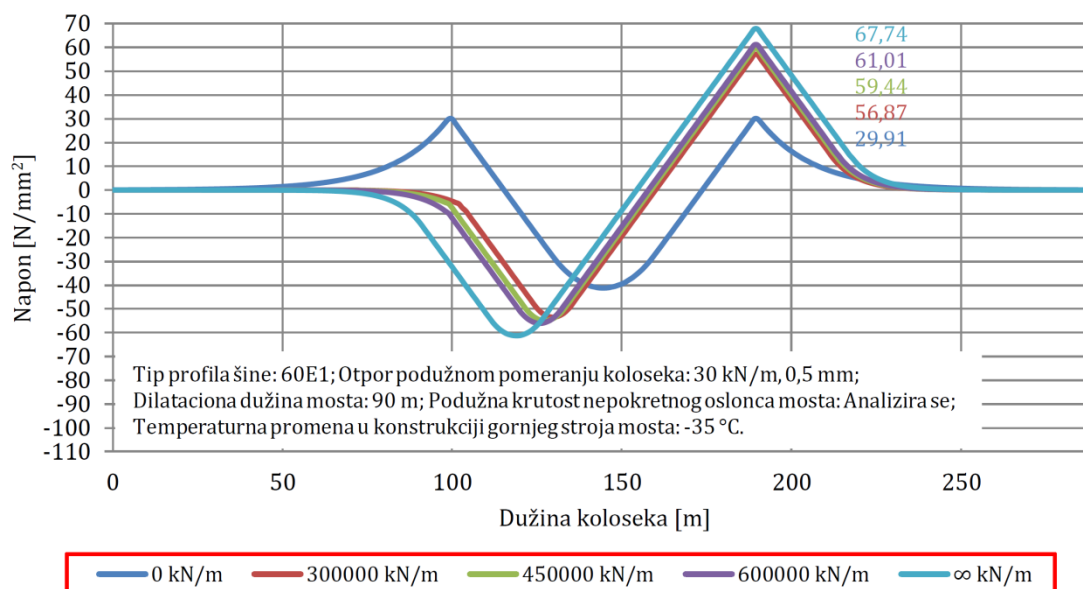
Dilataciona dužina mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
90 m	-41,72	59,44	/	/
80 m	-37,19	53,35	-10,86	-10,25
70 m	-32,54	47,09	-22,00	-20,78

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta

Na slikama 6.84 i 6.85 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Analizirane granične vrednosti podužne krutosti oslonca mosta od 0 kN/m i ∞ kN/m predstavljaju teorijske vrednosti koje se odnose na idealno podužno pokretan, odnosno idealno podužno nepokretan oslonac mosta.



Slika 6.84 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.85 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.33 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, kao i procentualno povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem/smanjenjem podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U teorijskom smislu, dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 21,66 N/mm² (51,92 %) u letnjim uslovima, odnosno za 29,53 N/mm² (49,68 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta smanji sa 450000 kN/m na 0 kN/m. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 5,20 N/mm² (12,46 %) u letnjim uslovima, odnosno za 8,30 N/mm² (13,96 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta poveća sa 450000 kN/m na ∞ kN/m.

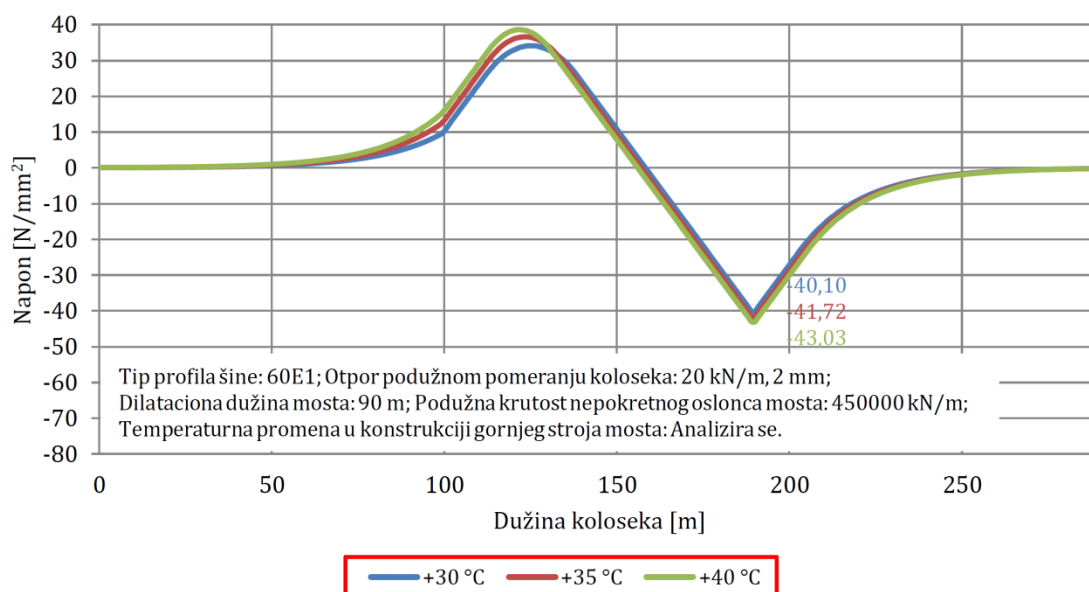
Tabela 6.33 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
∞ kN/m	-46,92	67,74	+12,46	+13,96
600000 kN/m	-42,80	61,01	+2,59	+2,64
450000 kN/m	-41,72	59,44	/	/
300000 kN/m	-39,85	56,87	-4,48	-4,32
0 kN/m	-20,06	29,91	-51,92	-49,68

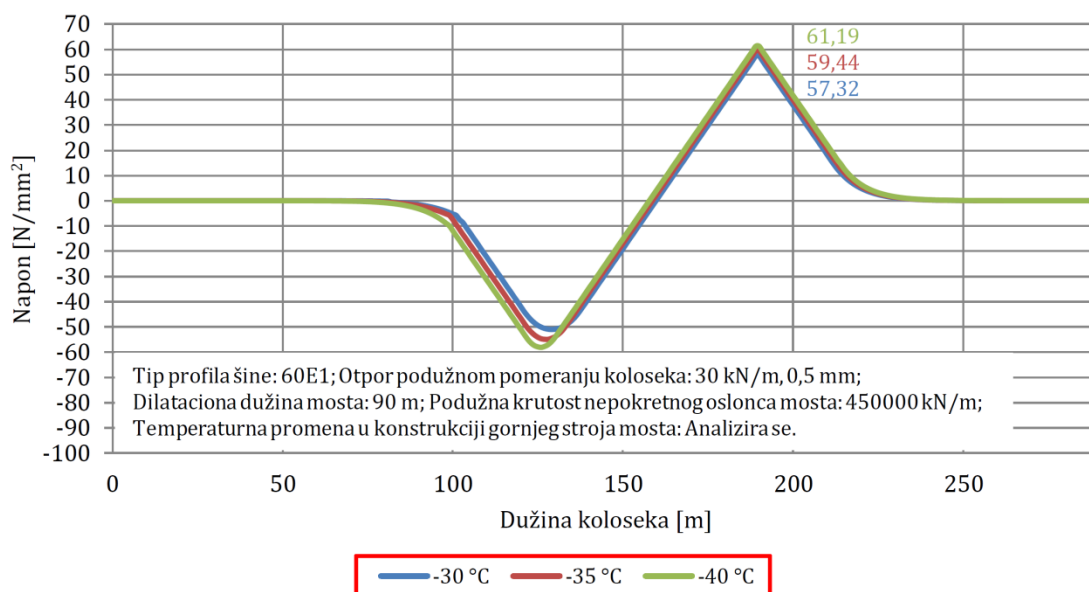
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Na slikama 6.86 i 6.87 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove

usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 450000 kN/m.



Slika 6.86 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.87 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

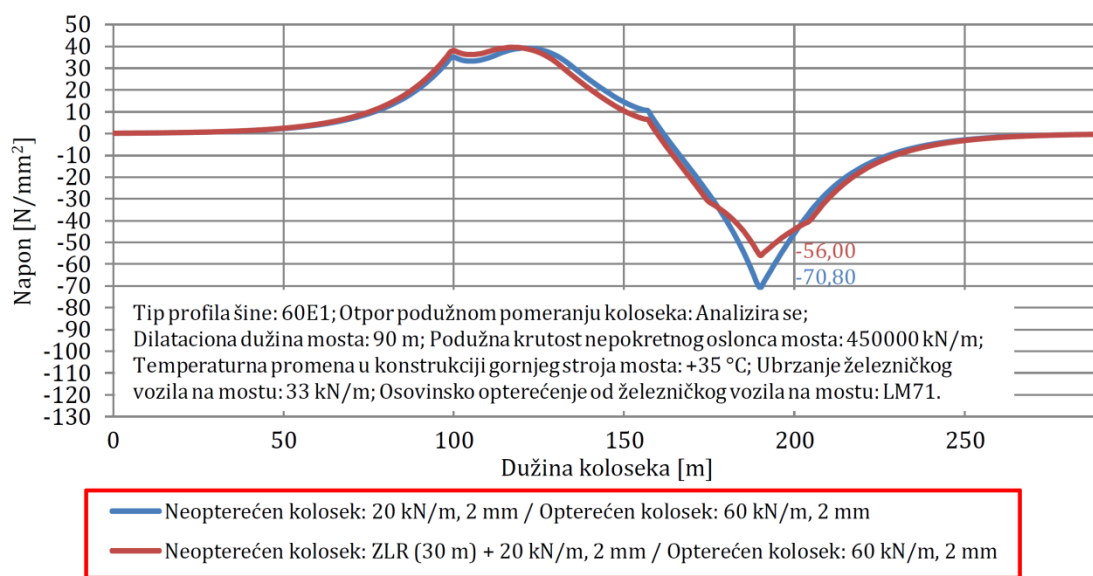
U tabeli 6.34 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i procentualna povećanja/smanjenja dodatnih temperaturnih napona usled povećanja/smanjenjem temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 1,62 N/mm² (3,88 %) u letnjim uslovima, odnosno za 2,12 N/mm² (3,57 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta smanji sa ±35 °C na ±30 °C. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 1,31 N/mm² (3,14 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,75 N/mm² (2,94 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta poveća sa ±35 °C na ±40 °C.

Tabela 6.34 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

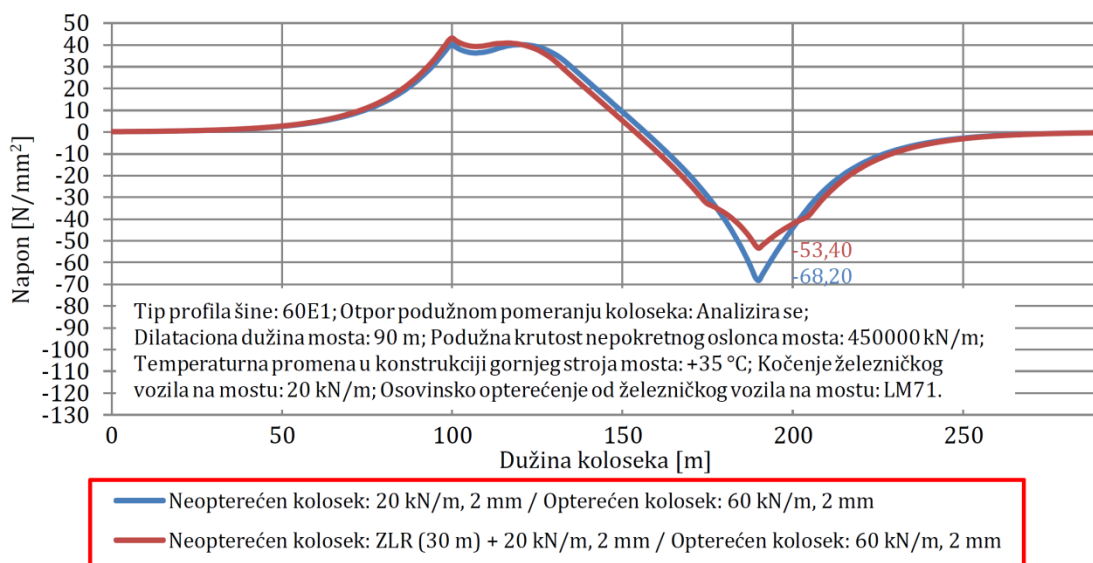
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
±40 °C	-43,03	61,19	+3,14	+2,94
±35 °C	-41,72	59,44	/	/
±30 °C	-40,10	57,32	-3,88	-3,57

Ukupni dodatni naponi i podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta

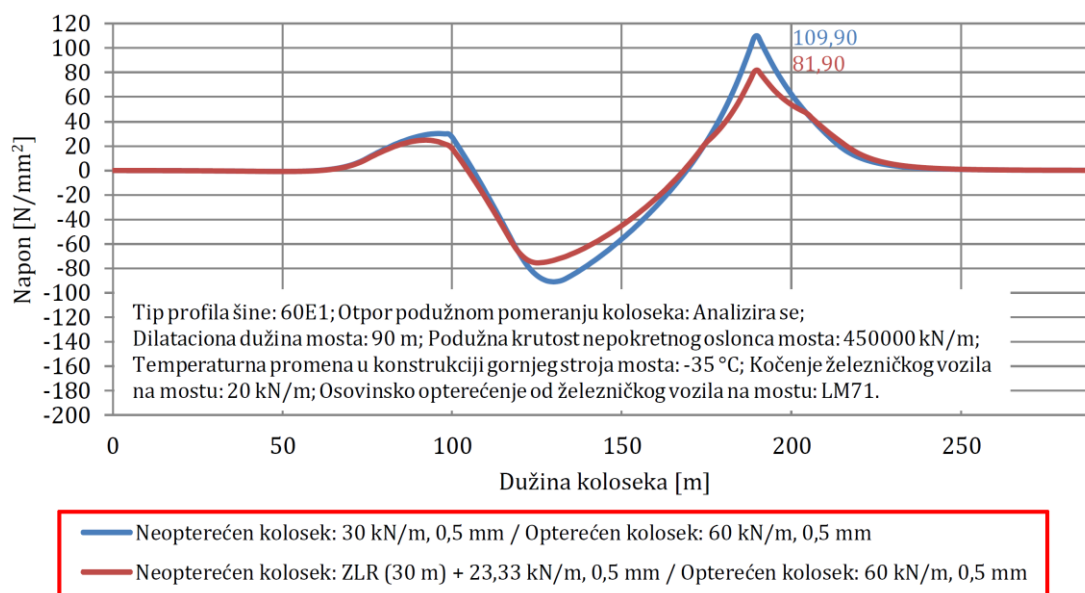
Na slikama 6.88, 6.89, 6.90 i 6.91 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti ukupnih dodatnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka.



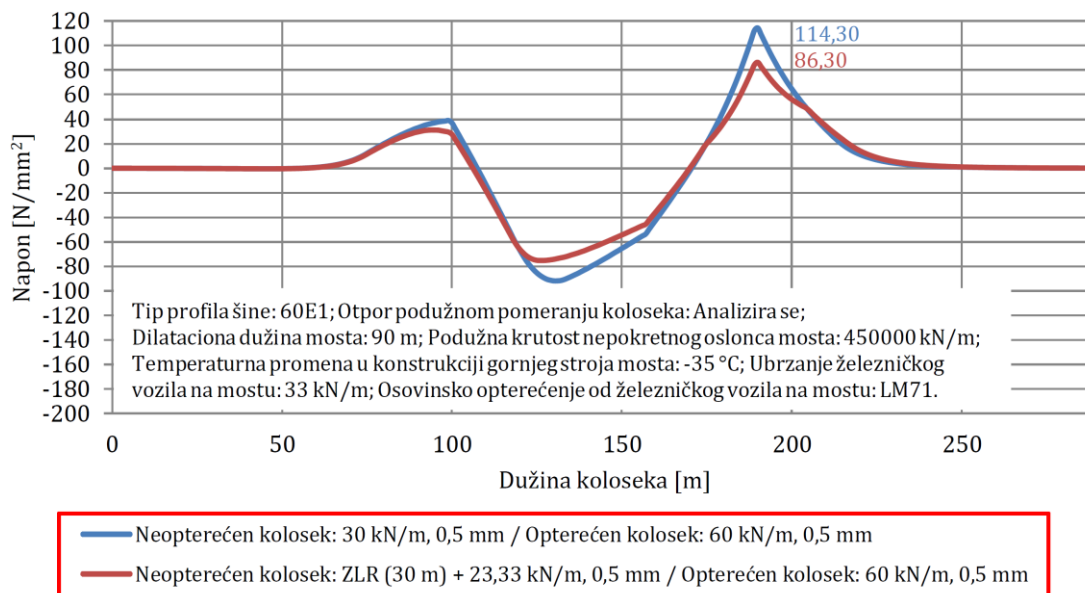
Slika 6.88 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.89 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.90 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.91 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove, u prvoj varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka u letnjim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove, u prvoj varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m iznad pokretnog oslonca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Otpor podužnom

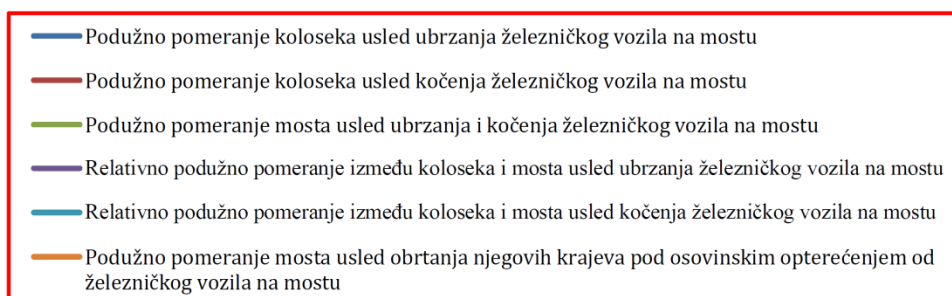
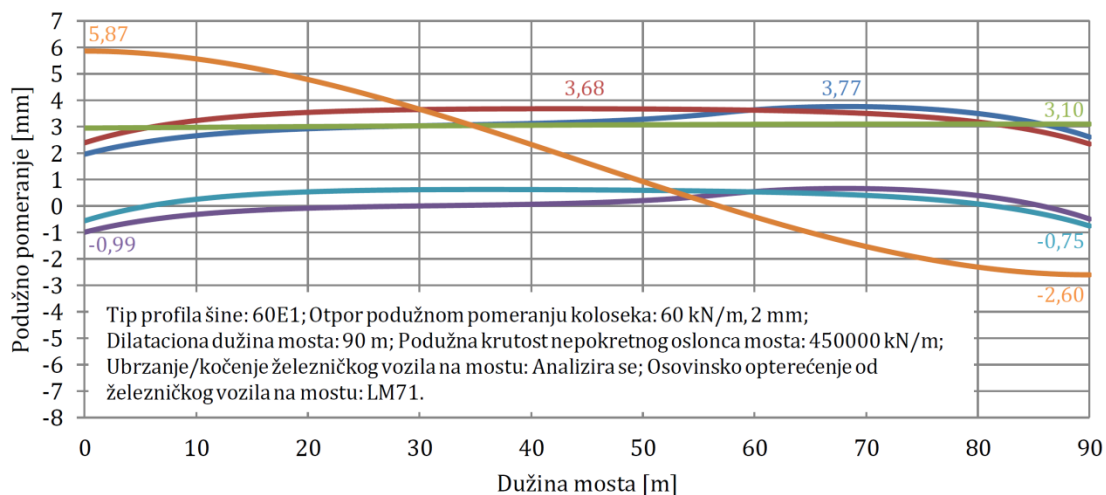
pomeranju opterećenog koloseka u zimskim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 450000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), dok opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.

U tabeli 6.35 prikazane su maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima dodatnih napona pritiska i zatezanja. Primenom redukovanih otpora podužnom pomeranju neopterećenog koloseka maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona pritiska u letnjim uslovima $-56,00 \text{ N/mm}^2 < -72 \text{ N/mm}^2$, kao i maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona zatezanja u zimskim uslovima $86,30 \text{ N/mm}^2 < 92 \text{ N/mm}^2$ ne prekoračuju dozvoljene vrednosti dodatnih napona pritiska i zatezanja.

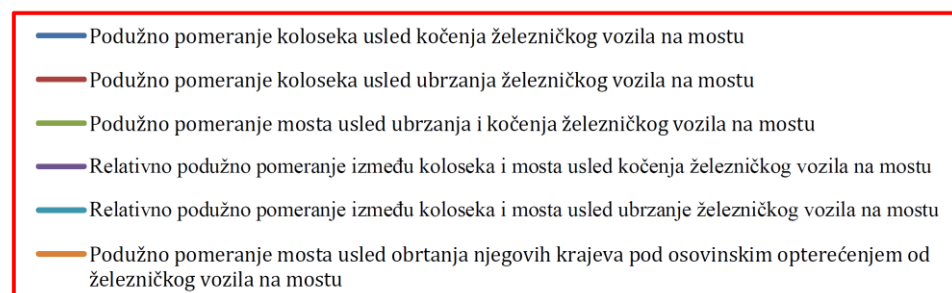
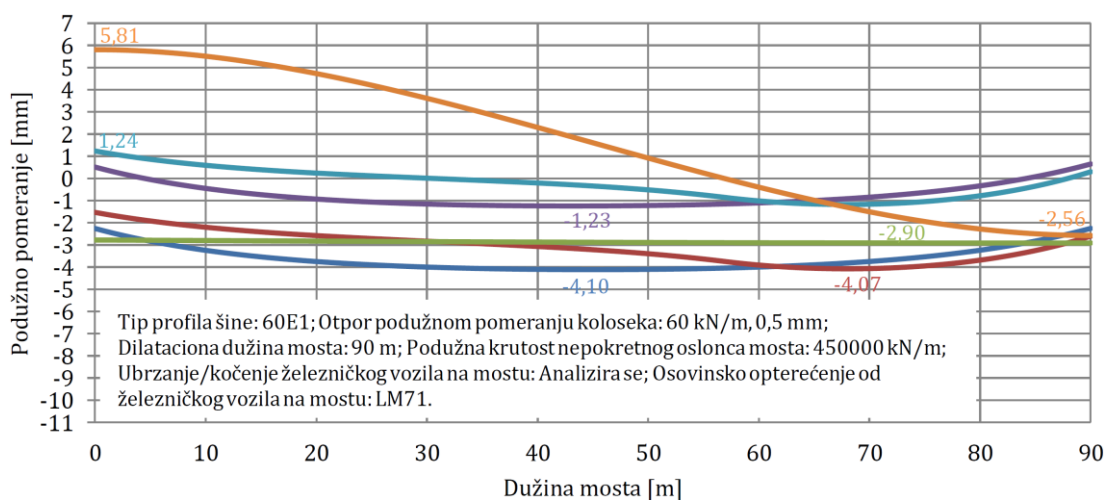
Tabela 6.35 Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju neopterećenog/opterećenog koloseka	Ukupni dodatni naponi (sa ubrzanjem) [N/mm ²]	Ukupni dodatni naponi (sa kočenjem) [N/mm ²]	Dozvoljeni dodatni naponi [N/mm ²]
Letnji uslovi			
20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm	-70,80	-68,20	≤ -72
ZLR (30 m) + 20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm	-56,00	-53,40	≤ -72
Zimski uslovi			
30 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm	114,30	109,90	> 92
ZLR (30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm	86,30	81,90	≤ 92

Na slikama 6.92 i 6.93 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta u letnjim i zimskim uslovima usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta, kao i dilataciona dužina mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 450000 kN/m. Proračun je sproveden za opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu koje iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), kao i opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu koje iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



Slika 6.92 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.93 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

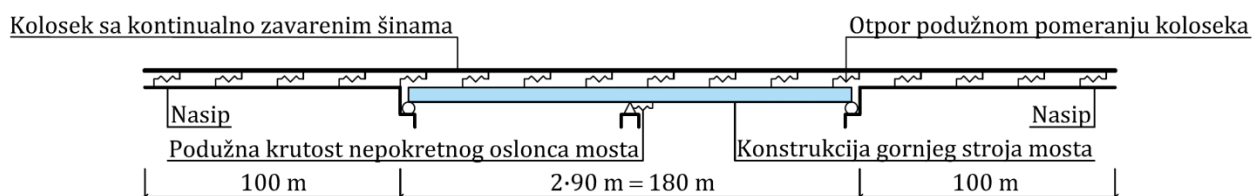
U tabeli 6.36 prikazane su maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima podužnih pomeranja. U skladu sa dobijenim rezultatima, podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta zadovoljavaju dozvoljene vrednosti podužnih pomeranja.

Tabela 6.36 Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonska prosta greda raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom

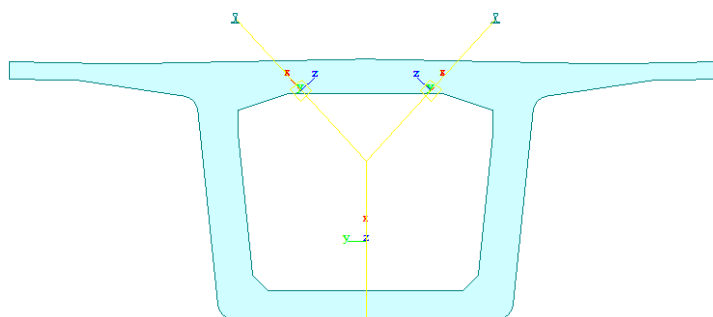
Konstrukcija (opterećenje)	Podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	3,10	≤ 5	2,90	≤ 5
Kolosek/most (ubrzanje)	0,99	≤ 4	1,24	≤ 4
Kolosek/most (kočenje)	0,75	≤ 4	1,23	≤ 4
Most (LM71)	5,87	≤ 8	5,81	≤ 8

6.4.4 Studija slučaja 4: Mostovska konstrukcija tipa betonskog kontinualnog nosača raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

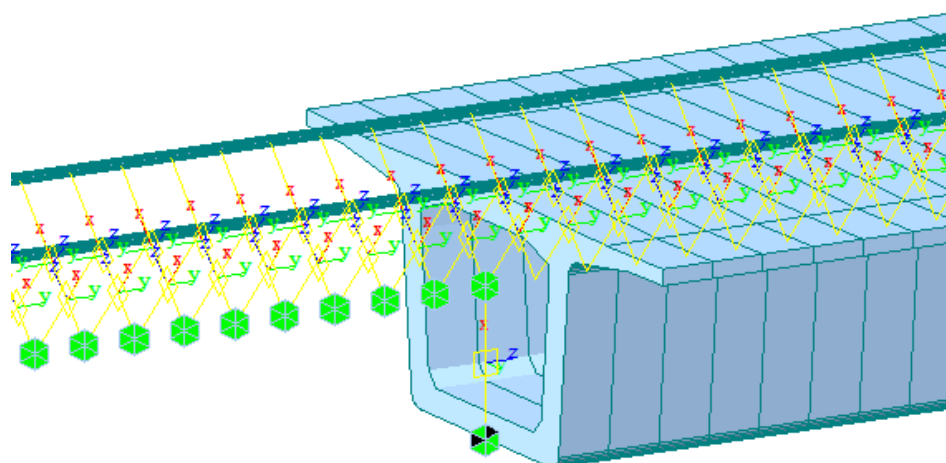
U ovoj studiji slučaja sproveden je proračun interakcije kolosek/most i ispitan je uticaj parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u slučaju mostovske konstrukcije tipa betonskog kontinualnog nosača raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom. Na slikama 6.94, 6.95 i 6.96 prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosek/most.



Slika 6.94 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.95 Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.96 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.37 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

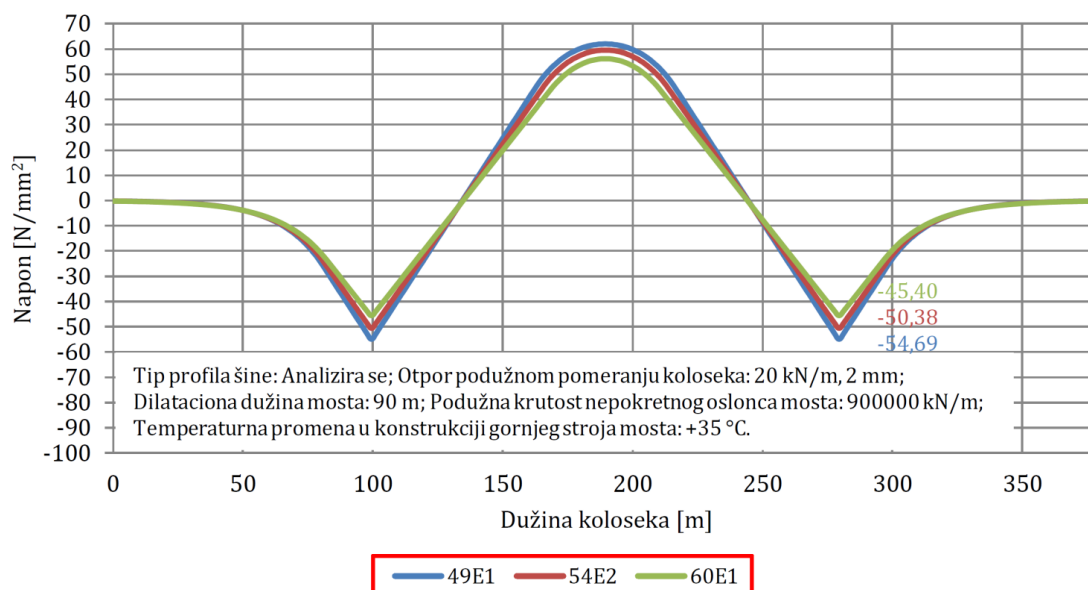
Tabela 6.37 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (1740)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (605) Rigid elastic link (3) Multi linear elastic link (3134)
Parametri konstrukcije koloseka	
Tip profila šine:	49E1, 54E2, 60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (letnji uslovi):	Varijanta 1: 20 kN/m (na celoj dužini koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: ZLR (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje)

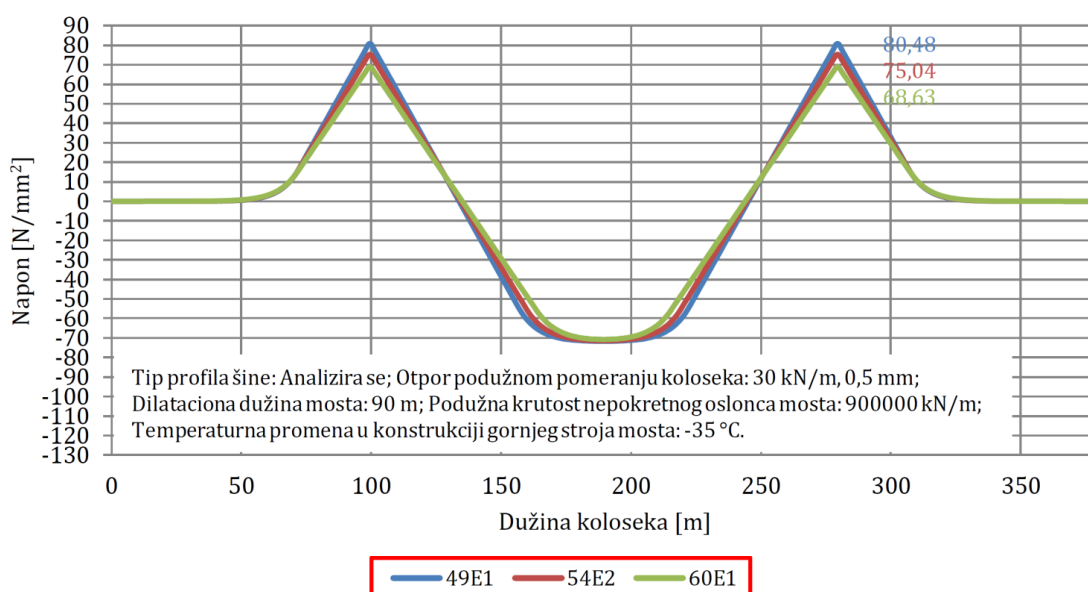
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (letnji uslovi):	60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (zimski uslovi):	Varijanta 1: 30 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 23,33 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 30 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 6: ZLR (na dužini koloseka od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (zimski uslovi):	60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	kontinualni nosač
Rasponi i ukupna dužina mosta:	2·70 m = 140 m, 2·80 m = 160 m, 2·90 m = 180 m
Dilatacione dužine mosta:	70 m, 80 m, 90 m
Raspored oslonaca mosta:	P (pokretno) - N (nepokretno) - P (pokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	0 kN/m, 750000 kN/m, 900000 kN/m, 1050000 kN/m, ∞ kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	$A = 13,20 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka) $I_{yy} = 34,50 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa) $I_{zz} = 91,68 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa) $h = 4,5 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta) $W = 12,5 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	C 40/50 (klasa betona) $E = 3,52 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+30 °C, +35 °C, +40 °C (letnji uslovi) -30 °C, -35 °C, -40 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od tipa profila šine

Na slikama 6.97 i 6.98 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine. Analizirano je tri tipa profila šine: 49E1, 54E2 i 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 900000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.97 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.98 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.38 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona

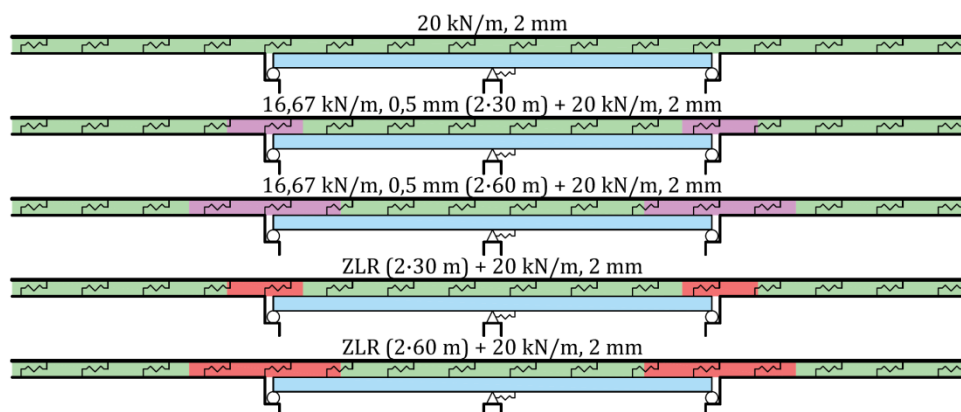
sa povećanjem površine poprečnog preseka šine. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 9,29 N/mm² (16,99 %) u letnjim uslovima, odnosno za 11,85 N/mm² (14,72 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1.

Tabela 6.38 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

Tip profila šine	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
49E1	-54,69	80,48	/	/
54E2	-50,38	75,04	-7,88	-6,76
60E1	-45,40	68,63	-16,99	-14,72

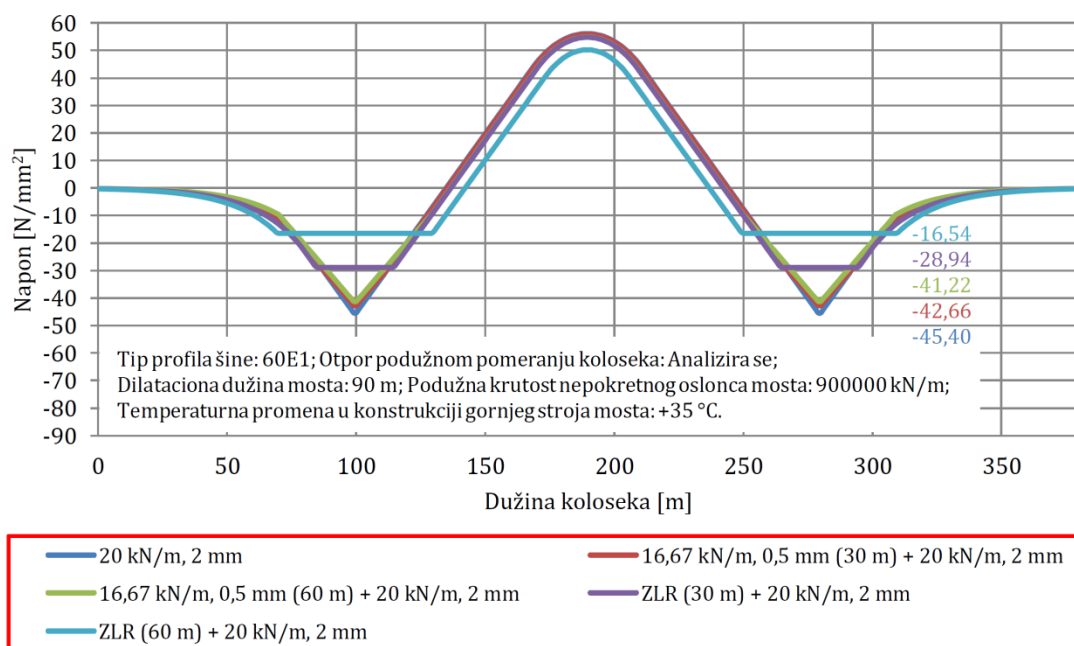
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka

Na slici 6.99 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za pet varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U drugoj i trećoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U četvrtoj i petoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 900000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C.



Slika 6.99 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

Na slici 6.100 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima (slika 6.99).



Slika 6.100 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.39 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 4,18 N/mm² (9,21 %) u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 28,86 N/mm² (63,57 %).

Tabela 6.39 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

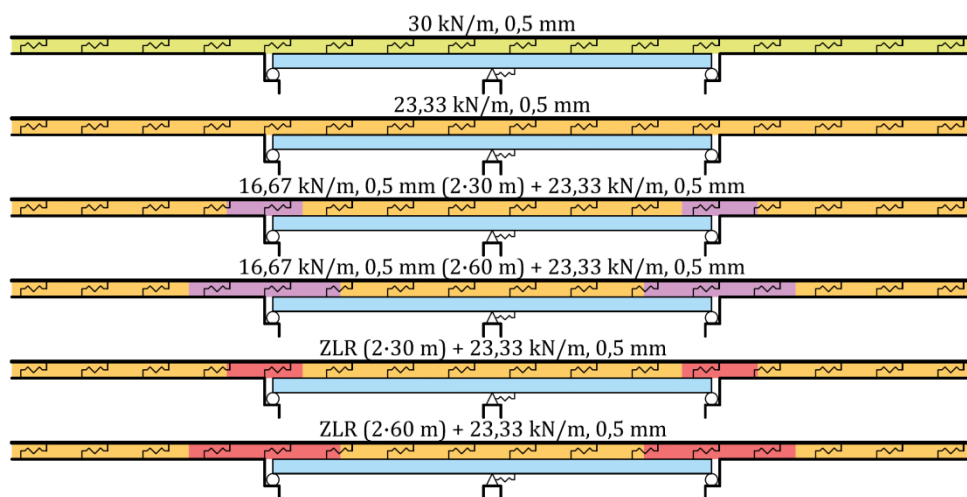
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
20 kN/m, 2 mm	-45,40	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-42,66	-6,04
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-41,22	-9,21
ZLR (2·30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-28,94	-36,26
ZLR (2·60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-16,54	-63,57

U tabeli 6.40 prikazane su maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna smanjenja sile pritiska za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Sile pritiska određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od +42,5 °C i mostu od +35 °C. Dobijeni rezultati pokazuju da se sila pritiska može smanjiti za 442712 N (19,50 %) u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint).

Tabela 6.40 Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

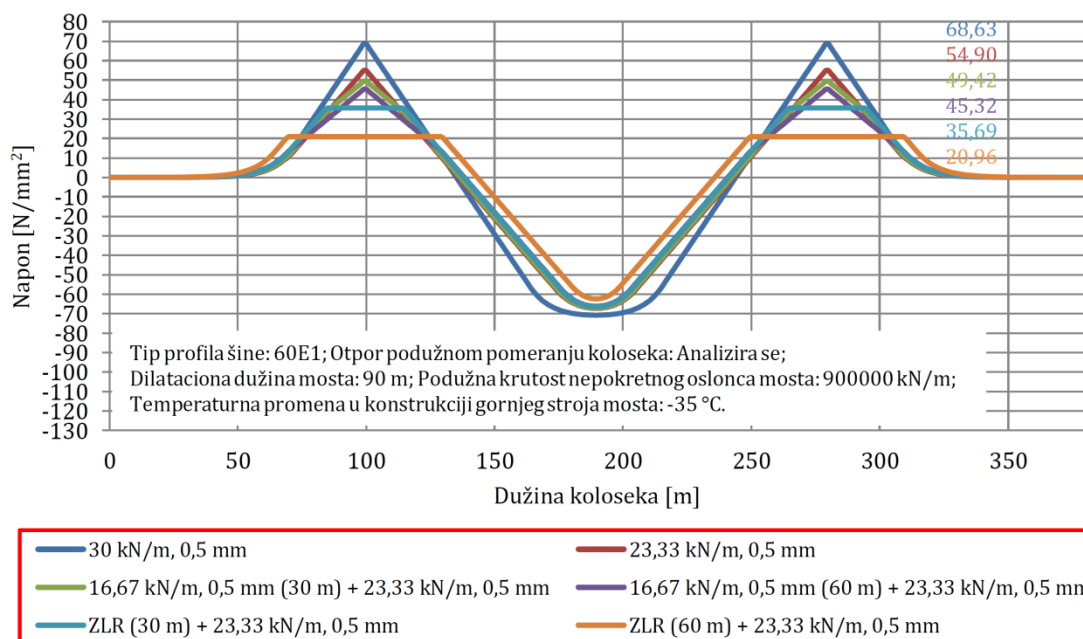
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Sila pritiska [N]	Smanjenje sile pritiska [%]
20 kN/m, 2 mm	-2270895	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-2228864	-1,85
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-2206774	-2,82
ZLR (2·30 m) + 20 kN/m, 2 mm	-2018399	-11,12
ZLR (2·60 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1828183	-19,50

Na slici 6.101 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za šest varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U drugoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U trećoj i četvrtoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U petoj i šestoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 30 m / 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 900000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $-35 \text{ }^\circ\text{C}$.

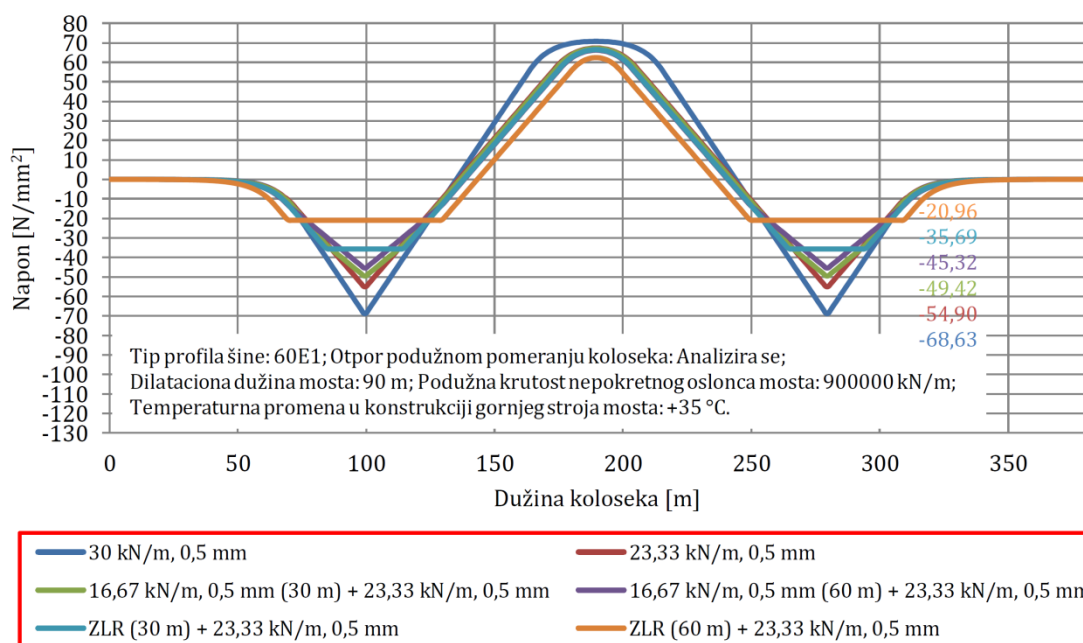


Slika 6.101 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Na slikama 6.102 i 6.103 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima, kao i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima (slika 6.101).



Slika 6.102 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.103 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

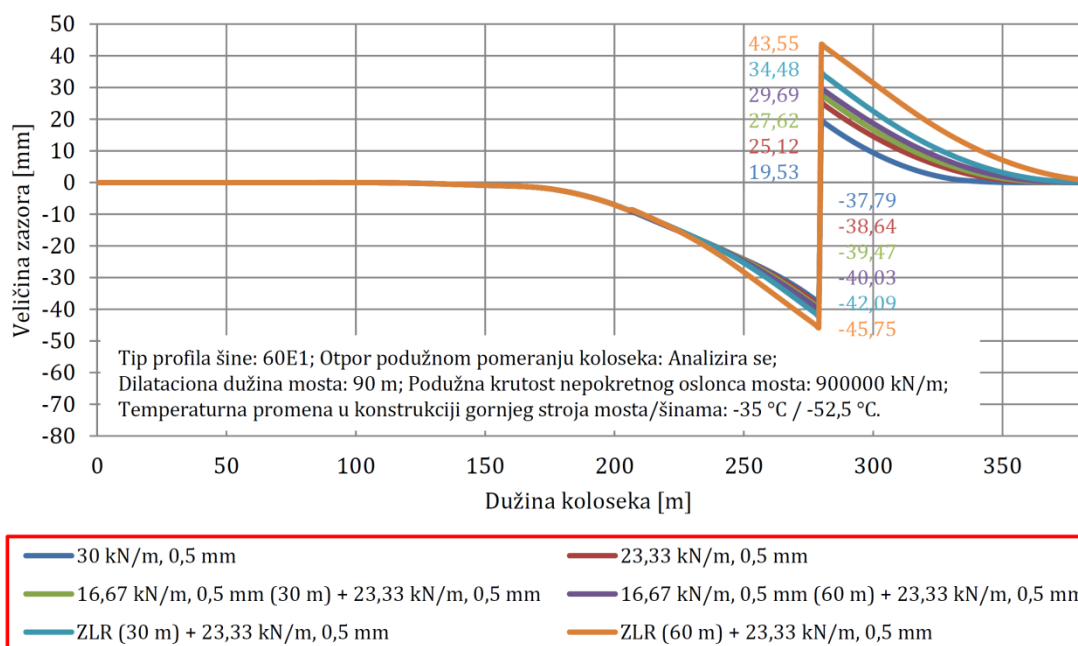
U tabeli 6.41 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 13,73 N/mm² (20,01 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom

pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 23,31 N/mm² (33,96 %). Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 47,67 N/mm² (69,46 %).

Tabela 6.41 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
30 kN/m, 0,5 mm	±68,63	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	±54,90	-20,01
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±49,42	-27,99
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±45,32	-33,96
ZLR (2·30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±35,69	-48,00
ZLR (2·60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±20,96	-69,46

Kao ograničavajući faktor pri smanjenju otpora podužnom pomeranju koloseka treba uzeti u obzir veličinu zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima. Na slici 6.104 prikazane su vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi u zimskim uslovima. Smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka dovodi do povećanja veličine zazora pri pucanju šine.



Slika 6.104 Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.42 prikazane su maksimalne vrednosti veličine zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna povećanja veličine zazora za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Veličine zazora određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od -52,5 °C i mostu od -35 °C. Dobijeni rezultati pokazuju da se veličina zazora pri pucanju šine može povećati za 6,44 mm (11,24 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično

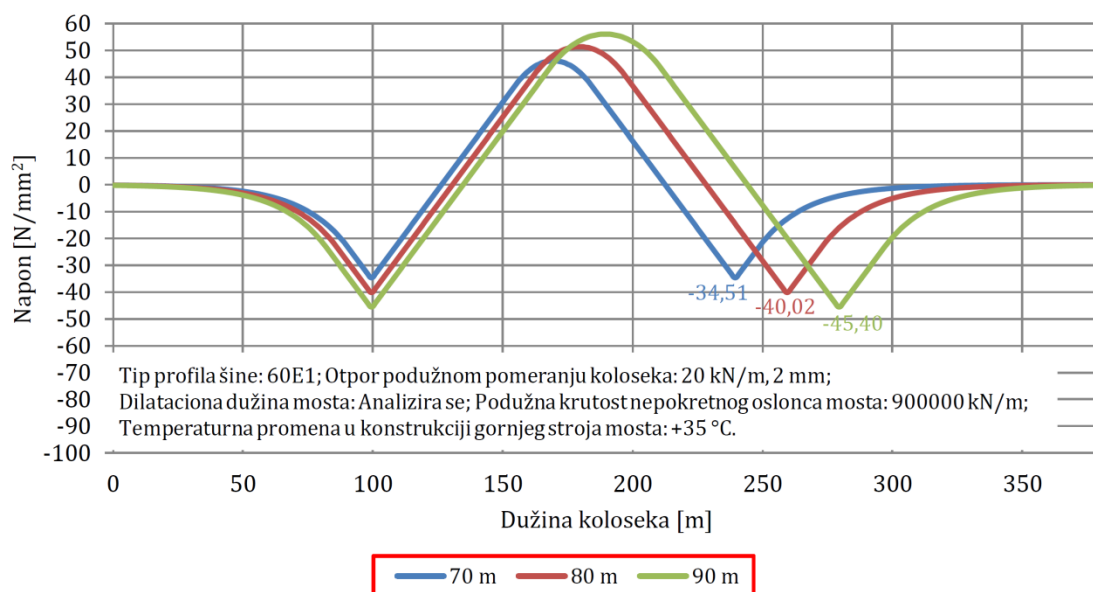
relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 12,40 mm (21,63 %). Takođe, u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacionih dužina mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 31,98 mm (55,79 %).

Tabela 6.42 Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

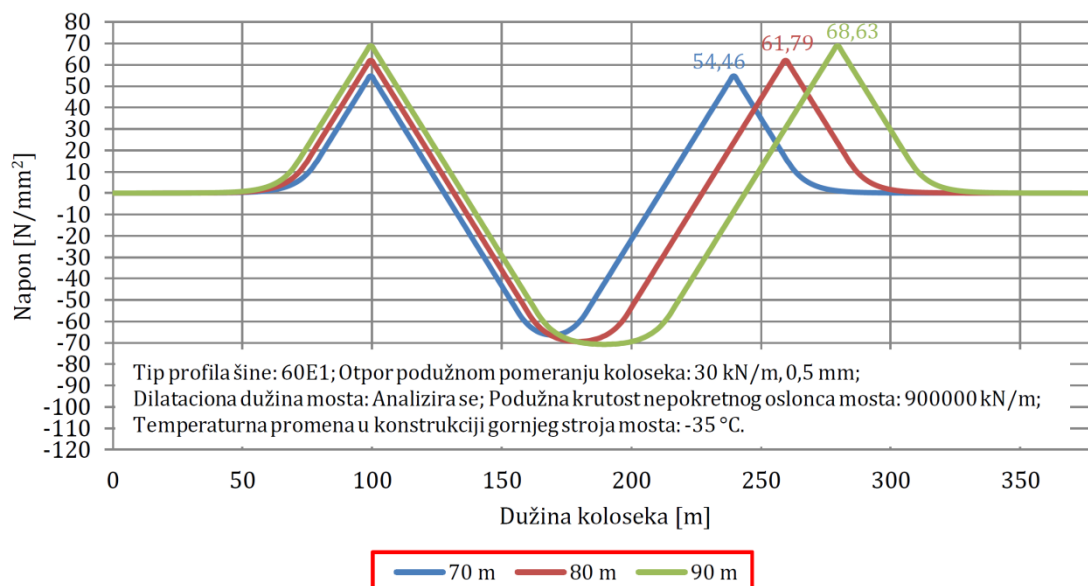
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Veličina zazora pri pucanju šine [mm]	Povećanje veličine zazora pri pucanju šine [%]
30 kN/m, 0,5 mm	57,32	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	63,76	+11,24
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	67,09	+17,04
16,67 kN/m, 0,5 mm (2·60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	69,72	+21,63
ZLR (2·30 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	76,57	+33,58
ZLR (2·60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	89,30	+55,79

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od dilatacione dužine mosta

Na slikama 6.105 i 6.106 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od dilatacione dužine mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimске uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 900000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.105 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.106 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.43 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojene dilatacione dužine mosta, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa smanjenjem dilatacione dužine mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju smanjenja dilatacione dužine mosta za 10 m dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za $5,38 \text{ N/mm}^2$ (11,85 %) u letnjim uslovima, odnosno za $6,84 \text{ N/mm}^2$ (9,97 %) u zimskim uslovima.

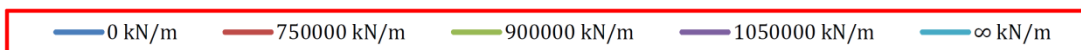
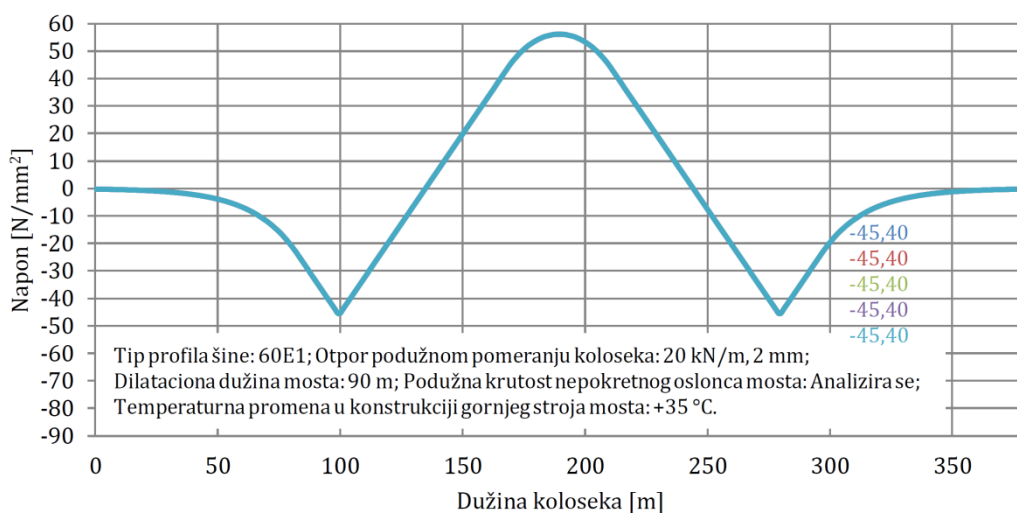
Tabela 6.43 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Dilataciona dužina mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm^2]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm^2]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
90 m	-45,40	68,63	/	/
80 m	-40,02	61,79	-11,85	-9,97
70 m	-34,51	54,46	-23,99	-20,65

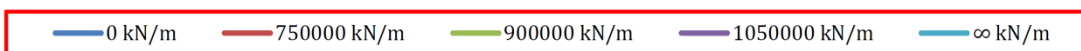
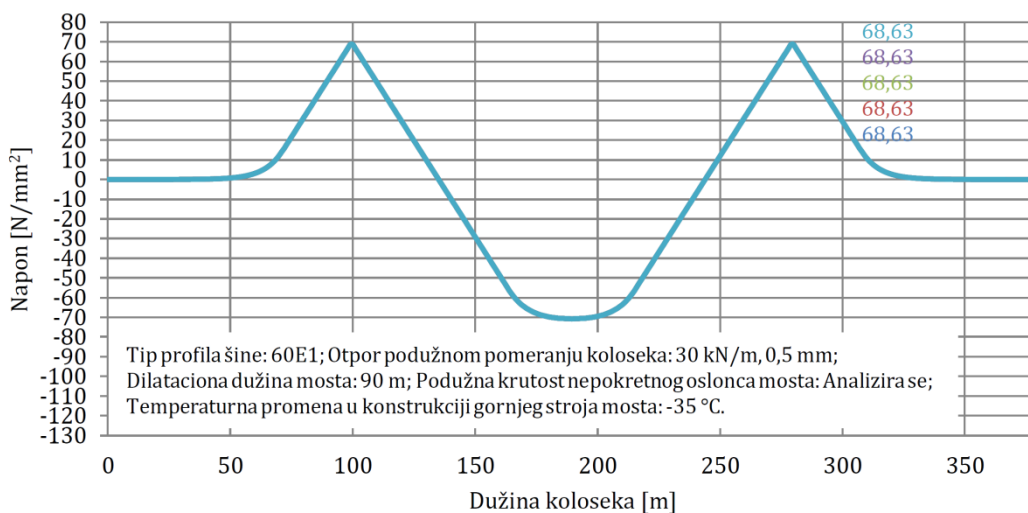
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta

Na slikama 6.107 i 6.108 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od $0,5 \text{ mm}$ na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 180 m , dok dilatacione dužine mosta iznose 90 m . Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od $+35 \text{ °C}$ u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Analizirane granične vrednosti podužne krutosti oslonca mosta od 0 kN/m i $\infty \text{ kN/m}$ predstavljaju teorijske vrednosti koje se odnose na idealno podužno pokretan, odnosno idealno podužno nepokretan oslonac mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi ne menjaju u zavisnosti od promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. Razlog je taj što je konstrukcija mosta simetrična. U slučajevima kada je konstrukcija mosta asimetrična,

tada postoji i promena vrednosti dodatnih temperaturnih napona usled promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta.



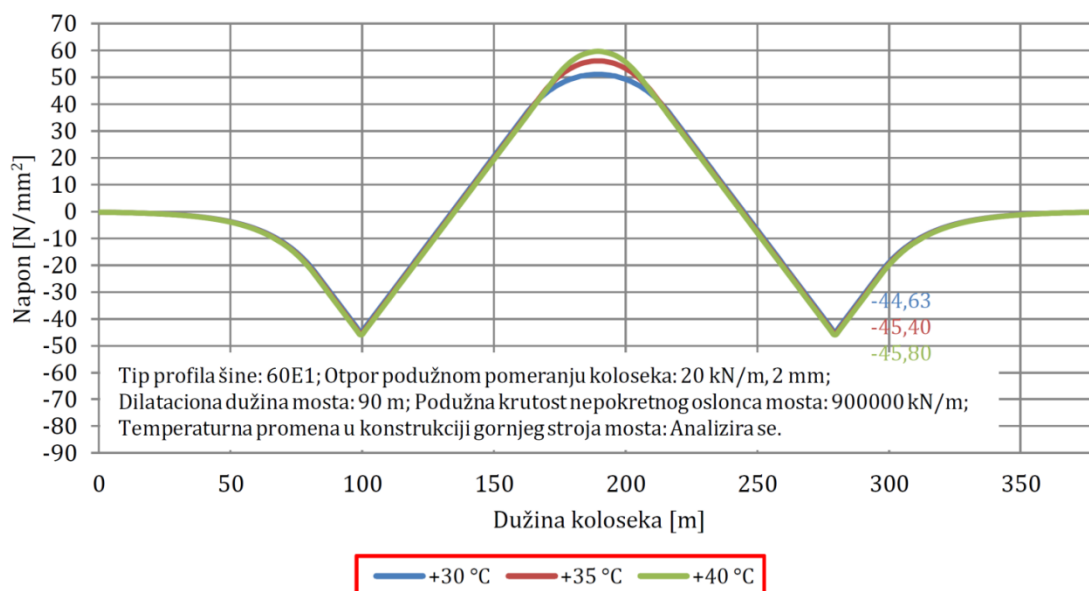
Slika 6.107 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



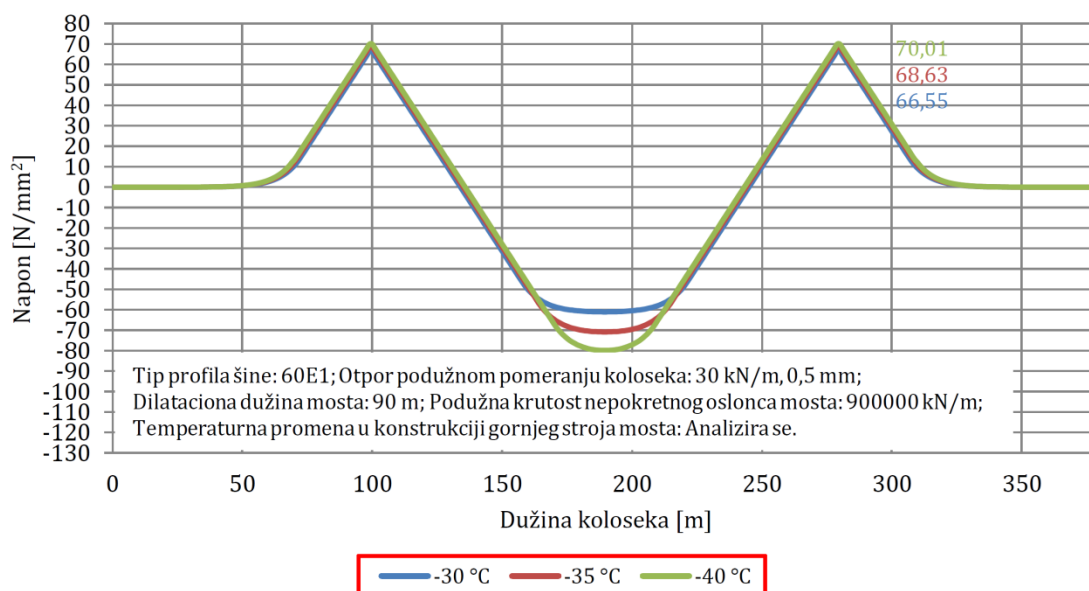
Slika 6.108 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Na slikama 6.109 i 6.110 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m, dok je podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 900000 kN/m.



Slika 6.109 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.110 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

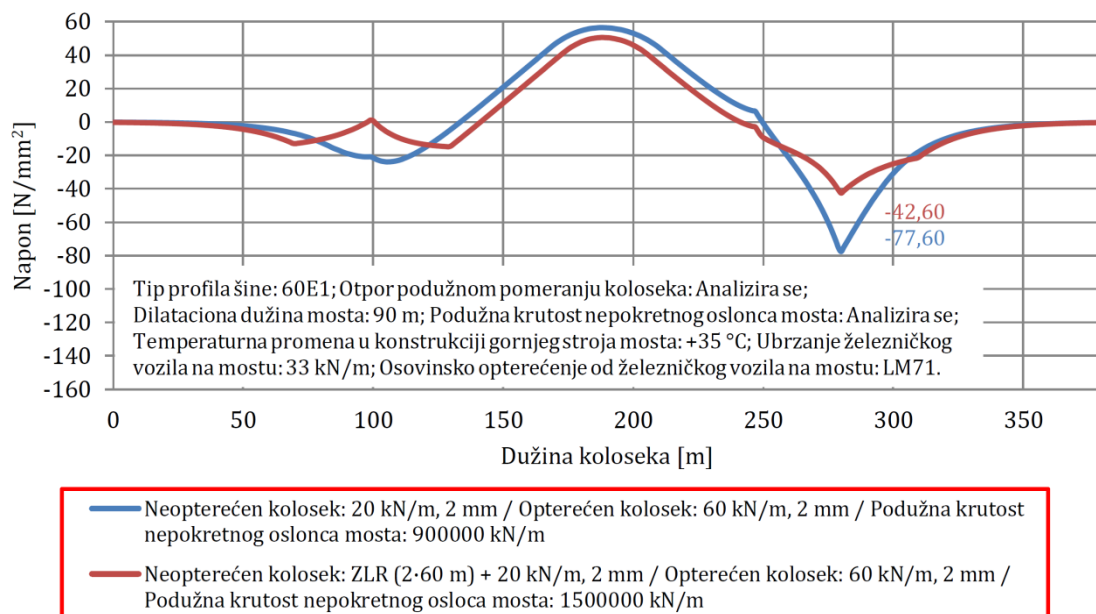
U tabeli 6.44 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i procentualna povećanja/smanjenja dodatnih temperaturnih napona usled povećanja/smanjenjem temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 0,77 N/mm² (1,70 %) u letnjim uslovima, odnosno za 2,08 N/mm² (3,03 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta smanji sa ±35 °C na ±30 °C. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 0,40 N/mm² (0,88 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,38 N/mm² (2,01 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta poveća sa ±35 °C na ±40 °C.

Tabela 6.44 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

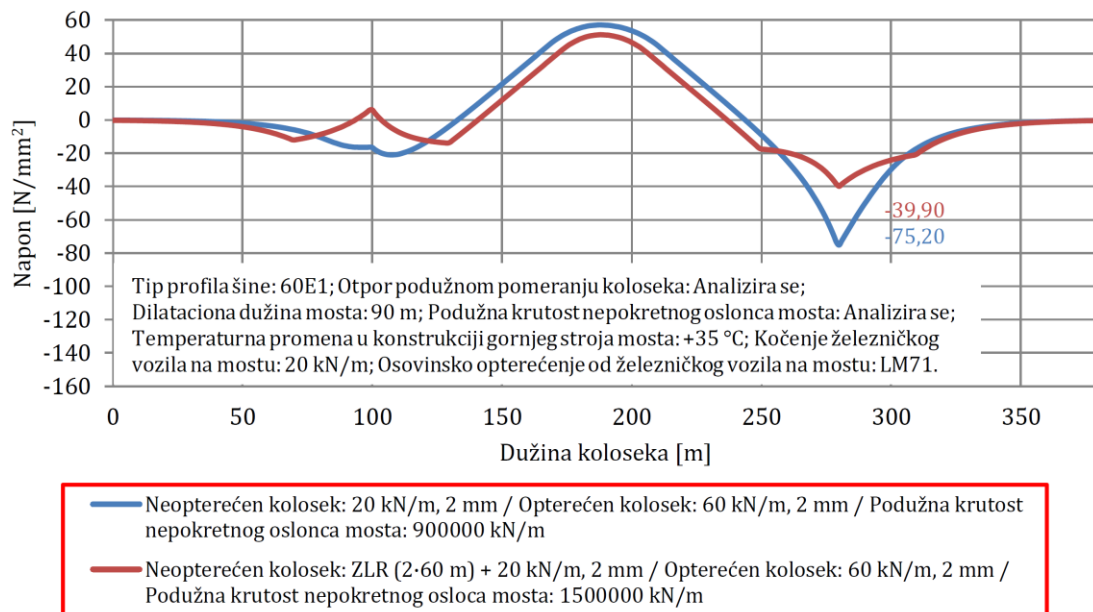
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
±40 °C	-45,80	70,01	+0,88	+2,01
±35 °C	-45,40	68,63	/	/
±30 °C	-44,63	66,55	-1,70	-3,03

Ukupni dodatni naponi i podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta

Na slikama 6.111, 6.112, 6.113 i 6.114 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti ukupnih dodatnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove, u prvoj varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka u letnjim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove, u prvoj varijanti, usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U drugoj varijanti, usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 60 m iznad pokretnih oslonaca mosta, dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka u zimskim uslovima iznosi 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm.

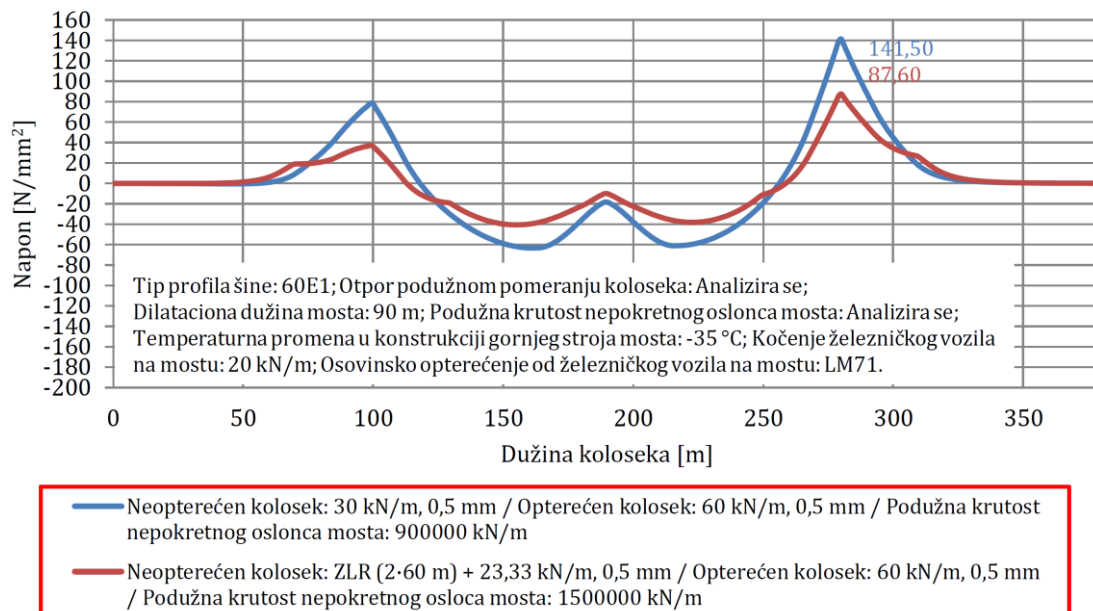


Slika 6.111 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

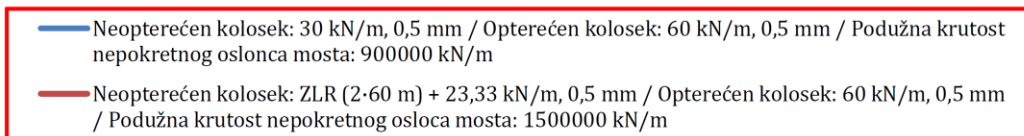
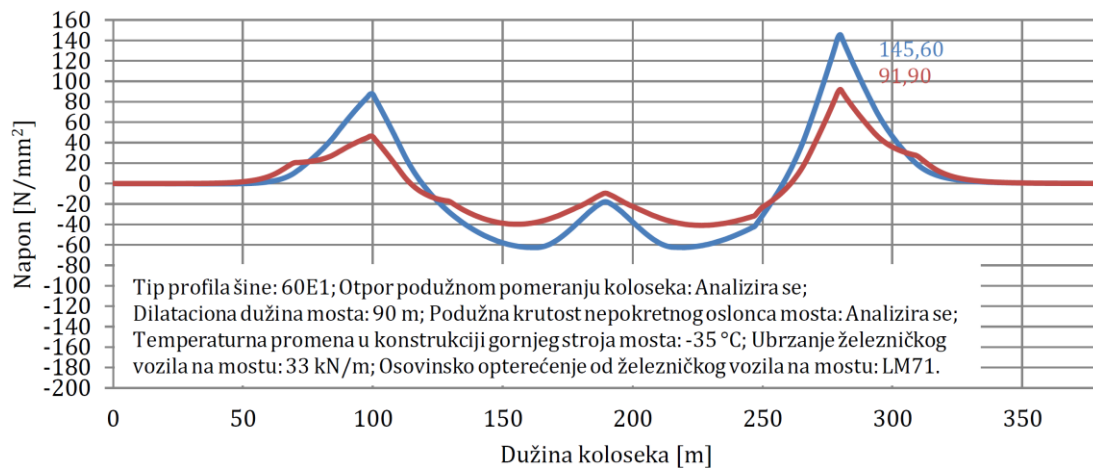


Slika 6.112 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m. U prvoj varijanti podužna krutost nepokretnog oslonca mosta iznosi 900000 kN/m, dok u drugoj varijanti iznosi 1500000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu iznosi 33 kN/m (ukupna sila $\leq 1000 \text{ kN}$), dok opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu iznosi 20 kN/m (ukupna sila $\leq 6000 \text{ kN}$). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



Slika 6.113 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa kočenjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



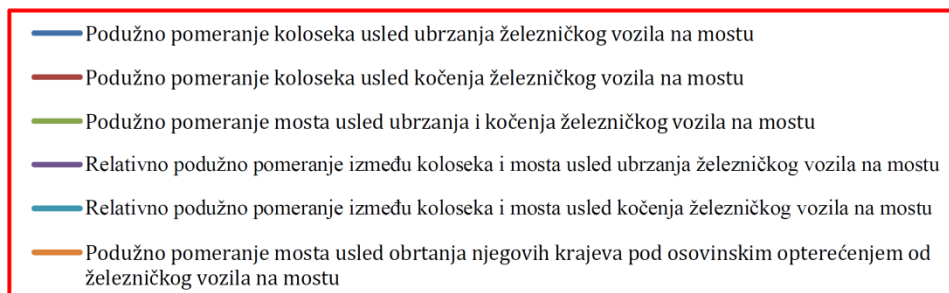
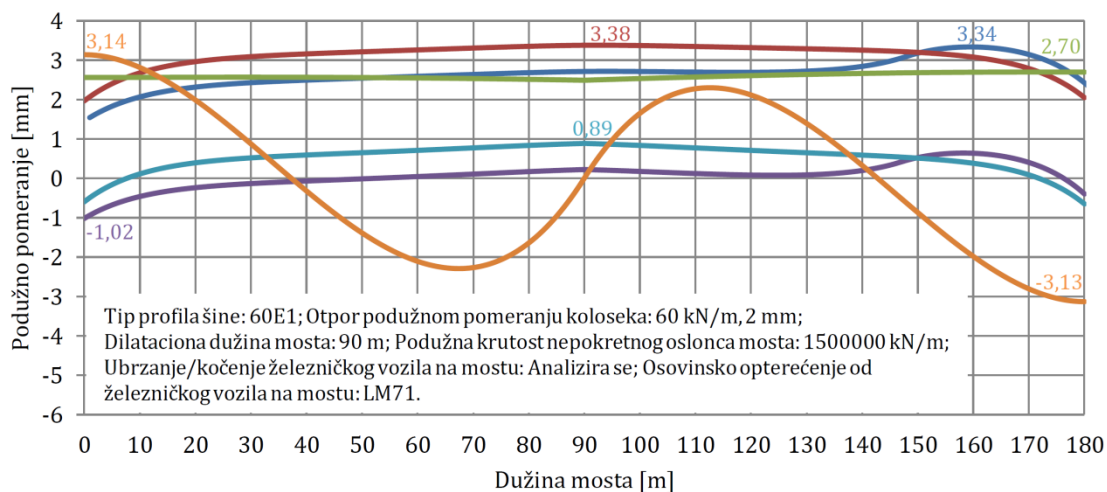
Slika 6.114 Vrednosti ukupnih dodatnih napona (sa ubrzanjem) u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.45 prikazane su maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima dodatnih napona pritiska i zatezanja. Primenom redukovanih otpora podužnom pomeranju neopterećenog koloseka i povećanoj podužnoj krutosti nepokretnog oslonca mosta maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona pritiska u letnjim uslovima $-42,60 \text{ N/mm}^2 < -72 \text{ N/mm}^2$, kao i maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona zatezanja u zimskim uslovima $91,90 \text{ N/mm}^2 < 92 \text{ N/mm}^2$ ne prekoračuju dozvoljene vrednosti dodatnih napona pritiska i zatezanja.

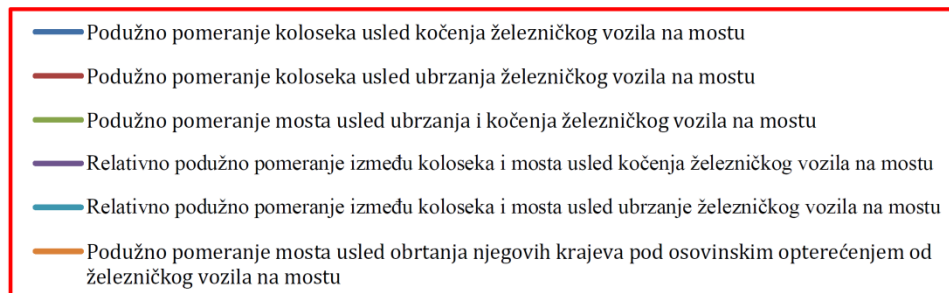
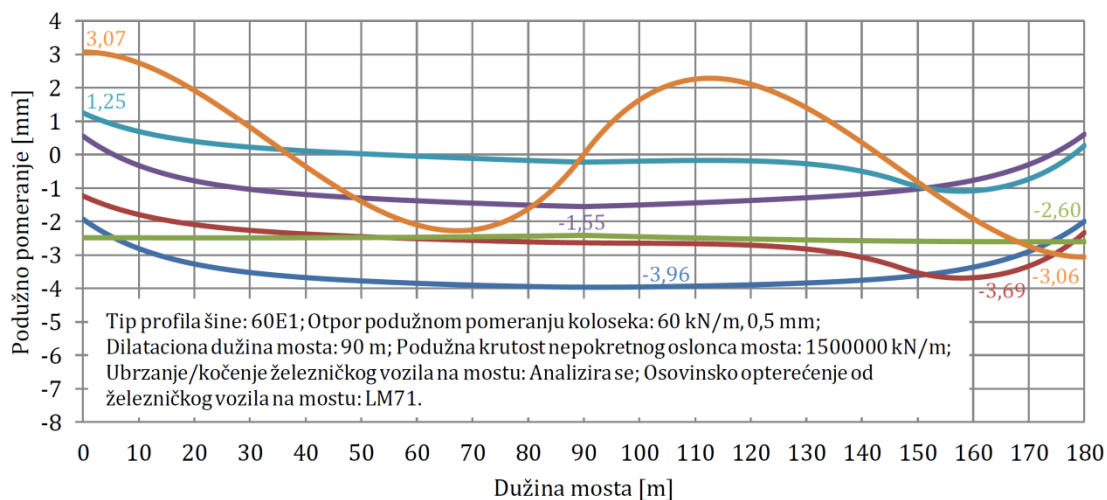
Tabela 6.45 Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonski kontinualni nosač raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju neopterećenog/opterećenog koloseka i podužna krutost nepokretnog oslonca mosta	Ukupni dodatni naponi (sa ubrzanjem) [N/mm ²]	Ukupni dodatni naponi (sa kočenjem) [N/mm ²]	Dozvoljeni dodatni naponi [N/mm ²]
Letnji uslovi			
20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm / 900000 kN/m	-77,60	-75,20	> -72
ZLR (2·60 m) + 20 kN/m, 2 mm / 60 kN/m, 2 mm / 1500000 kN/m	-42,60	-39,90	≤ -72
Zimski uslovi			
30 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm / 900000 kN/m	145,60	141,50	> 92
ZLR (2·60 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm / 60 kN/m, 0,5 mm / 1500000 kN/m	91,90	87,60	≤ 92

Na slikama 6.115 i 6.116 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta u letnjim i zimskim uslovima usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu.



Slika 6.115 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.116 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Dužina mosta iznosi 180 m, dilatacione dužine mosta iznose 90 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 1500000 kN/m. Proračun je sproveden za opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu koje iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), kao i opterećenje od kočnja železničkog vozila na mostu koje iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.

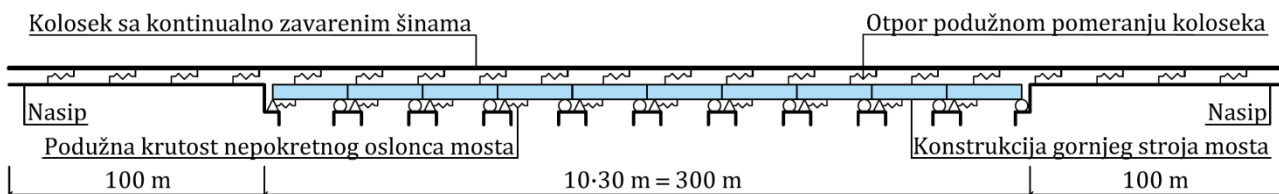
U tabeli 6.46 prikazane su maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočnja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima podužnih pomeranja. U skladu sa dobijenim rezultatima, podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta zadovoljavaju dozvoljene vrednosti podužnih pomeranja.

Tabela 6.46 Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočnja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonski kontinualni nosač raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

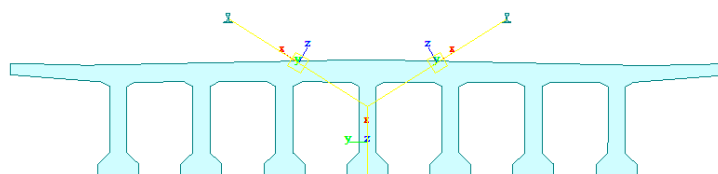
Konstrukcija (opterećenje)	Podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	2,70	≤ 5	2,60	≤ 5
Kolosek/most (ubrzanje)	1,02	≤ 4	1,25	≤ 4
Kolosek/most (kočenje)	0,89	≤ 4	1,55	≤ 4
Most (LM71)	3,14	≤ 8	3,07	≤ 8

6.4.5 Studija slučaja 5: Mostovska konstrukcija tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

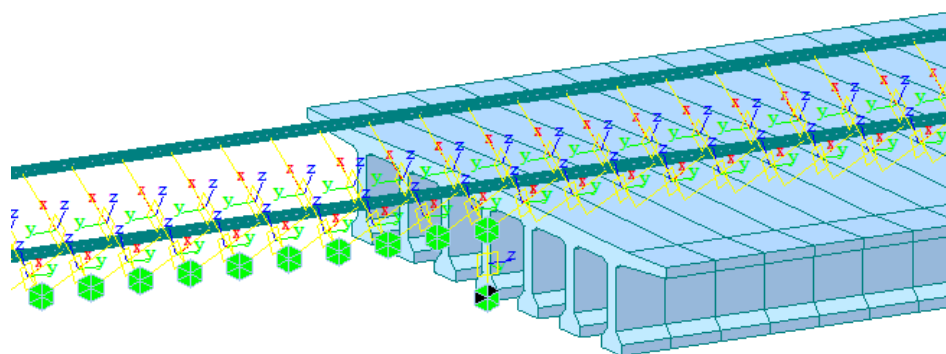
U ovoj studiji slučaja sproveden je proračun interakcije kolosek/most i ispitan je uticaj parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u slučaju mostovske konstrukcije tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom. Na slikama 6.117, 6.118 i 6.119 prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosek/most.



Slika 6.117 Numerički model za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.118 Poprečni presek u numeričkom modelu za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.119 Detalj numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most sa elementima veza između koloseka, mosta i zemljanog trupa - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.47 prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most koje se odnose na: konačne elemente i elemente veza, parametre konstrukcije koloseka, parametre konstrukcije mosta, kao i na parametre opterećenja modela.

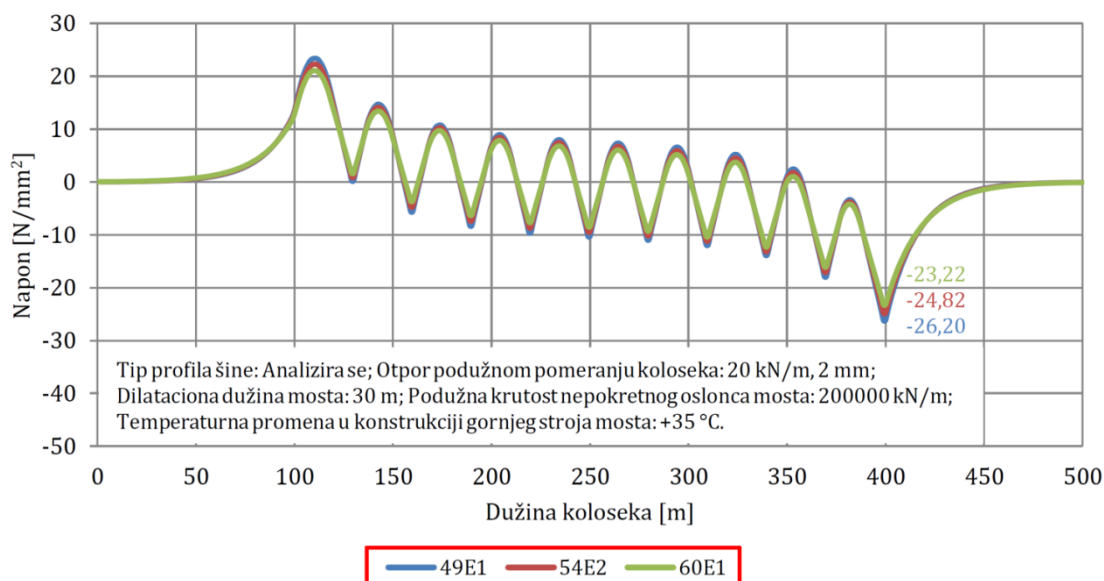
Tabela 6.47 Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosek/most - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Konačni elementi i elementi veza	
Tip konačnih elemenata (broj elemenata):	Prostorni linijski konačni element (2100)
Tipovi elemenata veza (broj veza):	General elastic link (622) Rigid elastic link (20) Multi linear elastic link (3668)
Parametri konstrukcije koloseka	
Tip profila šine:	49E1, 54E2, 60E1
Kvalitet šinskog čelika:	R260 (klasa čelika) $\sigma_a = 900 \text{ N/mm}^2$ (zatezna čvrstoća) $E = 21 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti) $\nu = 0,3$ (Poisson-ov koeficijent) $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja) $\rho = 78,5 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (letnji uslovi):	Varijanta 1: 20 kN/m (na celoj dužini koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 2: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 10 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 4: ZLR (na dužini koloseka od 10 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje) Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta) + 20 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 2 mm (granično relativno pomeranje)

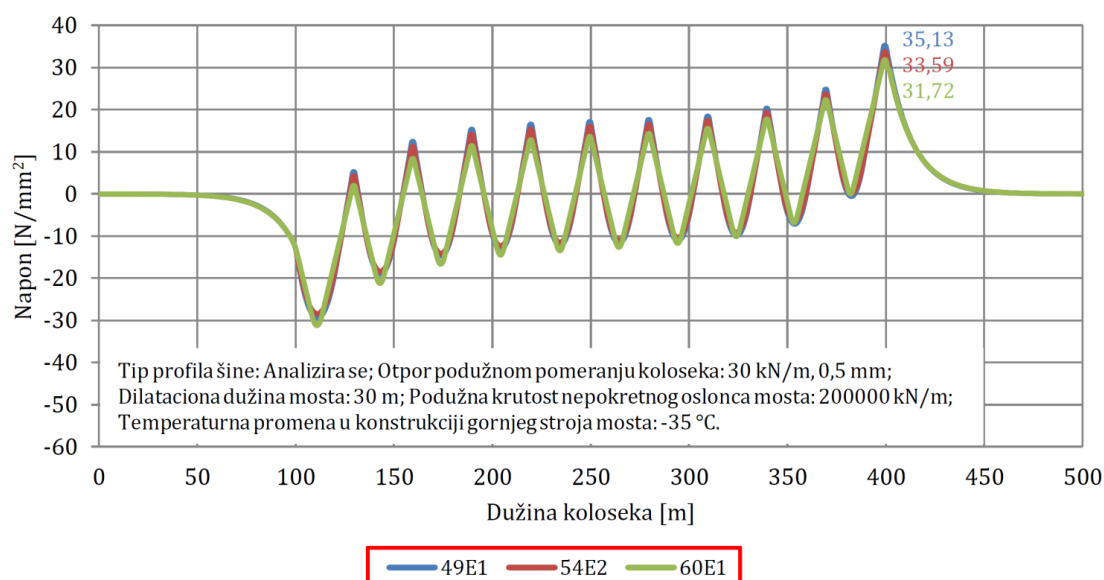
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (letnji uslovi):	60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomeranje)
Otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka (zimski uslovi):	<p>Varijanta 1: 30 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p> <p>Varijanta 2: 23,33 kN/m (na celoj dužini koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p> <p>Varijanta 3: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 10 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p> <p>Varijanta 4: 16,67 kN/m (na dužini koloseka od 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta), 0,5 mm (granično relativno pomeranje) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p> <p>Varijanta 5: ZLR (na dužini koloseka od 10 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p> <p>Varijanta 6: ZLR (na dužini koloseka od 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta) + 23,33 kN/m (na ostatku dužine koloseka), 0,5 mm (granično relativno pomeranje)</p>
Otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka (zimski uslovi):	60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomeranje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj koloseka na mostu:	2 (dvokolosečni most)
Statički sistem mosta:	proste grede u nizu
Rasponi i ukupna dužina mosta:	10·20 m = 200 m, 10·25 m = 250 m, 10·30 m = 300 m
Dilatacione dužine mosta:	20 m, 25 m, 30 m
Raspored oslonaca mosta:	N (nepokretno) - P (pokretno)
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta:	0 kN/m, 100000 kN/m, 200000 kN/m, 300000 kN/m, ∞ kN/m
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	<p>$A = 8,40 \text{ m}^2$ (površina poprečnog preseka)</p> <p>$I_{yy} = 3,80 \text{ m}^4$ (moment inercije - Y osa)</p> <p>$I_{zz} = 82,60 \text{ m}^4$ (moment inercije - Z osa)</p> <p>$h = 2 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg stroja mosta)</p> <p>$W = 12,5 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg stroja mosta)</p>
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg stroja mosta:	<p>C 40/50 (klasa betona)</p> <p>$E = 3,52 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Young-ov modul elastičnosti)</p> <p>$\nu = 0,2$ (Poisson-ov koeficijent)</p> <p>$\alpha = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (koeficijent termičkog širenja)</p> <p>$\rho = 25 \text{ kN/m}^3$ (gustina materijala)</p>
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta:	+30 °C, +35 °C, +40 °C (letnji uslovi) -30 °C, -35 °C, -40 °C (zimski uslovi)
Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu:	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu:	LM71 (šema opterećenja)

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od tipa profila šine

Na slikama 6.120 i 6.121 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine. Analizirano je tri tipa profila šine: 49E1, 54E2 i 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 300 m, dilatacione dužine mosta iznose 30 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnih oslonaca mosta 200000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.



Slika 6.120 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.121 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.48 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem površine poprečnog preseka šine. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni

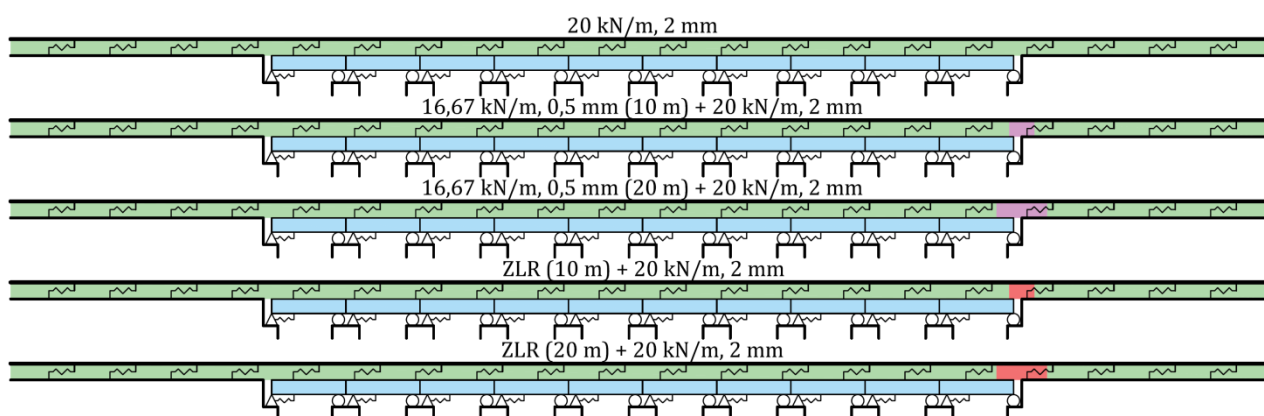
temperaturni naponi mogu smanjiti za 2,98 N/mm² (11,37 %) u letnjim uslovima, odnosno za 3,41 N/mm² (9,71 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1.

Tabela 6.48 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od tipa profila šine - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Tip profila šine	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
49E1	-26,20	35,13	/	/
54E2	-24,82	33,59	-5,27	-4,38
60E1	-23,22	31,72	-11,37	-9,71

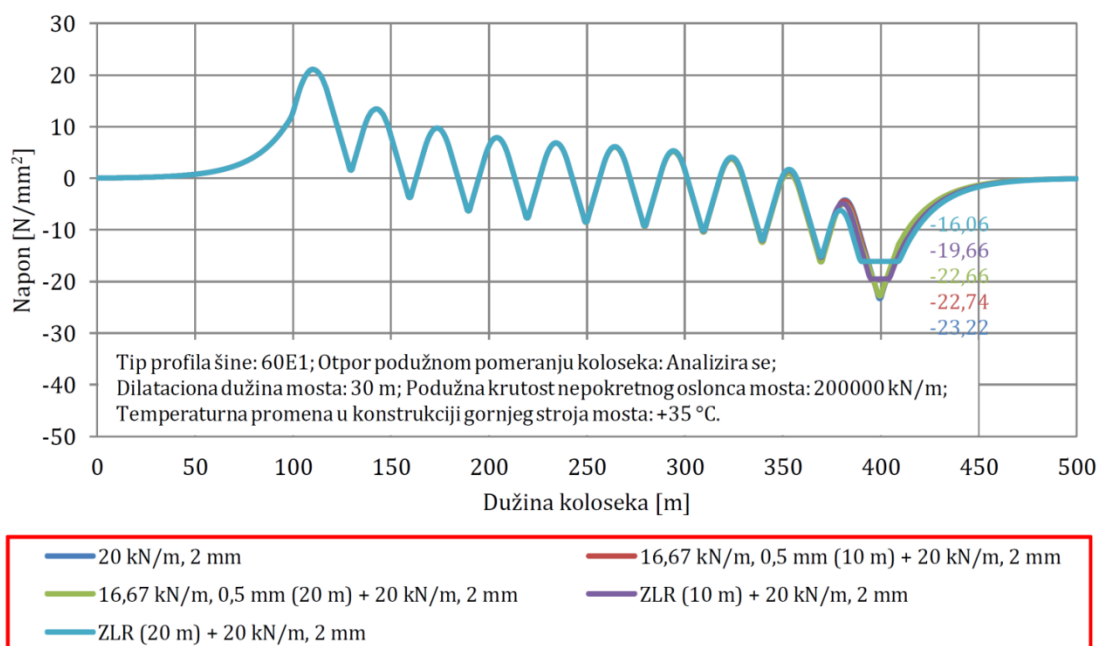
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka

Na slici 6.122 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za pet varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U drugoj i trećoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 10 m / 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U četvrtoj i petoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 10 m / 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 300 m, dilatacione dužine mosta iznose 30 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnih oslonaca mosta 200000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C.



Slika 6.122 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Na slici 6.123 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima (slika 6.122).



Slika 6.123 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.49 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za $0,56 \text{ N/mm}^2$ (2,41 %) u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od $16,67 \text{ kN/m}$ za granično relativno pomeranje od 0,5 mm. Takođe, u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za $7,16 \text{ N/mm}^2$ (30,84 %).

Tabela 6.49 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
20 kN/m, 2 mm	-23,22	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (10 m) + 20 kN/m, 2 mm	-22,74	-2,07
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-22,66	-2,41
ZLR (10 m) + 20 kN/m, 2 mm	-19,66	-15,33
ZLR (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-16,06	-30,84

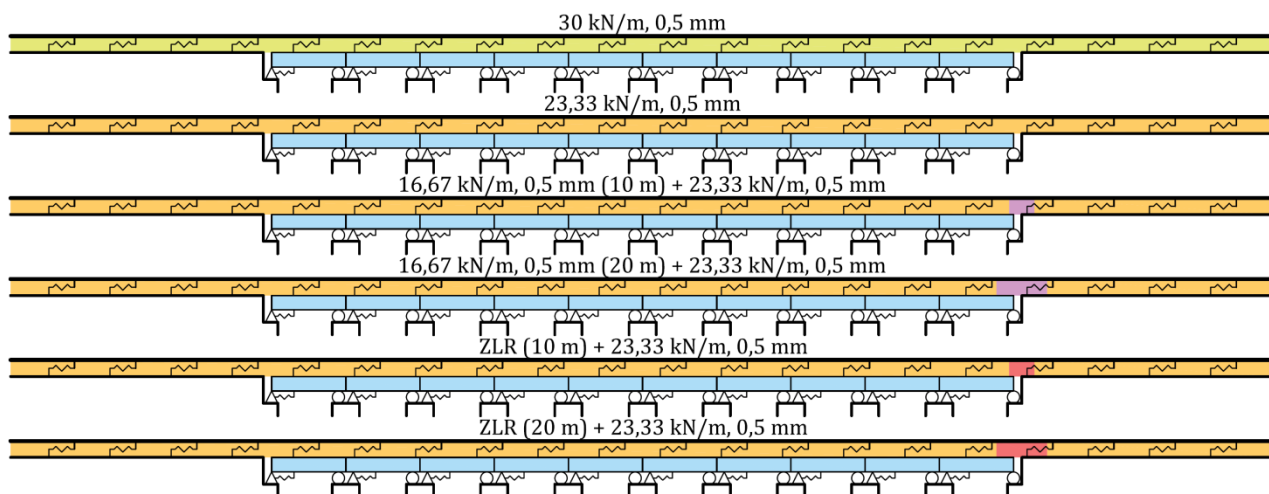
U tabeli 6.50 prikazane su maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u zastoru od tucanika u letnjim uslovima u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna smanjenja sile pritiska za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Sile pritiska određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od $+42,5 \text{ °C}$ i mostu od $+35 \text{ °C}$. Dobijeni rezultati pokazuju da se sila pritiska može smanjiti za 109834 N (5,69 %) u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog

oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint).

Tabela 6.50 Maksimalne vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

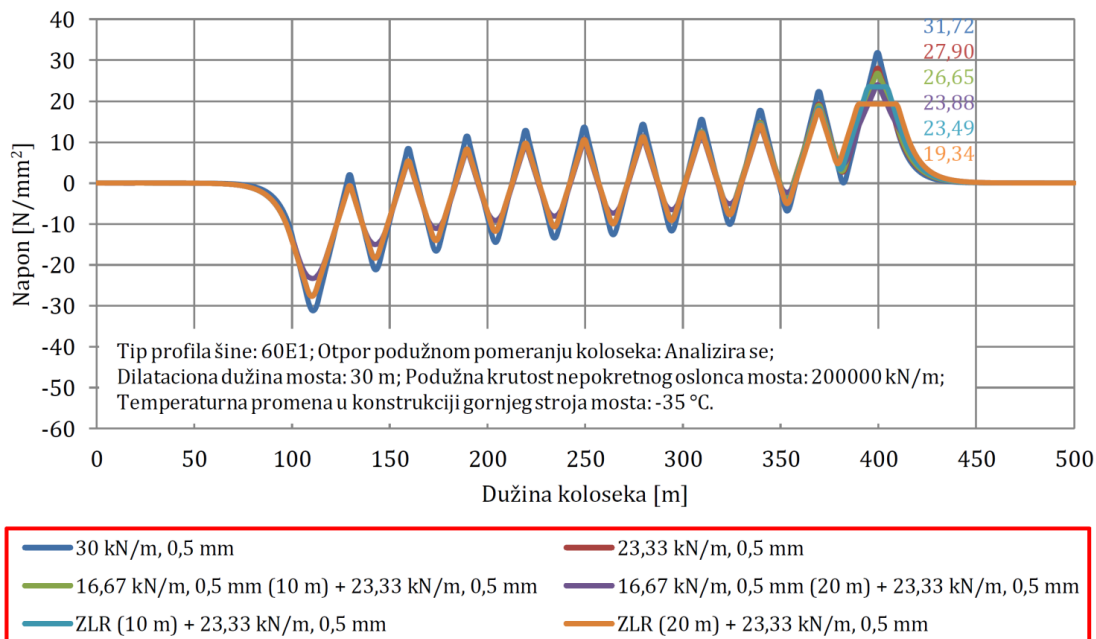
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Sila pritiska [N]	Smanjenje sile pritiska [%]
20 kN/m, 2 mm	-1930654	/
16,67 kN/m, 0,5 mm (10 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1923291	-0,38
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1922064	-0,44
ZLR (10 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1876044	-2,83
ZLR (20 m) + 20 kN/m, 2 mm	-1820820	-5,69

Na slici 6.124 prikazane su varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima. Proračun interakcije kolosek/most sproveden je za šest varijanti otpora podužnom pomeranju koloseka. U prvoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U drugoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U trećoj i četvrtoj varijanti usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na dužini od 10 m / 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U petoj i šestoj varijanti usvojen je ZLR (Zero Longitudinal Restraint) na dužini od 10 m / 20 m iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima), dok je na ostatku dužine koloseka usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima). U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Dužina mosta iznosi 300 m, dilatacione dužine mosta iznose 30 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnih oslonaca mosta 200000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturnu promenu u konstrukciji gornjeg stroja mosta od -35 °C.

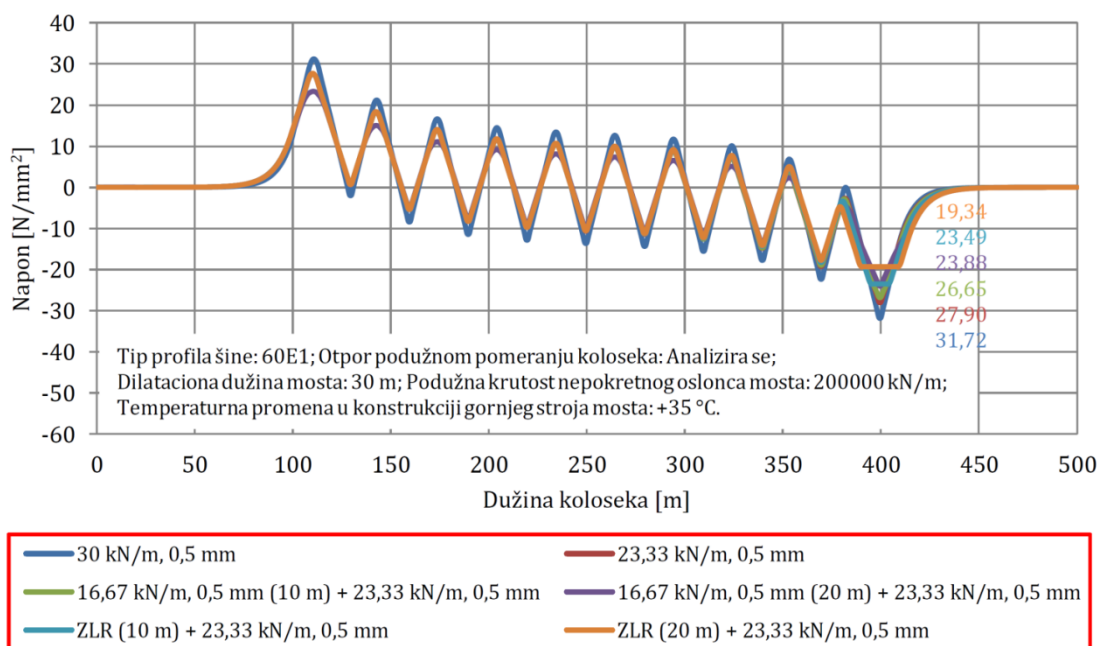


Slika 6.124 Varijante otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Na slikama 6.125 i 6.126 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima, kao i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima (slika 6.124).



Slika 6.125 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.126 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka na čvrstoj podlozi (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

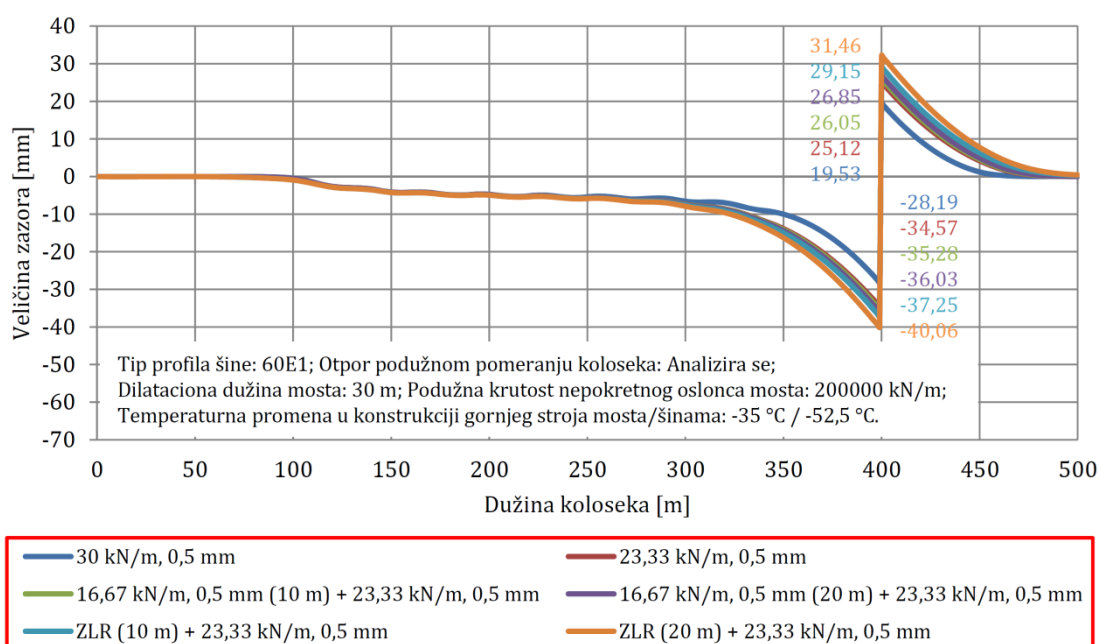
U tabeli 6.51 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenih otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika u zimskim uslovima i na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima, kao i procentualna smanjenja dodatnih temperaturnih napona za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 4,02 N/mm²

(12,67 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 7,84 N/mm² (24,72 %). Takođe, u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti za 12,38 N/mm² (39,03 %).

Tabela 6.51 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika (zimski uslovi) i na čvrstoj podlozi (letnji i zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Otpor podužnom pomeranju koloseka	Dodatni temperaturni naponi [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona [%]
30 kN/m, 0,5 mm	±31,72	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	±27,70	-12,67
16,67 kN/m, 0,5 mm (10 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±26,65	-15,98
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±23,88	-24,72
ZLR (10 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±23,49	-25,95
ZLR (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	±19,34	-39,03

Kao ograničavajući faktor pri smanjenju otpora podužnom pomeranju koloseka treba uzeti u obzir veličinu zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima. Na slici 6.127 prikazane su vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi u zimskim uslovima. Smanjenje otpora podužnom pomeranju koloseka dovodi do povećanja veličine zazora pri pucanju šine.



Slika 6.127 Vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

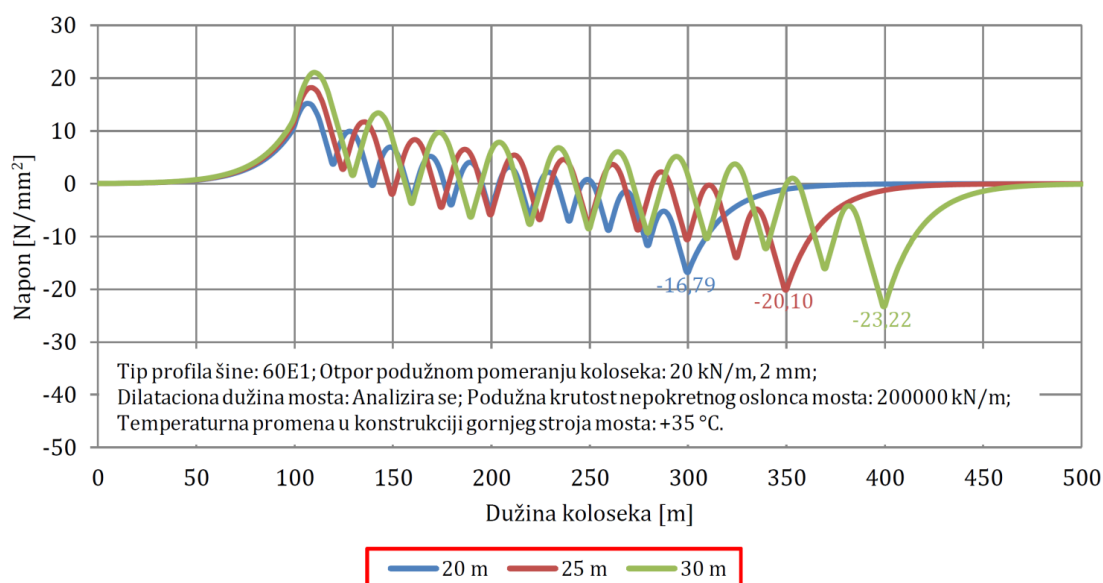
U tabeli 6.52 prikazane su maksimalne vrednosti veličine zazora pri pucanju šine u zavisnosti od usvojenog otpora podužnom pomeranju koloseka, kao i procentualna povećanja veličine zazora za redukovane otpore podužnom pomeranju koloseka. Veličine zazora određene su za maksimalne temperaturne promene u šini od $-52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i mostu od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dobijeni rezultati pokazuju da se veličina zazora pri pucanju šine može povećati za 11,97 mm (25,08 %) u slučaju kada se primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. U slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni redukovani otpor podužnom pomeranju koloseka od 16,67 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm, a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 15,16 mm (31,77 %). Takođe, u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint), a na ostatku dužine koloseka otpor podužnom pomeranju koloseka od 23,33 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm veličina zazora pri pucanju šine može se povećati za 23,80 mm (49,87 %).

Tabela 6.52 Maksimalne vrednosti zazora pri pucanju šine u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka u zastoru od tucanika i na čvrstoj podlozi (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10-30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

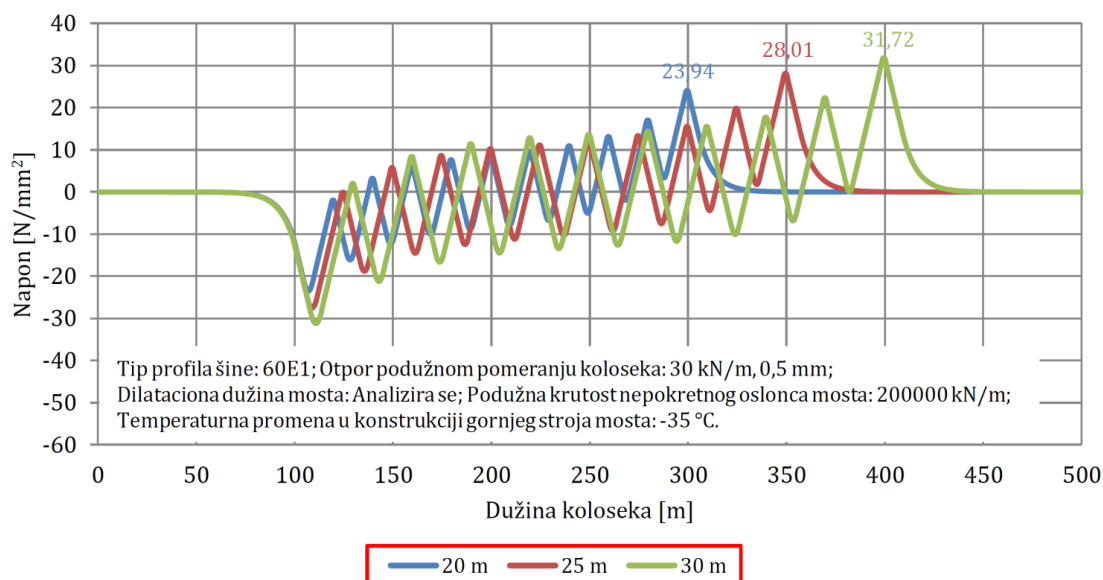
Otpor podužnom pomeranju koloseka	Veličina zazora pri pucanju šine [mm]	Povećanje veličine zazora pri pucanju šine [%]
30 kN/m, 0,5 mm	47,72	/
23,33 kN/m, 0,5 mm	59,69	+25,08
16,67 kN/m, 0,5 mm (10 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	61,33	+28,52
16,67 kN/m, 0,5 mm (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	62,88	+31,77
ZLR (10 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	66,40	+39,15
ZLR (20 m) + 23,33 kN/m, 0,5 mm	71,52	+49,87

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od dilatacione dužine mosta

Na slikama 6.128 i 6.129 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od dilatacione dužine mosta.



Slika 6.128 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10-30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.129 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Podužna krutost nepokretnih oslonaca mosta iznosi 200000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima.

U tabeli 6.53 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojene dilatacione dužine mosta, kao i procentualno smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa smanjenjem dilatacione dužine mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju smanjenja dilatacione dužine mosta za 10 m dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 6,43 N/mm² (27,69 %) u letnjim uslovima, odnosno za 7,78 N/mm² (24,53 %) u zimskim uslovima.

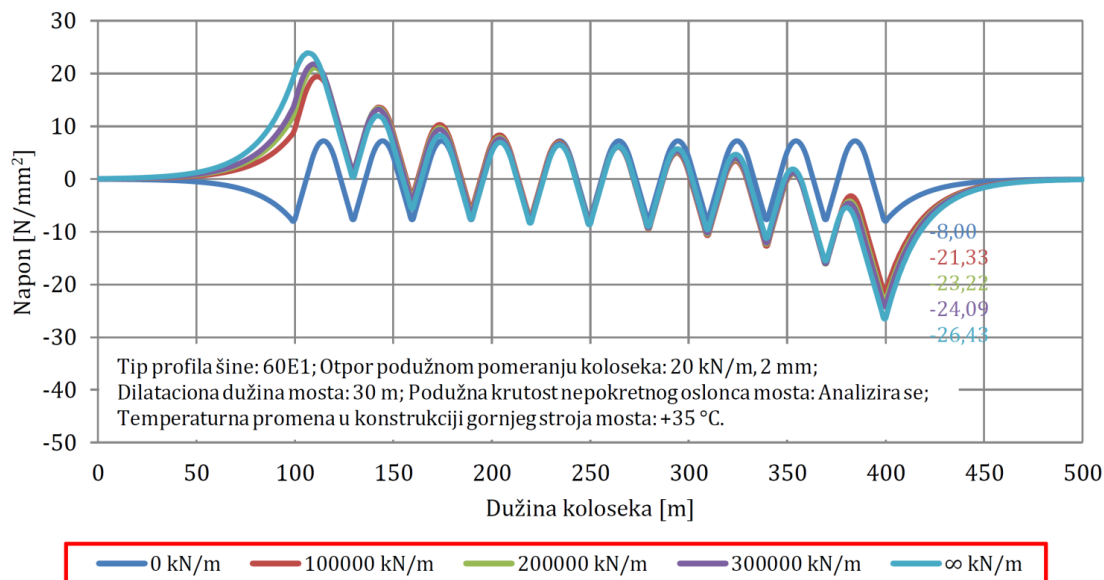
Tabela 6.53 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Dilataciona dužina mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
30 m	-23,22	31,72	/	/
25 m	-20,10	28,01	-13,44	-11,70
20 m	-16,79	23,94	-27,69	-24,53

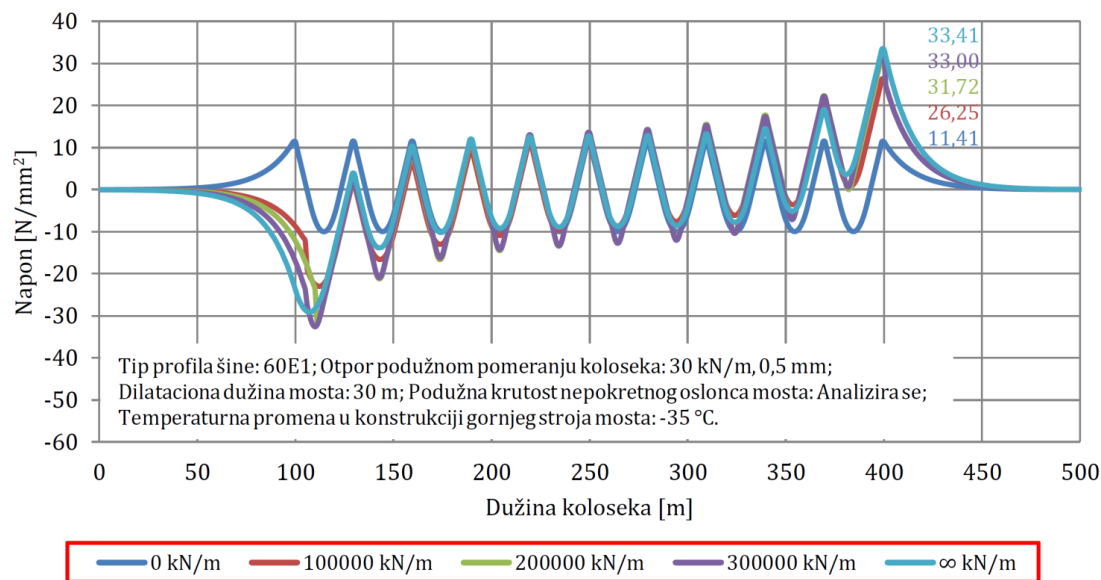
Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta

Na slikama 6.130 i 6.131 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove

usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 300 m, dok dilatacione dužine mosta iznose 30 m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Analizirane granične vrednosti podužne krutosti oslonca mosta od 0 kN/m i ∞ kN/m predstavljaju teorijske vrednosti koje se odnose na idealno podužno pokretan, odnosno idealno podužno nepokretan oslonac mosta.



Slika 6.130 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.131 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.54 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, kao i procentualno povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona sa povećanjem/smanjenjem podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta. U teorijskom smislu, dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 15,22 N/mm² (65,55 %) u letnjim uslovima, odnosno za 20,31

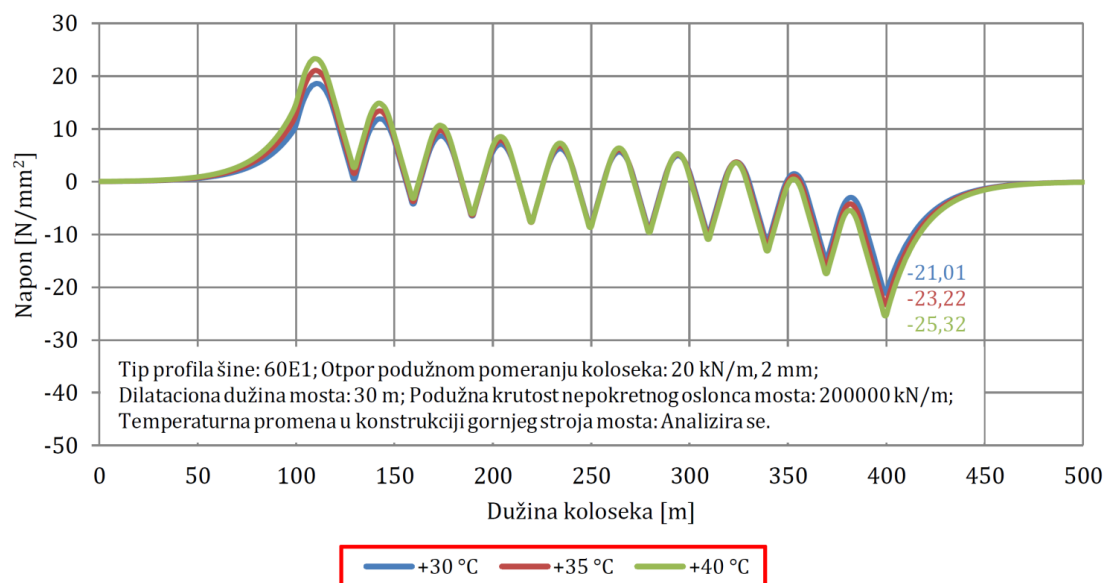
N/mm² (64,03 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta smanji sa 200000 kN/m na 0 kN/m. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 3,21 N/mm² (13,82 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,69 N/mm² (5,33 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se podužna krutost nepokretnog oslonca mosta poveća sa 200000 kN/m na ∞ kN/m.

Tabela 6.54 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10-30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

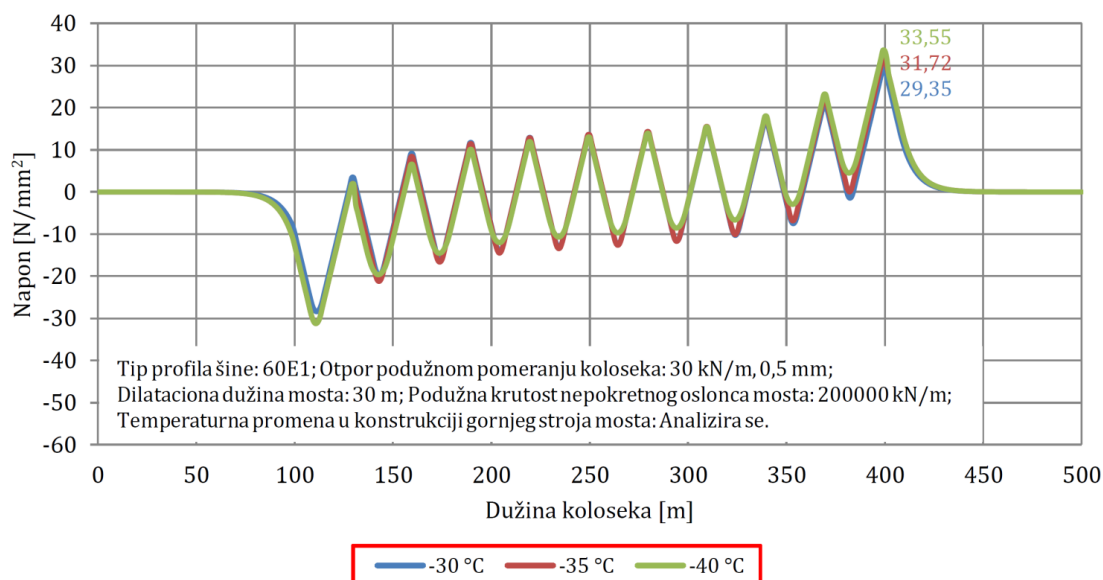
Podužna krutost nepokretnog oslonca mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
∞ kN/m	-26,43	33,41	+13,82	+5,33
300000 kN/m	-24,09	33,00	+3,75	+4,04
200000 kN/m	-23,22	31,72	/	/
100000 kN/m	-21,33	26,25	-8,14	-17,24
0 kN/m	-8,00	11,41	-65,55	-64,03

Dodatni temperaturni naponi u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta

Na slikama 6.132 i 6.133 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti dodatnih temperaturnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od usvojene temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je za zimske uslove usvojen otpor podužnom pomeranju koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka. Dužina mosta iznosi 300 m, dilatacione dužine mosta iznose 30 m, dok je podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 200000 kN/m.



Slika 6.132 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10-30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.133 Vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.55 prikazane su maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta, kao i procentualna povećanja/smanjenja dodatnih temperaturnih napona usled povećanja/smanjenjem temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi mogu smanjiti za 2,21 N/mm² (9,52 %) u letnjim uslovima, odnosno za 2,37 N/mm² (7,47 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta smanji sa ±35 °C na ±30 °C. Sa druge strane, dodatni temperaturni naponi mogu se povećati za 2,10 N/mm² (9,04 %) u letnjim uslovima, odnosno za 1,83 N/mm² (5,77 %) u zimskim uslovima u slučaju kada se temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta poveća sa ±35 °C na ±40 °C.

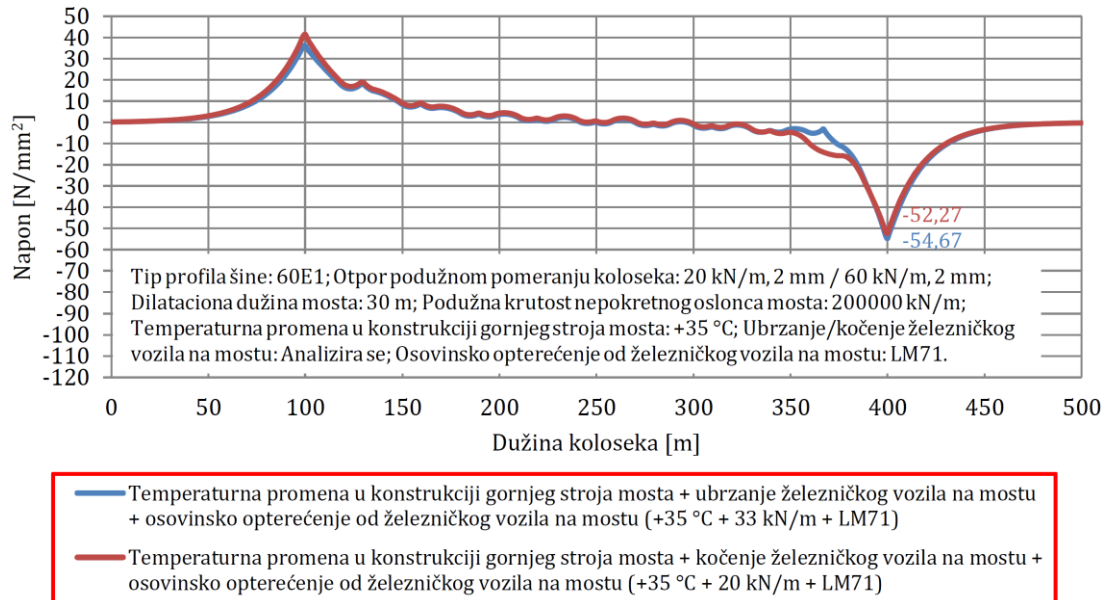
Tabela 6.55 Maksimalne vrednosti dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

Temperaturna promena u konstrukciji gornjeg stroja mosta	Dodatni temperaturni naponi (letnji uslovi) [N/mm ²]	Dodatni temperaturni naponi (zimski uslovi) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (letnji uslovi) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih temperaturnih napona (zimski uslovi) [%]
±40 °C	-25,32	33,55	+9,04	+5,77
±35 °C	-23,22	31,72	/	/
±30 °C	-21,01	29,35	-9,52	-7,47

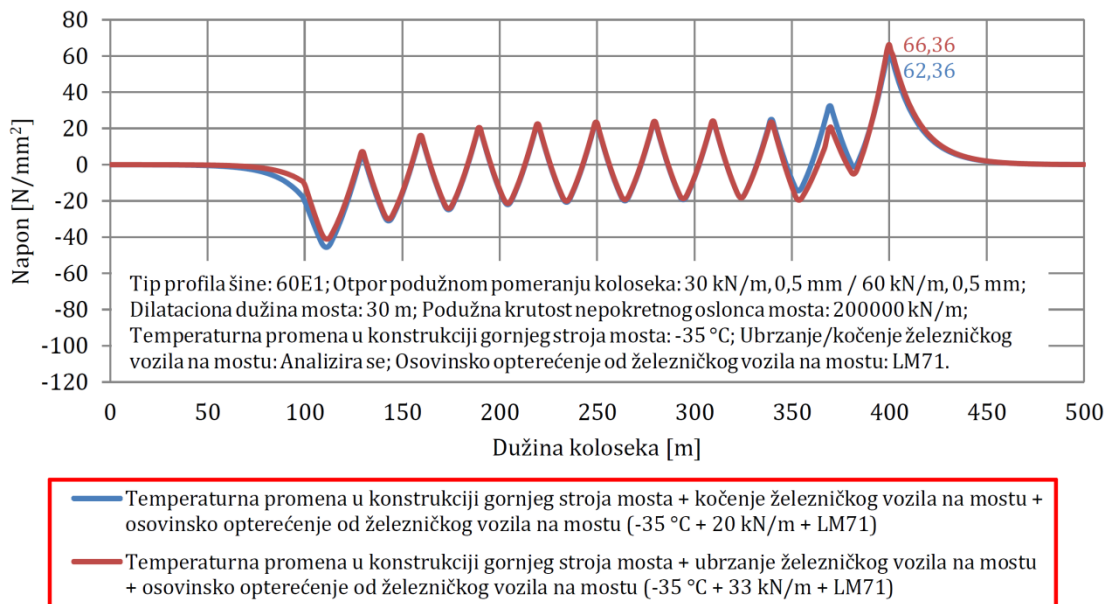
Ukupni dodatni naponi i podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta

Na slikama 6.134 i 6.135 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti ukupnih dodatnih napona u letnjim i zimskim uslovima u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm na celoj dužini koloseka, dok je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm. Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju neopterećenog koloseka od 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm na celoj dužini koloseka, dok je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm.

Dužina mosta iznosi 300 m, dilatacione dužine mosta iznose 30 m, dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 200000 kN/m. Proračun je sproveden za temperaturne promene u konstrukciji gornjeg stroja mosta od +35 °C u letnjim uslovima, odnosno -35 °C u zimskim uslovima. Opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu iznosi 33 kN/m (ukupna sila ≤ 1000 kN), dok opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu iznosi 20 kN/m (ukupna sila ≤ 6000 kN). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



Slika 6.134 Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.135 Vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom

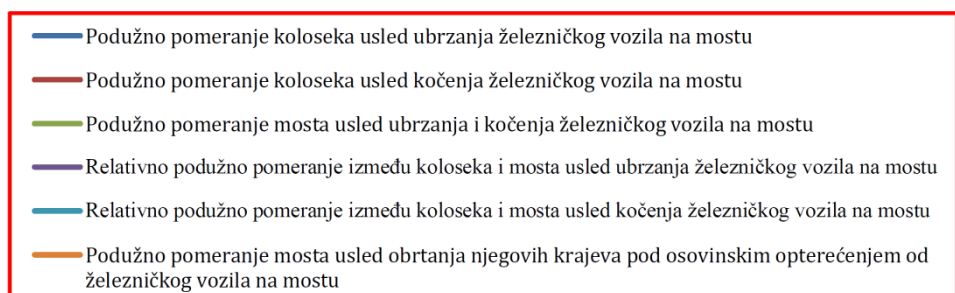
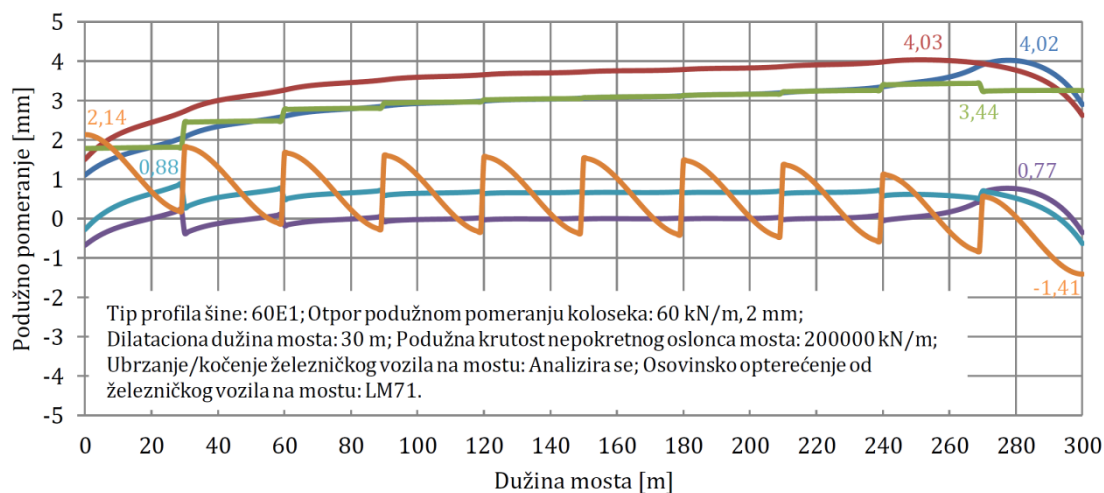
U tabeli 6.56 prikazane su maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima dodatnih napona pritiska i zatezanja. Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona pritiska u letnjim uslovima $-54,67 \text{ N/mm}^2 < -72 \text{ N/mm}^2$, kao i maksimalne vrednosti

ukupnih dodatnih napona zatezanja u zimskim uslovima $66,36 \text{ N/mm}^2 < 92 \text{ N/mm}^2$ ne prekoračuju dozvoljene vrednosti dodatnih napona pritiska i zatezanja. U skladu sa dobijenim rezultatima, nije se vršila dalja redukcija dodatnih napona preko razmatranih parametara koloseka i mosta.

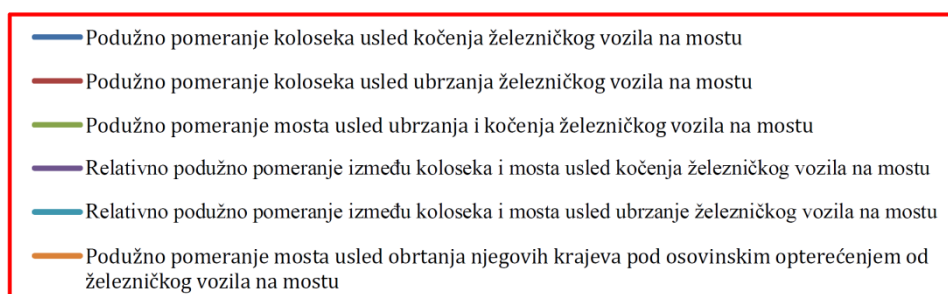
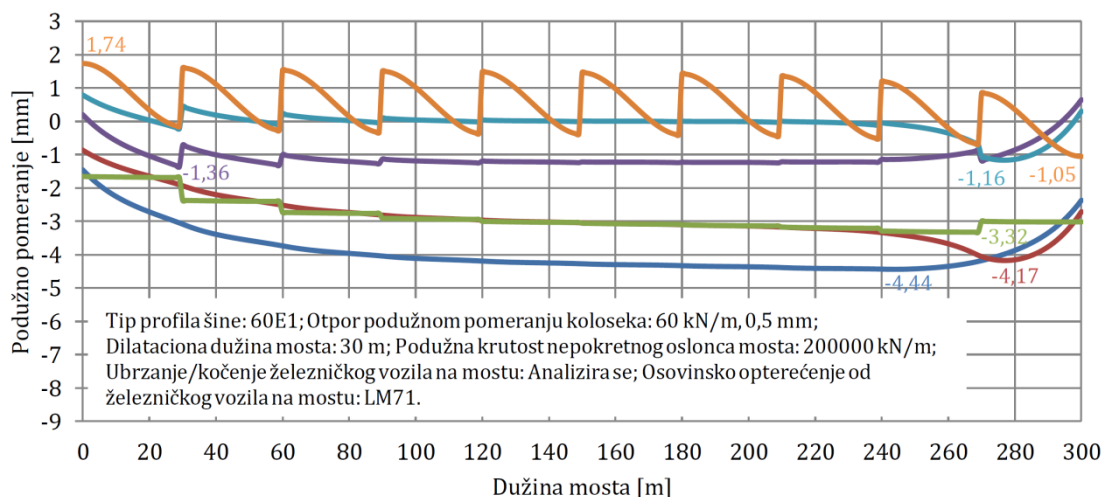
Tabela 6.56 Maksimalne vrednosti ukupnih dodatnih napona u zavisnosti od ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Ubrzanje/kočenje železničkog vozila na mostu	Ukupni dodatni naponi (letnji uslovi) $[\text{N/mm}^2]$	Dozvoljeni dodatni naponi (letnji uslovi) $[\text{N/mm}^2]$	Ukupni dodatni naponi (zimski uslovi) $[\text{N/mm}^2]$	Dozvoljeni dodatni naponi (zimski uslovi) $[\text{N/mm}^2]$
Ubrzanje	-54,67	≤ -72	66,36	≤ 92
Kočenje	-52,27	≤ -72	62,36	≤ 92

Na slikama 6.136 i 6.137 prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosek/most i vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta u letnjim i zimskim uslovima usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu. U analizi je korišćen profil šine tipa 60E1. Za letnje uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm . Za zimske uslove usvojen je otpor podužnom pomeranju opterećenog koloseka od 60 kN/m za granično relativno pomeranje od $0,5 \text{ mm}$. Dužina mosta iznosi 300 m , dilatacione dužine mosta iznose 30 m , dok je usvojena podužna krutost nepokretnog oslonca mosta 200000 kN/m . Proračun je sproveden za opterećenje od ubrzanja železničkog vozila na mostu koje iznosi 33 kN/m (ukupna sila $\leq 1000 \text{ kN}$), kao i opterećenje od kočenja železničkog vozila na mostu koje iznosi 20 kN/m (ukupna sila $\leq 6000 \text{ kN}$). Osovinsko opterećenje od železničkog vozila na mostu usvojeno je u skladu sa šemom opterećenja LM71.



Slika 6.136 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (letnji uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom



Slika 6.137 Vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu (zimski uslovi) - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

U tabeli 6.57 prikazane su maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu, kao i njihovo poređenje sa dozvoljenim vrednostima podužnih pomeranja. U skladu sa dobijenim rezultatima, podužna pomeranja konstrukcija koloseka i mosta zadovoljavaju dozvoljene vrednosti podužnih pomeranja.

Tabela 6.57 Maksimalne vrednosti podužnih pomeranja konstrukcija koloseka i mosta usled ubrzanja/kočenja i osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu - betonske proste grede u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom

Konstrukcija (opterećenje)	Podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (letnji uslovi) [mm]	Podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]	Dozvoljeno podužno pomeranje (zimski uslovi) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	3,44	≤ 5	3,32	≤ 5
Kolosek/most (ubrzanje)	0,77	≤ 4	1,16	≤ 4
Kolosek/most (kočenje)	0,88	≤ 4	1,36	≤ 4
Most (LM71)	2,14	≤ 8	1,74	≤ 8

6.5 Smernice za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta

Na osnovu dobijenih rezultata u okviru parametarske analize dodatnih temperaturnih napona definisane su smernice za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta. Cilj predloženih smernica je unapređenje procesa projektovanja železničkih mostova sa neprekinutim kolosekom sa aspekta interakcije kolosek/most, kako bi dodatni naponi u kontinualno zavarenim šinama na mostu tokom eksploatacije bili u okviru propisanih dozvoljenih vrednosti u skladu sa [49], [51].

Analizirano je pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija sa različitim statičkim sistemima, materijalnim i geometrijskim karakteristikama konstrukcija gornjeg stroja mosta, dilatacionim dužinama, kao i podužnim krutostima nepokretnog oslonca mosta. Takođe, analizirani su i različiti tipovi profila šina, kao i različiti otpori podužnom pomeranju koloseka u letnjim i zimskim uslovima.

U cilju smanjenja vrednosti dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu mogu se koristiti sledeće smernice:

- **Parametri konstrukcije koloseka: površina poprečnog preseka šine i otpor podužnom pomeranju koloseka, kao i parametri konstrukcije mosta: dilataciona dužina mosta i podužna krutost nepokretnog oslonca mosta imaju uticaj na vrednosti dodatnih temperaturnih napona.** Ostali parametri konstrukcije mosta: raspon mosta, krutost na savijanje konstrukcije gornjeg stroja mosta i visina konstrukcije gornjeg stroja mosta **nemaju direktan uticaj** na vrednosti dodatnih temperaturnih napona, već na vrednosti dodatnih napona usled osovinskog opterećenja od železničkog vozila na mostu.
 - **Dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti povećanjem površine poprečnog preseka šine.** Izbor profila šine vrši se u skladu sa kategorijom železničke pruge, saobraćajnim opterećenjem, kao i planom održavanja. Na osnovu sprovedene parametarske analize u zavisnosti od tipa konstrukcije mosta i tipa profila šine smanjenje dodatnih temperaturnih napona iznosi do:
 1. 18 % u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1, kod mostovske konstrukcije tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.
 2. 18 % u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1, kod mostovske konstrukcije tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
 3. 16 % u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1, kod mostovske konstrukcije tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.
 4. 17 % u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1, kod mostovske konstrukcije tipa betonskog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
 5. 11 % u slučaju kada se usvoji profil šine tipa 60E1 u poređenju sa profilom šine tipa 49E1, kod mostovske konstrukcije tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
- Detaljne vrednosti smanjenja dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od usvojenog tipa profila šine za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.6, 6.17, 6.27, 6.38 i 6.48.
- **Dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti redukcijom otpora podužnom pomeranju koloseka.** Uobičajene vrednosti otpora podužnom pomeranju koloseka u letnjim uslovima iznose 20 kN/m za granično relativno pomeranje od 2 mm (kolosek proklizava po zastoru od tucanika). Sa druge strane, uobičajene vrednosti otpora

podužnom pomeranju koloseka u zimskim uslovima iznose od 23,33 kN/m do 30 kN/m za granično relativno pomeranje od 0,5 mm (šine proklizavaju po šinskim pričvršćenjima, što odgovara otporu podužnom pomeranju šine po sistemu šinskog pričvršćenja od 7 kN do 9 kN). Sistemi šinskih pričvršćenja sa redukovanim otporom podužnom pomeranju šine < 7 kN primenjuju se na ograničenoj dužini koloseka na mostu. **Ograničavajući faktor za primenu sistema šinskih pričvršćenja sa redukovanim otporom podužnom pomernju šine je veličina zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima.** Takođe, primenom sistema šinskih pričvršćenja sa redukovanim otporom podužnom pomeranju šine, smanjuju se vrednosti sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u letnjim uslovima. Na osnovu sprovedene parametarske analize u zavisnosti od tipa konstrukcije mosta i tipa sistema šinskog pričvršćenja smanjenje dodatnih temperaturnih napona iznosi do:

1. 72 % u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 40 m (od čega se 20 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) kod mostovske konstrukcije tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.
2. 70 % u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·40 m (od čega se 2·20 m nalazi na mostu i odgovara 2·1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) kod mostovske konstrukcije tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.
3. 70 % u slučaju kada se iznad pokretnog oslonca mosta u dužini od 60 m (od čega se 30 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) kod mostovske konstrukcije tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.
4. 69 % u slučaju kada se iznad pokretnih oslonaca mosta u dužini od 2·60 m (od čega se 2·30 m nalazi na mostu i odgovara 2·1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) kod mostovske konstrukcije tipa betonskog kontinualnog nosača raspona 2·90 m = 180 m sa neprekinutim kolosekom.
5. 39 % u slučaju kada se iznad krajnjeg pokretnog oslonca mosta u dužini od 20 m (od čega se 10 m nalazi na mostu i odgovara 1/3 dilatacione dužine mosta) primeni ZLR (Zero Longitudinal Restraint) kod mostovske konstrukcije tipa betonskih prostih greda u nizu raspona 10·30 m = 300 m sa neprekinutim kolosekom.

Detaljne vrednosti smanjenja dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.7, 6.9, 6.18, 6.20, 6.28, 6.30, 6.39, 6.41, 6.49 i 6.51. Detaljne vrednosti povećanja veličine zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.10, 6.21, 6.31, 6.42 i 6.52. Takođe, detaljne vrednosti smanjenja sile pritiska merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u letnjim uslovima u zavisnosti od otpora podužnom pomeranju koloseka za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.8, 6.19, 6.29, 6.40 i 6.50.

- **Dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti skraćanjem dilatacione dužine mosta.** Skraćanje dilatacione dužine mosta moguće je ostvariti promenom položaja pokretnih i nepokretnih oslonaca mosta ili skraćanjem konstrukcije mosta i povećanjem dužine nasipa tokom faze projektovanja. Na osnovu sprovedene parametarske analize u zavisnosti od tipa konstrukcije mosta i dilatacione dužine mosta smanjenje dodatnih temperaturnih napona iznosi do:

1. 25 % u slučaju skraćanja dilatacione dužine mosta za 10 m kod mostovske konstrukcije tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.
2. 20 % u slučaju skraćanja dilatacione dužine mosta za 10 m kod mostovske konstrukcije tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona 2·60 m = 120 m sa neprekinutim kolosekom.

3. 11 % u slučaju skraćanja dilatacione dužine mosta za 10 m kod mostovske konstrukcije tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.
4. 12 % u slučaju skraćanja dilatacione dužine mosta za 10 m kod mostovske konstrukcije tipa betonskog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
5. 28 % u slučaju skraćanja dilatacione dužine mosta za 10 m kod mostovske konstrukcije tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.

Detaljne vrednosti smanjenja dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od dilatacione dužine mosta za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.11, 6.22, 6.32, 6.43 i 6.53.

- **Dodatni temperaturni naponi mogu se smanjiti redukcijom podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta.** Redukcija podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta ostvaruje se formiranjem podužno fleksibilnije konstrukcije donjeg stroja mosta (temelja, stubova i ležišta). Na osnovu sprovedene parametarske analize u zavisnosti od tipa konstrukcije mosta i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta smanjenje dodatnih temperaturnih napona u teorijskom smislu iznosi do:

1. 50 % kod mostovske konstrukcije tipa čelične proste grede raspona 60 m sa neprekinutim kolosekom.
2. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi ne menjaju u zavisnosti od promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta kod mostovske konstrukcije tipa čeličnog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 60 \text{ m} = 120 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
3. 52 % kod mostovske konstrukcije tipa betonske proste grede raspona 90 m sa neprekinutim kolosekom.
4. Dobijeni rezultati pokazuju da se dodatni temperaturni naponi ne menjaju u zavisnosti od promene podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta kod mostovske konstrukcije tipa betonskog kontinualnog nosača raspona $2 \cdot 90 \text{ m} = 180 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.
5. 66 % kod mostovske konstrukcije tipa betonskih prostih greda u nizu raspona $10 \cdot 30 \text{ m} = 300 \text{ m}$ sa neprekinutim kolosekom.

Detaljne vrednosti smanjenja dodatnih temperaturnih napona u zavisnosti od podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta za različite studije slučaja prikazane su u tabelama 6.12, 6.33 i 6.54. Kod mostovskih konstrukcija tipa simetričnih kontinualnih nosača sa nepokrenim osloncem u sredini dužine konstrukcije mosta, promena podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta nema uticaj na promenu dodatnih temperaturnih napona. **U praksi, smanjenje dodatnih temperaturnih napona usled redukcije podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta znatno je manje od prikazanih teorijskih vrednosti zbog ograničenih podužnih pomeranja konstrukcije mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu u skladu sa [49], [51].** Takođe, povećanje podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta ima veći uticaj na smanjenje dodatnih napona usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu, nego na povećanje dodatnih temperaturnih napona (tabela 6.45).

7 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

U ovoj doktorskoj disertaciji analizirani su osnovni i dodatni temperaturni naponi u kontinualno zavarenim šinama. U tu svrhu korišćena je numerička analiza zasnovana na metodi konačnih elemenata. Glavni ciljevi istraživanja osnovnih temperaturnih napona su: određivanje temperaturnog polja šine i osnovnih temperaturnih napona usled neravnomerne raspodele temperature, kvantifikovanje preraspodele temperature i osnovnih temperaturnih napona usled prenosa toplote između šine i praga, kao i između nožice šine i zastora od tucanika, i uporedna analiza osnovnih temperaturnih napona određenih korišćenjem numeričke analize sa osnovnim temperaturnim naponima određenim u skladu sa inženjerskom praksom. Sa druge strane, glavni ciljevi istraživanja dodatnih temperaturnih napona su: kvantifikovanje uticaja parametara koloseka i mosta na vrednosti dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu, kao i definisanje smernica za integralno projektovanje konstrukcija koloseka i mosta.

U disertaciji je prikazana razvijena metodologija za određivanje temperaturnog polja šine i osnovnih temperaturnih napona koja se zasniva na primeni eksperimentalno izmerenih površinskih temperatura šine i spregnutoj nestacionarnoj termičko-naponskoj analizi. Usled fenomena globalnog zagrevanja temperaturni uticaji u šinama postaju sve veći, kao i potreba za njihovim preciznim određivanjem, kako bi se osigurala bezbednost železničkog saobraćaja i izbegle potencijalne akcidentne situacije. **Glavne prednosti razvijene metodologije koje su ostvarene kroz primenu numeričke analize su uzimanje u obzir istorije zagrevanja šine, efekta toplotne inercije, kao i mogućnost kvalitativnog i kvantitativnog uvida u raspodelu napona u šini.** Sa druge strane, glavno ograničenje razvijene metodologije je nemogućnost preciznog dijagnostifikovanja i kvantifikovanja promena neutralne temperature koje se mogu javiti tokom vremena i eksploatacije koloseka. Takođe, izvršena je i provera tačnosti numeričkog modela za analizu temperaturnih uticaja u šini: sprovođenjem kontrolnih merenja površinskih temperatura šine sa gušćim rasporedom senzora čime je potvrđena ponovljivost i pouzdanost rezultata merenja i numeričkih proračuna, analiziranjem promena neutralne temperature u numeričkom modelu čime je potvrđeno podudaranje promena osnovnih temperaturnih napona u skladu sa teorijskom analizom, kao i poređenjem dobijenih rezultata numeričke analize sa rezultatima u skladu sa inženjerskom praksom čime je potvrđen efekat toplotne inercije i njegov uticaj na smanjenje maksimalnih vrednosti osnovnih temperaturnih napona.

Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine i numeričke analize osnovnih temperaturnih napona, kao i poređenjem rezultata numeričke analize i uobičajenih inženjerskih proračuna mogu se doneti sledeći zaključci:

- **Usled efekta prenosa toplote između šine i praga, maksimalna srednja površinska temperatura šine u poprečnom preseku uz prag minorno je manja od maksimalne srednje površinske temperature šine u srednjem poprečnom preseku između pragova.** Rezultati merenja pokazali su da to smanjenje iznosi oko 1 %.
- **Usled efekta prenosa toplote između nožice šine i zastora od tucanika, kao i usled neizloženosti donje površine nožice šine direktnom sunčevom zračenju, maksimalna srednja površinska temperatura nožice šine minorno je manja od maksimalnih srednjih površinskih temperatura vrata i glave šine, u srednjem poprečnom preseku između pragova.** Rezultati merenja pokazali su da to smanjenje iznosi oko 2 % u odnosu na maksimalnu srednju površinsku temperaturu vrata šine, tj. oko 3 % u odnosu na maksimalnu srednju površinsku temperaturu glave šine.

- **Usled efekta prenosa toplote između šine i praga, maksimalni osnovni temperaturni naponi u težištima glave, vrata i nožice šine u poprečnom preseku uz prag minorno su manji od maksimalnih osnovnih temperaturnih napona u težištima glave, vrata i nožice šine u srednjem poprečnom preseku između pragova.** Rezultati numeričke analize pokazali su da to smanjenje iznosi oko 2 %.
- **Usled efekta toplotne inercije, maksimalni osnovni temperaturni naponi u težištima glave, vrata i nožice šine u poprečnom preseku uz prag i srednjem poprečnom preseku između pragova manji su od maksimalnog osnovnog temperaturnog napona određenog u skladu sa inženjerskom praksom.** Rezultati numeričke analize pokazali su da ta smanjenja iznose redom oko 17 %, 2 % i 11 % u težištima glave, vrata i nožice šine u poprečnom preseku uz prag, tj. redom oko 16 %, 0,2 % i 10 % u težištima glave, vrata i nožice šine u srednjem poprečnom preseku između pragova. Najveća smanjenja su u glavi šine, dok su najmanja u vratu šine, kao posledica pozicije šinskog termometra (slika 4.15).
- **Usled efekta toplotne inercije, maksimalne temperaturne sile merodavne za kontrolu bočne stabilnosti koloseka u poprečnom preseku uz prag i srednjem poprečnom preseku između pragova manje su od maksimalne temperaturne sile određene u skladu sa inženjerskom praksom.** Rezultati numeričke analize pokazali su da to smanjenje iznosi oko 7 % u poprečnom preseku uz prag, tj. oko 5 % u srednjem poprečnom preseku između pragova.

Takođe, sprovedena je i numerička analiza dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu na osnovu koje se mogu doneti sledeći zaključci:

- **Povećanje površine poprečnog preseka šine, redukcija otpora podužnom pomeranju koloseka, skraćenje dilatacione dužine mosta, kao i redukcija podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, dovode do smanjenja dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu.**
- **Najveći uticaj na smanjenje dodatnih temperaturnih napona ima parametar otpora podužnom pomeranju koloseka.** Na osnovu sprovedene parametarske analize za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija sa kontinualno zavarenim šinama uticaj ovog parametra na smanjenje dodatnih temperaturnih napona kreće se u granicama od 2 % do 72 % u zavisnosti od tipa mostovske konstrukcije, primenjenog sistema šinskog pričvršćenja, kao i veličine zazora pri pucanju šine u zimskim uslovima.
- **Na drugom mestu po uticaju na smanjenje dodatnih temperaturnih napona je parametar dilatacione dužine mosta.** Na osnovu sprovedene parametarske analize za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija sa kontinualno zavarenim šinama uticaj ovog parametra na smanjenje dodatnih temperaturnih napona kreće se u granicama od 10 % do 28 % za skraćenje dilatacione dužine mosta od 10 m u zavisnosti od tipa mostovske konstrukcije.
- **Na trećem mestu po uticaju na smanjenje dodatnih temperaturnih napona je parametar površine poprečnog preseka šine.** Na osnovu sprovedene parametarske analize za pet reprezentativnih mostovskih konstrukcija sa kontinualno zavarenim šinama uticaj ovog parametra na smanjenje dodatnih temperaturnih napona kreće se u granicama od 4 % do 18 % u zavisnosti od tipa mostovske konstrukcije, kao i primenjenog tipa profila šine.
- **Najmanji uticaj na smanjenje dodatnih temperaturnih napona ima parametar podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta.** Iako u teorijskom smislu ovaj parametar daje smanjenja dodatnih temperaturnih napona koja se kreću u granicama od 4 % do 66 % u zavisnosti od tipa mostovske konstrukcije, kao i podužne krutosti nepokretnog oslonca mosta, u praksi uticaj ovog parametra je znatno manji zbog ograničenih podužnih pomeranja konstrukcije mosta usled ubrzanja/kočenja železničkog vozila na mostu u skladu sa [49], [51].

U cilju proširenja saznanja iz oblasti osnovnih i dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama mogu se definisati sledeće preporuke za dalja istraživanja:

- Sprovođenje eksperimentalnih merenja površinskih temperatura šine i numeričke analize osnovnih temperaturnih napona u zimskim uslovima za kolosek u zastoru od tucanika, kao i za kolosek na čvrstoj podlozi u letnjim i zimskim uslovima.
- Unapređenje razvijene metodologije sa aspekta praćenja promena neutralne temperature tokom eksploatacije koloseka.
- Unapređenje razvijenog mernog sistema za monitoring površinskih temperatura šine i mosta u cilju određivanja ukupnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama na mostu.

8 LITERATURA

- [1] <https://www.engineeringnews.co.za/article/continuous-welded-rails-strengthens-network-but-consider-rail-stress-2014-06-27>
(pristupljeno april 2022.)
- [2] <https://railroadrails.com/otm/rail-joints/>
(pristupljeno april 2022.)
- [3] <https://wonderfuleengineering.com/speeding-train-tipping-scary/>
(pristupljeno april 2022.)
- [4] <https://pwayblog.com/2017/09/07/thermal-forces-and-broken-rails/>
(pristupljeno april 2022.)
- [5] CEN/TC 256. EN 13674-1:2011+A1:2017. Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. Brussels, Belgium. 2017.
- [6] Wenner, M., Lippert, P., Plica, S., & Marx, S. Längskraftabtragung auf Eisenbahnbrücken: Teil 2: Hintergründe des Nachweises. Bautechnik. 2016. 93: 7. p. 470-481.
- [7] Ertz, M., & Knothe, K. A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact. Wear. 2002. 253: 3-4. p. 498-508.
- [8] Vo, K. D., Tieu, A. K., Zhu, H. T., & Kosasih, P. B. A tool to estimate the wheel/rail contact and temperature rising under dry, wet and oily conditions. Computers in Railways XIV: Railway Engineering Design and Optimization. 2014. 135: 191.
- [9] Basu, J., Srimani, S. L., & Gupta, D. S. Rail behaviour during cooling after hot rolling. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2004. 39:1. p.15-24.
- [10] Mirković, N., Brajović, Lj., Popović, Z., Todorović, G., Lazarević, L., & Petrović, M. Determination of temperature stresses in CWR based on measured rail surface temperatures. Construction and Building Materials. 2021. 284: 122713.
- [11] Ryan, M. Rail temperature measurement study. Report. AEA Technol Rail. 2005.
- [12] Chapman, L., Thornes, J. E., & White, S. P. Thermal imaging of railways to identify track sections prone to buckling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2006. 220: 3. p. 317-327.
- [13] Wu, Y., Munro, P., Rasul, M., & Khan, M. A review on recent developments in rail temperature prediction for use in buckling studies. In: Conference on Railway Engineering. RTSA. 2010. p. 31-42.
- [14] Hunt, G. A. An analysis of track buckling risk. Br Railw Intern Rep 31. 1994.
- [15] Esveld, C. Modern railway track. MRT - productions. Zaltbommel, Netherlands. 2001.
- [16] Chapman, L., Thornes, J. E., Huang, Y., Cai, X., Sanderson, V. L., & White, S. P. Modelling of rail surface temperatures: a preliminary study. Theoretical and Applied Climatology. 2008. 92: 1. p. 121-131.
- [17] Zhang, Y. J., & Lee, S. Modeling rail temperature with real - time weather data. Surface transportation weather and snow removal and ice control technology. 37. 2008.
- [18] Hong, S. U., Kim, H. U., Lim, N. H., Kim, K. H., Kim, H., & Cho, S. J. A Rail - Temperature - Prediction Model Considering Meteorological Conditions and the Position of the Sun. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2019. 20: 3. p. 337-346.
- [19] Popović, Z., Mirković, N., Lazarević, L., & Mičić, M. Klimatski uticaji na napone u kontinualno zavarenim šinama u kolosecima na mostovima u Srbiji. Časopis Tehnika. 2019. 74: 1. p. 39-44.

- [20] Sanchis, I. V., Franco, R. I., Fernández, P. M., Zuriaga, P. S., & Torres, J. B. F. Risk of increasing temperature due to climate change on high - speed rail network in Spain. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. 82: 102312.
- [21] Hurlebaus, S. Determination of longitudinal stress in rails. Final Report Safety IDEA Project 15. Transportation research Board. Washington, DC. 2011.
- [22] Nucera, C., & Lanza di Scalea, F. Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2014. 136: 5. p. 2561-2574.
- [23] Hayes, A. P. MAPS-SFT, a new tool in the infrastructure manager's toolbox. In: 4th IET international conference on railway condition monitoring. 18-20 June 2008.
- [24] Shust, W., Read, D., & Jury, F. B. A Novel Method for Estimating the Neutral Temperature of Continuously Welded Rail. In: Rail Transportation Division Conference. 2007. p. 105-115.
- [25] Tunna, J. Vertical rail stiffness equipment (VERSE) trials. Letter Report for Vortex International Transportation Technology Center, Inc. (TTCI). Pueblo, CO. 2000.
- [26] Peng, X. D., & Ding, J. X. Study of Monitoring Thermal Stresses in Continuously Welded Rails with LCR Wave. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*. 2006. 35: 5. p. 844-847.
- [27] Gokhale, S. A. Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves. PhD Thesis. Texas A & M University. 2008.
- [28] Wang, P., Gao, Y., Yang, Y., Tian, G., Yao, E., & Wang, H. Experimental studies and new feature extractions of MBN for stress measurement on rail tracks. *IEEE transactions on magnetics*. 2013. 49: 8. p. 4858-4864.
- [29] Liu, G., Liu, H., Wei, A., Xiao, J., Wang, P., & Li, S. A new device for stress monitoring in continuously welded rails using bi-directional strain method. *Journal of Modern Transportation*. 2018. 26: 3. p. 179-188.
- [30] Kish, A., & Read, D. 11th Annual AAR Research Review. Transportation Technology Center Inc, (TTCI). 2006.
- [31] Zhu, X., Lanza di Scalea, F., & Fateh, M. Thermal stress measurement in continuous welded rails using the hole-drilling method. In: ASME/IEEE Joint Rail Conference. American Society of Mechanical Engineers. 2016.
- [32] Pan, W. B., Ye, Y., Han, H. J., Yang, T., & Song, J. W. Finite element analysis on temperature stress in continuous welded rail. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*. 2013.
- [33] Fryba, L. Thermal interaction of long welded rails with railway bridges. *Rail International*. 1985. 16: 3.
- [34] Ruge, P., & Birk, C. Longitudinal forces in continuously welded rails on bridgedecks due to nonlinear track-bridge interaction. *Computers & structures*. 2007. 85:7-8. p. 458-475.
- [35] Ruge, P., Widarda, D. R., Schmäzlin, G., & Bagayoko, L. Longitudinal track-bridge interaction due to sudden change of coupling interface. *Computers & Structures*. 2009. 87: 1-2. p. 47-58.
- [36] Cai, C. B. Calculation of additional longitudinal forces in continuously welded rails on super-large bridges of high-speed railways. *Journal of Southwest Jiaotong University*. 2003. 38: 5. p. 609-614.
- [37] Okelo, R., & Olabimtan, A. Nonlinear rail-structure interaction analysis of an elevated skewed steel guideway. *Journal of Bridge Engineering*. 2011. 16: 3. p. 392-399.

- [38] Zhang, J. L., Wu, D. J., & Li, Q. Loading-history-based track-bridge interaction analysis with experimental fastener resistance. *Engineering Structures* 83. 2015. p. 62-73.
- [39] Strauss, A., Šomodíková, M., Lehký, D., Novák, D., & Bergmeister, K. Nonlinear finite element analysis of continuous welded rail-bridge interaction: monitoring-based calibration. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2018, 24:4. p. 344-354.
- [40] Yun, K. M., Park, B. H., Bae, H. U., & Lim, N. H. Suggestion for allowable additional compressive stress based on track conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018. 232: 5. p. 1309-1325.
- [41] De Backer, H., Outtier, A., Ferdinande, B., Schotte, K., & Mys, J. Application limits for continuously welded rails on temporary bridge decks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. 231: 4. p. 482-497.
- [42] Zhang, J., Wu, D., Li, Q., & Zhang, Y. Experimental and numerical investigation of track-bridge interaction for a long-span bridge. *Structural Engineering and Mechanics. An Int'l Journal*. 2019. 70: 6. p. 723-735.
- [43] Kumar, R., & Upadhyay, A. Effect of temperature gradient on track-bridge interaction. *Interact Multiscale Mech*. 2012, 5: 1. p. 1-12.
- [44] Liu, W., Lai, H., Dai, G., Rao, S., Wang, D., & Wu, B. Numerical Study on Track-Bridge Interaction of Integral Railway Rigid-Frame Bridge. *Applied Sciences*. 2021. 11: 3. 922.
- [45] Yang, S. C., & Jang, S. Y. Track-bridge interaction analysis using interface elements adaptive to various loading cases. *Journal of Bridge Engineering*. 2016. 21: 9. 04016056.
- [46] Dai, G. L., & Liu, W. S. Applicability of small resistance fastener on long-span continuous bridges of high-speed railway. *Journal of Central South University*. 2013. 20: 5. p. 1426-1433.
- [47] Yan, Y., Wu, D., & Li, Q. A three-dimensional method for the simulation of temperature fields induced by solar radiation. *Advances in Structural Engineering*, 2019. 22: 3. p. 567-580.
- [48] Dai, G., Chen, G., Zheng, R., & Chen, Y. F. A new bilinear resistance algorithm to analyze the track-bridge interaction on long-span steel bridge under thermal action. *Journal of Bridge Engineering*, 2020. 25: 2. 04019138.
- [49] UIC Code 774-3 (R). Track/bridge Interaction. Recommendations for calculations. Paris, France. 2001.
- [50] UIC Code 776-2 (R). Design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge. Paris, France. 2009.
- [51] CEN/TC 250. EN 1991-2:2003/AC:2010. Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels, Belgium. 2010.
- [52] SRPS EN 1991-2. Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 2: Saobraćajna opterećenja na mostovima. 2012.
- [53] SRPS EN 1991-2/NA. Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 2: Saobraćajna opterećenja na mostovima - Nacionalni prilog. 2019.
- [54] Mirković, N., Brajović, L., Malović, M., & Vnenk, P. Measurement methods for residual stresses in CWR. In: *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Springer, Cham. 2018. p. 346-355.
- [55] European Rail Research Institute. ERRI D 202/RP 12: Verbesserung der Kenntnis der Kräfte im lückenlose Gleis (einschließlich Weichen): Schlußbericht. Utrecht, Netherlands. 1999.

- [56] Mirković, N., Popović, Z., Pustovgar, A., Lazarević, L., & Zhuravlev, A. Management of stresses in the rails on railway bridges. *FME Transactions*. 2018. 46: 4. p. 636-643.
- [57] Webster P.J., Wang X. & Mills G. Problems with railway rails. In: *Measurement of residual and applied stress using neutron diffraction*. Springer, Dordrecht. 1992. p. 517-524.
- [58] Webster, P. J. Neutron strain scanning. *Neutron News*. 1991. 2:2. p. 19-22.
- [59] Webster, P. J., Hughes, D. J., Mills, G., & Vaughan, G. B. M. Synchrotron X-ray measurements of residual stress in a worn railway rail. In: *Materials science forum*. Trans Tech Publications Ltd. Zurich-Uetikon, Switzerland. 2002. p. 767-772.
- [60] <https://www.esrf.fr/UsersAndScience/Publications/Highlights/2002/Industry/IND1> (pristupljeno novembar 2022.)
- [61] Webster, P. J., Mills, G., Wang, X. D., Kang, W. P., & Holden, T. M. Residual stresses in alumino-thermic welded rails. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1997. 32:6. p. 389-400.
- [62] Skyttebol, A. Continuous welded railway rails: Residual stress analyses, fatigue assessments and experiments. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. 2004.
- [63] Zerbst, U., Lundén, R., Edel, K. O., & Smith, R. A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails - a review. *Engineering fracture mechanics*. 2009. 76:17. p. 2563-2601.
- [64] Pravilnik o tehničkim uslovima i održavanju gornjeg stroja železničkih pruga. *Službeni glasnik Republike Srbije*. br. 74/2016.
- [65] Popović, Z., Mirković, N., Brajović, Lj., Rakić, D., Lazarević, L., & Petričević, S. Temperature Stresses in CWR - Experience of Serbian Railways. In: *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham. 2019. p. 825-833.
- [66] Sluz A., Kish A., & Read D. Factors affecting neutral temperature changes in continuous welded rails. In: *Proceeding of the AREMA Techn. Conf*. 1999.
- [67] Edel, K. O. Verspannungs und neutrale Temperaturen der Schienen lückenloser Gleise. *Signal und Schiene*. 1989. 3: 89. p. 88-90.
- [68] Jeong, D. Y. Correlations between rail defect growth data and engineering analyses, Part II: Field tests. 2003.
- [69] Kish, A., & Samavedam, G. Track buckling prevention: theory, safety concepts, and applications. John A. Volpe National Transportation Systems Center (US). 2013.
- [70] Samavedam, G. Buckling and post buckling analysis of CWR in the lateral plane. British Railways Board. R&D Division. Technical Note. TN TS 34. 1979.
- [71] Potvin, M., Trizotto, M., Dersch, M., Edwards, J. R., & de Oliveira Lima, A. A review of parameters affecting rail break gap size using analytical methods. In: *ASME/IEEE Joint Rail Conference*. Vol. 84775. American Society of Mechanical Engineers. 2021.
- [72] Midas. Rail Track Interaction Analysis and Design using Rail Track Analysis Wizard. Webinar Presentation. 2013.
- [73] ACI Committee 358. 1R-92: Analysis and Design of Reinforced Concrete Guideway Structures. American Concrete Institute. 1992.
- [74] MLITT. Technical Regulatory Standards on Japanese Railways. Japan. 2018.
- [75] Zimmermann H. *Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. 1888.
- [76] Orringer, O., Tang, Y. H., Gordon, J. E., Jeong, D. Y., Morris, J. M., & Perlman, A. B. Crack propagation life of detail fractures in rails (No. DOT/FRA/ORD-88/13). United States. Federal Railroad Administration. 1988.
- [77] Richtlinie 820.2040: Gestalten des Oberbaus - Oberbau auf Brücken. 01.04.2008. DB Kommunikationstechnik GmbH.

- [78] Chatkeo, Y. Die Stabilität des Eisenbahngleises im Bogen mit engen Halbmessern bei hohen Axialdruckkräften. Doktorarbeit. Mitteilungen des Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München. 1985.
- [79] Meier, H. Die Verwerfungsgefahr beim lückenlosen Vollbahngleis und ihre Beseitigung. Doktorarbeit. Technische Universität München. 1934.
- [80] Ruge, P., Trinks, C., Muncke, M., & Schmälzlin, G. Laengskraftbeanspruchung von durchgehend geschweissten Schienen auf Bruecken fuer Lastkombinationen. Bautechnik. 2004. 81: 7. p. 537-548.
- [81] Freystein, H. Interaktion Gleis/Brücke - Stand der Technik und Beispiele. Stahlbau. 2010. 79: 3. p. 220-231.
- [82] DIN. Fachbericht 101. Einwirkungen auf Bruecken. Deutschland, 2003.
- [83] Deutsche Bundesbahn & Bundesbahn - Zentralamt München. Oberbauberechnung. 1992.
- [84] Eisenmann, J., Leykauf, G. Forschungsbericht Dauerschwingversuche an korrodierten Schienen UIC60/900. Bericht Nr. 944 vom 9.12.1980. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen. Technische Universität München.
- [85] Freystein, H. Untersuchungen zu den zusätzlichen Schienenspannungen aus Interaktion Gleis/Brücke. Technische Universität Berlin. Doktorarbeit. 2012.
- [86] Schajer, G. S. Practical residual stress measurement methods. John Wiley & Sons. 2013.
- [87] CEN/TC 256. EN 13481-2. Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 2: Fastening systems for concrete sleepers in ballast. Brussels, Belgium. 2022.
- [88] Popović, Z., Lazarević, L., Vilotijević, M., & Mirković, N. Interaction phenomenon between train, track and bridge. In: Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. Springer. Cham. 2017. p. 3-11.
- [89] Hong, S., Jung, H., Park, C., Lee, H., Kim, H., Lim, N., Bae, H., Kim, K., Kim, H., & Cho, S. J. Prediction of a representative point for rail temperature measurement by considering longitudinal deformation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2019. 233: 10. p. 1003-1011.
- [90] <https://www.hicomponent.com/ntc-thermistor-to-voltage-converter-module.html> (pristupljeno april 2022.).
- [91] <https://www.ni.com/en-us/support/model.ni-9205.html> (pristupljeno april 2022.).
- [92] <https://www.ni.com/en-us/support/model.cdaq-9171.html> (pristupljeno april 2022.).
- [93] https://media.vossloh.com/media/01_product_finder/vfs/system_w_14/Vos_Prod uktbroschuere_W14_EN.pdf (pristupljeno april 2022.).
- [94] CEN/TC 256. EN 13146-1. Railway applications - Track - Test methods for fastening systems - Part 1: Determination of longitudinal rail restraint. Brussels, Belgium. 2019.
- [95] CEN/TC 256. EN 13230-2. Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 2: Prestressed monoblock sleepers. Brussels, Belgium. 2016.
- [96] CEN/TC 154. EN 13450. Aggregates for railway ballast. Brussels, Belgium. 2002.
- [97] <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/6/666/666209e.pdf> (pristupljeno april 2022.).
- [98] <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/6/666/666193de.pdf> (pristupljeno april 2022.).
- [99] <https://www.robel.com/en/machinery-tools/securing-measuring/product/rail-thermometer/> (pristupljeno april 2022.).

- [100] Özisik, M. N. Heat conduction. John Wiley & Sons. 1993.
- [101] Nithiarasu, P., Lewis, R. W., & Seetharamu, K. N. Fundamentals of the finite element method for heat and mass transfer. John Wiley & Sons. 2016.
- [102] Petojević, Z., Gospavić, R., & Todorović, G. Estimation of thermal impulse response of a multi - layer building wall through in - situ experimental measurements in a dynamic regime with applications. *Applied Energy* 228. 2018. p. 468-486.
- [103] Lusas Academic. Version 15.0. Issue 1. Theory Manual Volume 1. 2013.
- [104] <https://www.lusas.com/academic/index.html>
(pristupljeno april 2022.).
- [105] Lusas Academic. Version 15.0. Issue 1. Element Reference Manual. 2014.
- [106] Oñate, E. Structural analysis with the finite element method. Linear statics: vol. 1: Basis and Solids. Springer Science & Business Media, 2009.
- [107] CEN/TC 256. EN 13231-1. Railway applications - Track - Acceptance of works - Part 1: Works on ballasted track - Plain line, switches and crossings. Brussels, Belgium. 2013.
- [108] Kish, A. Best practice guidelines for CWR neutral temperature management. In: Proceedings of the 2013 AREMA Annual Conference. Vol. 29. Indianapolis, IN. 2013.
- [109] Arts, T. M. H. Measuring the neutral temperature in railway track during installation and use. PhD Thesis. Master's Thesis. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands. 2011.
- [110] Kish, A., Kalay, S., Hazell, A., Schoengart, J., & Samavedam, G. Rail longitudinal force measurement evaluation studies using the track loading vehicle. *American Railway Engineering Association Bulletin*. 1993. 742. p. 315-342.
- [111] Khan, A. S., & Wang, X. Strain measurements and stress analysis. Prentice Hall, New Jersey. 2001.
- [112] Hauk, V. (Ed.). Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: Evaluation - Application - Assessment. Elsevier. 1997.
- [113] Kjell, G., & Johnson, E. Measuring axial forces in rail by forced vibrations: experiences from a full - scale laboratory experiment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2009. 223: 3. p. 241-254.
- [114] <https://www.midasoftware.com/bridge-library/civil/products/midascivil>
(pristupljeno april 2022.).
- [115] <https://www.midasbridge.com/en/solutions/rail-structure-interaction>
(pristupljeno april 2022.).
- [116] Midas Civil. Technical Document. Analysis for Civil Structures. 2012.
- [117] Di Re, P. 3D beam-column finite elements under tri-axial stress-strain states: non-uniform shear stress distribution and warping. PhD Thesis. Department of Structural and Geotechnical Engineering, Universita la Sapienza. Roma, Italy. 2017.
- [118] Neuenhofer, A., & Filippou, F. C. Evaluation of nonlinear frame finite-element models. *Journal of structural engineering*. 1997. 123:7. p. 958-966.
- [119] Oñate, E. Structural analysis with the finite element method. Linear statics: vol. 2: Beams, Plates and Shells. Springer Science & Business Media. 2013.
- [120] Mirković, N., Popović, Z., Lazarević, L., Vilotijević, M., & Milosavljević, A. Railway bridges on interoperable lines - Aspect of track/bridge interaction. *Building Materials and Structures*. 2018. 61: 2. p. 19-34.
- [121] Mirković, N., Popović, Z., Lazarević, L., & Mičić, M. UIC preporuke za projektovanje železničkih mostova. *Izgradnja*. 2017. 7: 10. p. 247-254.

- [122] Mirković, N., Popović, Z., Lazarević, L., Vilotijević, M. Track/bridge interaction - The aspect of bridge structure. VI International Symposium New Horizons of Transport and Communications. Doboj, Bosnia and Herzegovina. 17-18 November 2017.
- [123] CEN/TC 250. EN 1991-1-5:2003/AC:2009. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions. Brussels, Belgium. 2009.
- [124] SRPS EN 1991-1-5. Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 1-5: Opšta dejstva - Toplotna dejstva. 2012.
- [125] SRPS EN 1991-1-5/NA. Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Deo 1-5: Opšta dejstva - Toplotna dejstva - Nacionalni prilog. 2017.
- [126] Midas Civil. Technical Document. Continuous Welded Railway Bridge Analysis (in accordance with UIC 774-3). Rail-Structure Interaction in accordance with UIC 774-3. 2012.
- [127] Lusas Academic. Version 15.0. Issue 1. Rail Track Analysis. User Manual. 2013.

Biografija autora

Nikola Mirković rođen je 25. marta 1989. godine u Lazarevcu. Osnovnu školu završio je u mestu Baroševac kao nosilac diplome „Vuk Karadžić” i kao „Učenik generacije”. Gimnaziju u Lazarevcu, prirodno-matematički smer, završio je kao nosilac diplome „Vuk Karadžić”.

Osnovne akademske studije na modulu Konstrukcije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2008/09. godine, a diplomirao je 2013. godine sa prosečnom ocenom 8,65 (osam i 65/100). Sintezni rad iz oblasti metalnih konstrukcija pod naslovom „Proračun čelične konstrukcije stambeno poslovnog objekta spratnosti Po+Pr+4 sa međuspratnom konstrukcijom tipa Slimflor” odbranio je sa ocenom 10 (deset) i time stekao zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva. Diplomске akademske (master) studije na modulu Konstrukcije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2013/14. godine, a diplomirao je 2014. godine, sa prosečnom ocenom 8,29 (osam i 29/100). Master rad iz oblasti betonskih konstrukcija pod naslovom „Idejni projekat konstrukcije atletske dvorane” odbranio je sa ocenom 10 (deset) i time stekao zvanje master inženjera građevinarstva.

Tokom osnovnih akademskih studija bio je stipendista Ministarstva prosvete Republike Srbije i grada Lazarevca za ostvarene akademske rezultate. Dobitnik je nagrade iz Fonda akademika prof. Đorđa Lazarevića za najbolji master rad iz oblasti betonskih konstrukcija u školskoj 2013/14. godini na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Doktorske akademske studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je školske 2015/16. godine. Sve predmete na doktorskim studijama položio je u predviđenom roku, sa prosečnom ocenom 10 (deset).

U periodu od avgusta 2014. do januara 2017. godine bio je zaposlen u firmi Mostprojekt a.d. Beograd kao master inženjer građevinarstva na poziciji projektanta. Bio je angažovan na poslovima projektovanja novih i sanaciji, rekonstrukciji i rehabilitaciji postojećih drumskih i železničkih mostova, kao i drugih inženjerskih objekata visokogradnje i niskogradnje.

Od februara 2017. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u zvanju asistenta - studenta doktorskih studija za užu naučnu oblast Konstrukcija, građenje i održavanje železnica na Katedri za puteve, železnice i aerodrome, gde učestvuje u izvođenju nastave na grupi predmeta Železnice.

Od oktobra 2018. do decembra 2019. godine bio je učesnik naučnog projekta koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR-36012: Istraživanje tehničko-tehnološke, kadrovske i organizacione osposobljenosti Železnica Srbije sa aspekta sadašnjih i budućih zahteva Evropske Unije. Od januara 2020. godine učesnik je istraživačkog projekta koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije br. 200092.

Posebnu pažnju u naučno-istraživačkom radu usmerio je ka naponsko-deformacijskoj analizi kontinualno zavarenih šina. U publikacijama i na skupovima u zemlji i inostranstvu, kao autor i koautor, objavio je preko 30 radova iz oblasti Železnica i drugih građevinskih oblasti.

Od jula 2019. godine poseduje licencu za Odgovornog projektanta građevinskih konstrukcija objekata visokogradnje, niskogradnje i hidrogradnje izdatu od strane Ministarstva građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture Republike Srbije.

Član je Inženjerske komore Srbije, kao i učesnik pet stručnih skupova i seminara u zemlji i inostranstvu.

Koristi programske pakete MS Office, AutoCAD, ArchiCAD, Radimpex Tower, SAP2000, Lusas, Midas.

Poseduje znanje engleskog i ruskog jezika.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Никола Мирковић

Број индекса 912/15

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Прилог нумеричкој анализи основних и додатних температурних напона у континуално
завареним шинама

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____ *Никола Мирковић*

Број индекса _____ *912/15*

Студијски програм _____ *Грађевинарство*

Наслов рада _____ *Прилог нумеричкој анализи основних и додатних температурних
напона у континуално завареним шинама*

Ментори _____ *проф. др Стјепан Лакушић и в. проф. др Марија Нефовска-Даниловић*

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, _____

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић” да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Прилог нумеричкој анализи основних и додатних температурних напона у континуално завареним шинама

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.