

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александар М. Теранић

**УТИЦАЈ ПОДУЖНИХ УКРУЋЕЊА НА
ПОНАШАЊЕ И ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ
ЛИМЕНИХ НОСАЧА ОПТЕРЕЂЕНИХ
ЛОКАЛНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ**

докторска дисертација

Београд, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Aleksandar M. Čeranić

**INFLUENCE OF LONGITUDINAL
STIFFENERS ON BEHAVIOR AND
ULTIMATE RESISTANCE OF PLATE
GIRDERS SUBJECTED TO PATCH LOADING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Ментор :

др Светлана Костић
ванредни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Душко Лучић
редовни професор
Универзитет Црне Горе, Грађевински факултет

Чланови комисије :

др Ратко М. Салатић
редовни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Милан Ј. Спремић
ванредни професор
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Мирослав Марјановић
доцент
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

др Саша Ковачевић
Research Associate
Imperial College London,
Department of Civil and Environmental Engineering

Датум одбране : _____

Посвећено успомени на мог оца Милића

ЗАХВАЛНИЦА

Своју велику захвалност дугујем својим менторима на овом раду проф. др Светлани Костић и проф. др Душку Лучићу за њихово несебично залагање, подршку, разумијевање и подстрек у реализацији овог рада.

Посебну захвалност дугујем др Ненаду Марковићу, без кога овај докторат не би био реализован. Захваљујући његовом ентузијазму, идејама, савјетима, и несебичној помоћи успио сам да овај рад довршим. За мене је била велика част да у току читавог процеса израде овог рада будем инспирисан, савјетован и усмјераван од стране др Марковића, чије су знање и научни рад у самом врху савремених светских достигнућа у овој области. У току свих претходних година наше сарадње и његовог преданог рада на нашим заједничким истраживањима, он је постао у мом животу много више од професора и сарадника. Професоре, хвала Вам на свему.

Затим желим да искажем своју захвалност др Саши Ковачевићу, чији су ме научни рад и успјеси кроз читав овај пут инспирисали. Његова решења, идеје и помоћ коју ми је несебично пружио су биле вриједан допринос овом истраживању.

Такође желим да се захвалим др Ратку Салатићу као и Милици Бендић на подршци, помоћи и успешној научној сарадњи.

Мојој породици, покојном оцу, мајци и сестрама дугујем велику захвалност за подршку, љубав и вјеру у мене коју су ми пружали током читавог мог живота и школовања. Посебну захвалност дугујем мојој Ивани која је моје циљеве препознала као своје и пружио ми несебичну подршку, љубав и мотивацију, не само за овај рад, већ за читав наш будући живот.

Са пуно љубави, вере и наде радујем се ономе што долази.

УТИЦАЈ ПОДУЖНИХ УКРУЋЕЊА НА ПОНАШАЊЕ И ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ ЛИМЕНИХ НОСАЧА ОПТЕРЕЋЕНИХ ЛОКАЛНИМ ОПТЕРЕЋЕЊЕМ

РЕЗИМЕ

Предмет овог рада је анализа понашања подужно неукрућених и укрућених лимених носача (заварених челичних I - носача) оптерећених локалним оптерећењем (концентрисаним или расподијељеним оптерећењем на одређеној дужини) на једном појасу у равни ребра носача, које се у литератури назива *patch loading*, као и одређивање њихове граничне носивости.

Овај случај оптерећења се често појављује у пракси, а репрезентативни примјери тога су оптерећења главних носача приликом изградње мостова технологијом превлачења (лансирања) преко привремених ослонаца, оптерећења кранске стазе, везе стуб-греда и сл.

Проблематика се изучава интензивно више деценија, теоријски и експериментално, са циљем што тачнијег праћења понашања и одређивања граничне носивости. Међутим, још увијек нису добијена решења која би на задовољавајући начин обухватила комплексан утицај свих параметара. У последње вријеме све чешће се користе нумеричке анализе у комбинацији са експерименталним истраживањима. Коришћењем софтверских пакета базираних на методи коначних елемената могуће је извести обимније параметарске анализе. Тако се на најбољи начин могу издвојити и квантификовати утицаји појединих параметара на граничну носивост. Слична параметарска анализа је спроведена и у овом раду.

У овом истраживању је анализиран утицај дужине оптерећења и других параметара на граничну носивост подужно неукрућених и укрућених челичних I - носача (са равним укрућењима).

Примарни циљ овог истраживања је анализа *ефекта ојачања* који је дефинисан као однос између граничне носивости подужно укрућених и подужно неукрућених носача. Ефекат ојачања за различите дужине оптерећења зависи од крутости подужног укрућења, односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, виткости ребра и крутости оптерећеног појаса.

Важећи европски стандард EN 1993-1-5 не узима у обзир утицај дужине оптерећења на ефекат ојачања. Ова анализа међутим показује да ефекат ојачања зависи од дужине оптерећења.

У раду је дефинисан израз за одређивање граничне носивости неукрућених и укрућених носача који обухвата утицај већег броја параметара.

Кључне ријечи: Локално оптерећење, Гранична носивост, Подужно укрућење, Метод коначних елемената, Параметарска анализа, Ефекат ојачања, Ефективна дужина оптерећења

Научна област: Грађевинско инжењерство

Ужа научна област: Техничка механика и теорија конструкција, Металне конструкције

INFLUENCE OF LONGITUDINAL STIFFENERS ON BEHAVIOR AND ULTIMATE RESISTANCE OF PLATE GIRDERS SUBJECTED TO PATCH LOADING

ABSTRACT

The subject of this thesis is the analysis of the behavior of longitudinally unstiffened and stiffened steel plate girders (I - girders) loaded with local load (concentrated or distributed load on a certain length) on one flange in the plane of the girder web and determination of their ultimate load.

This case of loading often appears in practice and examples are the loads of the main girders during the construction of bridges by launching technology, crane track loads, column-beam connections etc.

The problem has been studied intensively for several decades, theoretically and experimentally, with the aim of monitoring behavior and determining the ultimate strength. However, no solutions have yet been obtained that would satisfactorily capture the complex impact of all parameters. Recently, numerical analysis have been used often in combination with experimental research. By using software packages based on the finite element method, it is possible to perform more extensive parametric analysis. Thus, the influences of individual parameters can be singled out and quantified in the best way. A similar parametric analysis was conducted in this paper.

In this research, the influence of load length and other parameters on the ultimate load capacity of longitudinally unstiffened and stiffened steel I-beams was analyzed.

The primary goal of this study is to analyze strengthening effect, which is defined as the relation between the ultimate capacity of longitudinally stiffened and longitudinally unstiffened girders. The strengthening effect for different load lengths depends on the stiffness of the longitudinal stiffeners, the web aspect ratio, web slenderness and the stiffness of the loaded flange.

The current European standard EN 1993-1-5 does not take into account the influence of the load length on the strengthening effect. This analysis, however, shows that the strengthening effect depends on the load length.

A formula for determining the ultimate load capacity of unstiffened and stiffened steel plate girders, which include the influence of a number of parameters is defined.

Keywords: Patch loading; Ultimate capacity; Longitudinal stiffeners; Finite element analysis; Parametric study; Strengthening effect; Effective loaded length;

Scientific field: Civil Engineering

Scientific subfield: Engineering Mechanics and Theory of Structures, and Metal Structures

САДРЖАЈ

ЗАХВАЛНИЦА.....	i
РЕЗИМЕ.....	iii
АВСТРАКТ.....	v
САДРЖАЈ.....	vii
ЛИСТА СЛИКА.....	ix
ЛИСТА ТАБЕЛА.....	xi
ОЗНАЧАВАЊЕ.....	xiii
ПОГЛАВЉЕ 1: УВОД.....	1
1.1 ПРОБЛЕМ И ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА.....	2
1.2 ЦИЉ И ЗАДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА.....	4
1.3 МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА.....	5
1.4 ПРИКАЗ СТРУКТУРЕ РАДА.....	5
1.5 ПУБЛИКОВАНИ РАДОВИ.....	6
ПОГЛАВЉЕ 2: ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРЕ.....	7
2.1 ТЕОРИЈА ИЗБОЧАВАЊА ПЛОЧА - ОПШТЕ НАПОМЕНЕ.....	7
2.2 НОСАЧИ ПОД ДЕЈСТВОМ ЛОКАЛНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА.....	10
2.2.1 ЕЛАСТИЧНА КРИТИЧНА СИЛА.....	10
2.2.1.1 Извод из одабраних истраживања критичне силе.....	11
2.2.2 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ.....	12
2.2.2.1 Извод из одабраних истраживања граничне силе–носачи без подужних укрућења.....	12
2.2.2.2 Извод из одабраних истраживања граничне силе–носачи са подужним укрућењима.....	16
2.3 УТИЦАЈ ДУЖИНЕ ЛОКАЛНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА.....	19
2.4 EN 1993-1-5 : EUROCODE 3 : Прорачун челичних конструкција – пуни лимени елементи.....	22
2.5 ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ.....	24
ПОГЛАВЉЕ 3: СОПСТВЕНА НУМЕРИЧКА ИСТРАЖИВАЊА.....	255
3.1 УВОД.....	255
3.2 НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ.....	28
3.3 ПАРАМЕТАРСКА АНАЛИЗА.....	31
3.3.1 АНАЛИЗА КОНВЕРГЕНЦИЈЕ.....	32
3.4 РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКЕ АНАЛИЗЕ.....	37
3.4.1 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ.....	38
3.4.1.1 Табеларни преглед резултата нумеричке анализе.....	38
3.4.1.2 Графички преглед резултата нумеричке анализе.....	44
3.4.2 УТИЦАЈ КРУТОСТИ УКРУЋЕЊА НА ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ И ЕФЕКАТ ОЈАЧАЊА.....	54
3.4.2.1 Дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења.....	55
3.4.2.2 Дијаграми ефекта ојачања у функцији дужине оптерећења.....	60
3.4.3 УТИЦАЈ ДЕБЉИНЕ ПОЈАСА.....	65
3.4.4 УТИЦАЈ ОДНОСА ДУЖИНЕ И ВИСИНЕ ОПТЕРЕЋЕНОГ ПАНЕЛА РЕБРА.....	70
3.5 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ НА ОСНОВУ ЕВРОКОДА.....	75
3.5.1 Табеларни преглед резултата добијених примјеном EN 1993-1-5.....	75
3.5.2 Упоредни дијаграми граничне носивости EN 1993-1-5 / нумеричка анализа.....	81
3.5.3 Упоредни дијаграми ефекта ојачања EN 1993-1-5 / нумеричка анализа.....	85
3.6 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ – МОДЕЛ МАТЕРИЈАЛА.....	88
ПОГЛАВЉЕ 4: ИЗРАЗ ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ГРАНИЧНЕ НОСИВОСТИ.....	91
ПОГЛАВЉЕ 5: ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕДЛОЗИ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА.....	95
5.1 ЗАКЉУЧЦИ.....	95
5.2 ДОПРИНОС ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	96
5.3 ПРЕПОРУКЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА.....	97
ЛИТЕРАТУРА.....	98
ПРИЛОГ А - Дијаграми ефекта ојачања за све укрућене носаче.....	99
ПРИЛОГ Б – Гранична носивост носача за различите дебљине појаса.....	106
ПРИЛОГ В - Гранична носивост носача за различите односе дужине и висине оптерећеног панела.....	111
БИОГРАФИЈА.....	116

ЛИСТА СЛИКА

Слика 1 Лимени носач под дејством локалног оптерећења	1
Слика 2 Лансирање мостова	1
Слика 3 Означавање носача	2
Слика 4 Стабилност носача. Основни појмови	7
Слика 5 Равномјерна расподела напона на ефективној ширини плоче	9
Слика 6 Механизам лома са савијањем ребра – Roberts, Rockey [62]	14
Слика 7 Механички модел – Johansson, Lagerquist [63]	15
Слика 8 Механизам лома – Лучић [16]	15
Слика 9 Механизам лома – Graciano [11]	17
Слика 10 Механизам лома – Davaine [35]	18
Слика 11 Механизам лома – Хајдин, Марковић [27]	18
Слика 12 Коэффициенти избочавања за различите случајеве оптерећења (EN 1993-1-5)[1]	22
Слика 13 Ефективни попречни пресјек укрућења (EN 1993-1-5)[1]	23
Слика 14 Носачи у експерименталним истраживањима [29] (носачи серије А), [31] (носачи серије Б)	25
Слика 15 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених носача, (а) експериментални резултати [29],[31], (б) нумерички резултати [30],[32]	26
Слика 16 Нумерички модел – мрежа коначних елемената, гранични услови, оптерећење	28
Слика 17 Дијаграм напон-дилатација (ребро и појас) [30]	30
Слика 18 Крива оптерећење-помјерање за подужно (а)неукрућене и (б)укрућене носаче	30
Слика 19 Број модела у нумеричкој анализи	31
Слика 20 Поступак избора ширине подужног укрућења у анализи конвергенције	32
Слика 21 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = t_w$	33
Слика 22 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = 2t_w$	34
Слика 23 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = 3t_w$	35
Слика 24 Релативна крутост подужног укрућења γ_s у односу на граничну вриједност релативне крутости γ^*	36
Слика 25 Дијаграми сила-вертикално помјерање за неукрућене носаче и укрућене носаче (а) $t_s x b_s = 4x52$, $\alpha = 1$, (б) $t_s x b_s = 12x50$, $\alpha = 1$, (с) $t_s x b_s = 4x52$, $\alpha = 2$, (д) $t_s x b_s = 12x50$, $\alpha = 2$, (е) $t_s x b_s = 4x52$, $\alpha = 3$, (ф) $t_s x b_s = 12x50$, $\alpha = 3$	44
Слика 26 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$ ($\alpha = 1$)	45
Слика 27 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 4x52$ ($\alpha = 1$)	46
Слика 28 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 12x50$ ($\alpha = 1$)	47
Слика 29 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, ($\alpha = 2$)	48
Слика 30 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 4x52$ ($\alpha = 2$)	49
Слика 31 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 12x50$ ($\alpha = 2$)	50
Слика 32 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$ ($\alpha = 3$)	51
Слика 33 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 4x52$ ($\alpha = 3$)	52
Слика 34 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s x b_s = 12x50$ ($\alpha = 3$)	53
Слика 35 Варирана дебљина подужног укрућења	54
Слика 36 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 4$ mm, (а) $t_f = 8$ mm, (б) $t_f = 16$ mm, (с) $t_f = 24$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	55
Слика 37 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 2$ mm, (а) $t_f = 4$ mm, (б) $t_f = 8$ mm, (с) $t_f = 12$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	55
Слика 38 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 1.25$ mm, (а) $t_f = 2.5$ mm, (б) $t_f = 5$ mm, (с) $t_f = 7.5$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	56
Слика 39 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 4$ mm, (а) $t_f = 8$ mm, (б) $t_f = 16$ mm, (с) $t_f = 24$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	56
Слика 40 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 2$ mm, (а) $t_f = 4$ mm, (б) $t_f = 8$ mm, (с) $t_f = 12$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	57
Слика 41 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 1.25$ mm, (а) $t_f = 2.5$ mm, (б) $t_f = 5$ mm, (с) $t_f = 7.5$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	57
Слика 42 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 4$ mm, (а) $t_f = 8$ mm, (б) $t_f = 16$ mm, (с) $t_f = 24$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	58
Слика 43 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 2$ mm, (а) $t_f = 4$ mm, (б) $t_f = 8$ mm, (с) $t_f = 12$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	58
Слика 44 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 1.25$ mm, (а) $t_f = 2.5$ mm, (б) $t_f = 5$ mm, (с) $t_f = 7.5$ mm и сва разматрана подужна укрућења.	59
Слика 45 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4$, $t_f = 8$	60
Слика 46 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4$, $t_f = 16$	61
Слика 47 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4$, $t_f = 24$	62

Слика 48	Ефекат ојачања за подужно укрупњен носач $\alpha = 1$, $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s b_s=4x52$	63
Слика 49	Почетне имперфекције и деформације средњег пресека ребра при достизању граничног оптерећења подужно укрупњеног и неукрупњеног носача $\alpha = 1$, $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s b_s=4x52$	63
Слика 50	Вариране дебљине појаса.....	65
Слика 51	Гранична носивост подужно неукрупњених носача ($t_w = 4$) за различите дебљине појаса.....	65
Слика 52	Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 4$) за различите дебљине појаса.....	66
Слика 53	Гранична носивост подужно неукрупњених носача ($t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.....	67
Слика 54	Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.....	68
Слика 55	Варирани однос дужине и висине оптерећеног панела.....	70
Слика 56	Гранична носивост подужно неукрупњених носача ($t_w = 4$, (a) $t_f=8$, (b) $t_f=16$, (c) $t_f = 24$) за различите односе ширине и висине ребра.....	70
Слика 57	Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 4$, (a) $t_f=8$, (b) $t_f=16$, (c) $t_f = 24$) за различите односе ширине и висине ребра.....	71
Слика 58	Гранична носивост подужно неукрупњених носача ($t_w = 1.25$, (a) $t_f=2.5$, (b) $t_f=5$, (c) $t_f = 7.5$) за различите односе ширине и висине ребра.....	72
Слика 59	Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 1.25$, (a) $t_f=2.5$, (b) $t_f=5$, (c) $t_f = 7.5$) за различите односе ширине и висине ребра.....	73
Слика 60	Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s=12$, $\alpha=1,2,3$	81
Слика 61	Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=4$, $t_f=24$, $t_s=12$, $\alpha=1,2,3$	82
Слика 62	Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=1.25$, $t_f=2.5$, $t_s=3.75$, $\alpha=1,2,3$	83
Слика 63	Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5 – $t_w=1.25$, $t_f=7.5$, $t_s=3.75$, $\alpha=1,2,3$	84
Слика 64	Упоредни дијаграми ефеката ојачања носача добијених нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=4$, $t_f=8$ (24).....	85
Слика 65	Упоредни дијаграми ефеката ојачања носача добијених нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=1.25$, $t_f=2.5$ (7.5).....	86
Слика 66	Модел материјала - σ - ϵ крива.....	88
Слика 67	Гранична носивост – (a) модел материјала-M1, (b) модел материјала M4.....	89
Слика A1	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 4$, (a) $t_f = 8$, (b) $t_f = 16$, (c) $t_f = 24$	101
Слика A2	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$	101
Слика A3	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$	102
Слика A4	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 4$, (a) $t_f = 8$, (b) $t_f = 16$, (c) $t_f = 24$	102
Слика A5	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$	103
Слика A6	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$	103
Слика A7	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$	104
Слика A8	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$	104
Слика A9	Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$	105
Слика B1	Гранична носивост носача ($\alpha = 1$, $t_w = 4$) за различите дебљине појаса.....	106
Слика B2	Гранична носивост носача ($\alpha = 1$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса.....	106
Слика B3	Гранична носивост носача ($\alpha = 1$, $t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.....	107
Слика B4	Гранична носивост носача ($\alpha = 2$, $t_w = 4$) за различите дебљине појаса.....	107
Слика B5	Гранична носивост носача ($\alpha = 2$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса.....	108
Слика B6	Гранична носивост носача ($\alpha = 2$, $t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.....	108
Слика B7	Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 4$) за различите дебљине појаса.....	109
Слика B8	Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса.....	109
Слика B9	Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.....	110
Слика V1	Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	111
Слика V2	Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 16$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	111
Слика V3	Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 24$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	112
Слика V4	Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 4$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	112
Слика V5	Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 8$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	113
Слика V6	Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 12$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	113
Слика V7	Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 2.5$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	114
Слика V8	Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 5$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	114
Слика V9	Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 7.5$) за различите односе дужине и висине опт. панела.....	115

ЛИСТА ТАБЕЛА

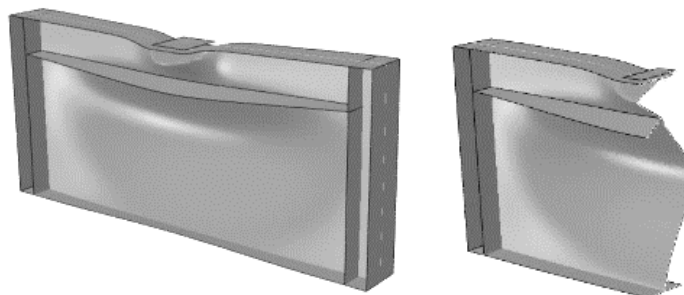
Табела 1	Експериментална истраживања подужно укрупњених носача услед дејства локалног оптерећења	20
Табела 2	Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрупњења γ_s за $t_s = t_w$	33
Табела 3	Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрупњења γ_s за $t_s = 2t_w$	34
Табела 4	Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрупњења γ_s за $t_s = 3t_w$	35
Табела 5	Класификација подужних укрупњења коришћених у параметарској анализи.....	36
Табела 6	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) носача за $[\alpha = 1]$	38
Табела 7	Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за $[\alpha = 1]$	39
Табела 8	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) носача за $[\alpha = 2]$	40
Табела 9	Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за $[\alpha = 2]$	41
Табела 10	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) носача за $[\alpha = 3]$	42
Табела 11	Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за $[\alpha = 2]$	43
Табела 12	Ефекат ојачања β (Loaiza, Graciano [38] / нумеричка анализа из ове дисертације – упоредни резултати).....	64
Табела 13	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 1$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN 1993-1-5).....	75
Табела 14	Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 1$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5).....	76
Табела 15	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 2$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN-1993-1-5).....	77
Табела 16	Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 2$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5).....	78
Табела 17	Гранична носивост подужно неукрупњених ($F_{unstiff}$) и подужно укрупњених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 3$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN 1993-1-5).....	79
Табела 18	Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 3$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5).....	80
Табела 19	Гранична носивост за различите материјалне моделе.....	89
Табела 20	Статистички подаци – гранична носивост одређена на основу предложеног израза.....	92
Табела 21	Статистички подаци – гранична носивост одређена на основу EN 1993-1-5.....	93

ОЗНАЧАВАЊЕ

α	однос дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = a / h_w$)
β	ефекат ојачања ($\beta = F_{stiff} / F_{unstiff}$)
γ^*	гранична вриједност релативне крутости подужног укрућења
γ_s	релативна крутост подужног укрућења
χ_F	фактор редукције
a	дужина оптерећеног панела ребра (растојање вертикалних укрућења)
b_l	положај подужног укрућења у односу на оптерећени појас
b_f	ширина појаса
b_s	ширина подужног укрућења
f_{uf}	гранични напон појаса
f_{uw}	гранични напон ребра
f_{yf}	напон течења појаса
f_{yw}	напон течења ребра
k_F	коэффициент избочавања (при дејству локалног оптерећења)
l_y	ефективна дужина оптерећења
s_s	дужина локалног оптерећења
t_f	дебљина појаса
t_s	дебљина подужног укрућења
t_w	дебљина ребра
h_w	висина ребра (висина оптерећеног панела)
w_0	амплитуда почетних имперфекција
E	(Young-ов) модул еластичности
F	локално оптерећења (<i>patch loading</i>)
F_{cr}	критично оптерећење
F_{stiff}	гранична носивост подужно укрућених носача
$F_{unstiff}$	гранична носивост подужно неукрућених носача

УВОД

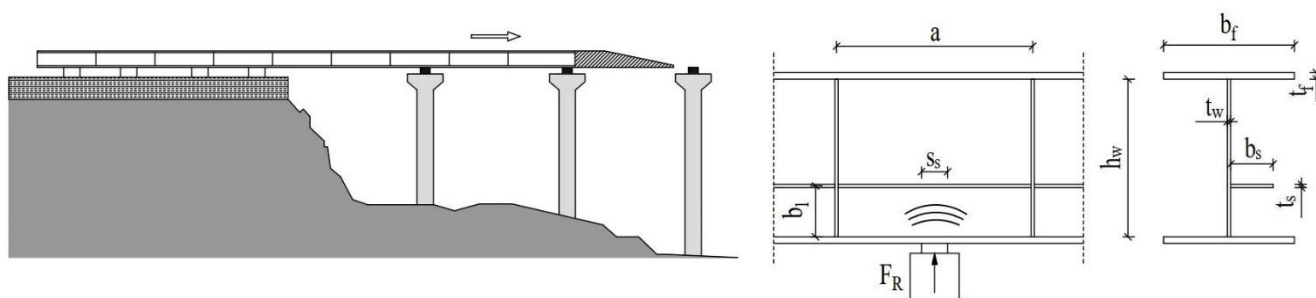
Случај локалног попречног оптерећења када концентрисано попречно оптерећење (или расподијељено попречно оптерећење на одређеној дужини) дјелује на један појас лимених носача у равни ребра, без вертикалних укрућења у зони уношења оптерећења, познат је у литератури као "patch loading".



Слика 1 Лимени носач под дејством локалног оптерећења

Гранична носивост се достиже локалним извијањем ребра и деформацијом оптерећеног појаса у близини тачке уношења оптерећења. Подужна укрућења постављена испод оптерећеног појаса могу се користити као додатно ојачање лимених носача (слика 1 и слика 3).

Један од најрепрезентативнијих примјера овог случаја оптерећења појављује се током лансирања (превлачења) челичних и спрегнутих мостова са више распона преко привремених и/или сталних ослонаца (слика 2). Приликом овакве изградње реакције на привременим и сталним ослонцима представљају локално оптерећење на доњи појас носача (*patch loading* на доњем појасу носача). У овом случају сви пресеци носача су изложени оптерећењима којима више никада неће бити изложени у току експлоатације. Због тога је од велике важности што прецизније познавање граничне носивости носача да би се, са једне стране, избјегао лом носача у фази изградње, а са друге стране да би се избјегло непотребно повећање димензија носача. Овај проблем се третира у Еврокоду 3, део EN 1993-1-5 [1] под називом на енглеском језику - *transverse loading on plated structures*, односно на српском језику - *носивост на дејство попречних сила*.



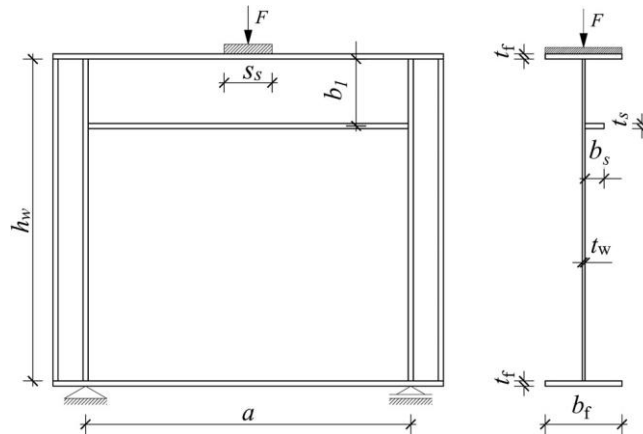
Слика 2 Лансирање мостова

Осим код изградње мостова овај начин оптерећења се јавља и код носача кранских стаза затим код веза греда и стубова или међусобних веза греда у зградарству.

1.1 ПРОБЛЕМ И ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Проблем истраживања је понашање подужно неукрућених и укрућених челичних танкозидних (лимених) носача – односно I-носача под дејством локалног попречног оптерећења (концентрисаног или дјелимично расподијељеног на одређеној дужини) које делује у равни ребра на једном појасу. Носачи немају вертикална укрућења у зони уношења оптерећења. Достижање граничне носивости манифестује се избочавањем ребра у зони уношења оптерећења и деформацијом оптерећеног појаса. Понашање носача и гранична носивост је сложен проблем са израженом геометријском нелинеарношћу и еласто-пластичним понашањем материјала, као и са утицајем великог броја параметара. Управо та сложеност чини овај проблем недовољно испитаним, актуелним и атрактивним за даља истраживања.

Предмет овог истраживања је гранична носивост подужно неукрућених и подужно укрућених лимених носача (слика 3) под дејством локалног оптерећења, односно повећање носивости при примјени подужних равних укрућења (видјети на слици 3) у односу на неукрућене носаче при различитим дужинама локалног оптерећења. Овај проблем је до сада био недовољно систематски истраживан. У истраживањима на која се надовезује ово истраживање дошло се до важних закључака о томе како различите дужине оптерећења на различите начине утичу на повећање граничне носивости код примјене подужних укрућења.



Слика 3 Означавање носача

Проблематика којом се бави овај рад се интензивно истражује у свијету у последњих педесет година [2], али још нису добијена сва решења која би на задовољавајући начин обухватила сложен утицај различитих параметара као што су: утицај основних димензија носача (дебљине ребра, утицај дужине носача, висине ребра, утицај дужине и ширине појаса по којој делује оптерећење), карактеристике материјала, утицај вертикалних (попречних) укрућења ребара – односно њихових растојања, утицај хоризонталних (подужних) укрућења ребара и њихових карактеристика (димензија и да ли су отвореног или затвореног типа), утицај врсте напрезања, утицај почетних деформација (геометријских имперфекција), утицај резидуалних напона, начин на који долази до локалног оптерећења и начин уношења оптерећења, карактер оптерећења (статичко или динамичко), положај оптерећења на носачу, утицај ексцентрицитета оптерећења у односу на раван ребра.

Проблем је истраживан и експериментално и нумерички, разматрајући подужно неукрућене и укрућене лимене носаче са различитим геометријским и физичким параметрима који утичу на граничну носивост. Ова тема истраживања је и даље отворена.

Више истраживања је у последње вријеме посвећено подужно укрућеним челичним (лименим) носачима прије свега због чешће употребе челичних носача у конструкцијама мостова, који у фази изградње пролазе кроз овај случај оптерећења.

Најважнији циљ у оквиру ове проблематике је одређивање граничне носивости и дефинисање величина (параметара) које на њу утичу. У почетку су истраживања била теоријска и односила су се на проблем одређивања критичне силе, али је закључено да се тим путем не може доћи до задовољавајућих решења за граничну носивост. Због тога се до 1990-их година проучавање ове проблематике углавном базирало на експерименталним истраживањима [3-6]. У том периоду се ова проблематика уводи и у прописе за прорачун грађевинских конструкција у разним земљама и примијењена решења су била емпиријског или полуемпиријског карактера.

После 1990-тих година, развој рачунара и софтверских пакета, као што су Abaqus, Ansys и слични, заснованих на методи коначних елемената [7-8] омогућио је свеобухватнију анализу овог проблема нумеричким симулацијама [9-14]. Израдом већег броја модела и формирањем што веће базе података са резултатима, како експерименталних тако и нумеричких истраживања, могуће је изоловати и лакше уочити појединачан утицај и значај различитих параметара на понашање носача. У овом периоду у оквиру развоја Еврокодова (Европских прописа за прорачун грађевинских конструкција) [1] промијењен је и приступ решавању у овом истраживању разматраног проблема, који је хармонизован са приступом другим сродним проблемима.

Истраживања ове проблематике која се обављају на Грађевинском факултету Универзитета у Београду почела су 1970-их година под вођством академика Николе Хајдина, у оквиру међународне сарадње са Универзитетом у Кардифу и Академијом наука у Прагу. На Грађевинском факултету у Подгорици ова истраживања су почела 1990-их. Наведена истраживања су обухватала теоријска, експериментална и нумеричка истраживања. Више докторских и магистарских теза аутора који су се бавили овом темом је одбрањено на Грађевинском факултету у Београду - (Б. Ђорић [15], Д. Лучић [16], Н. Марковић [17,18], Б. Шћепановић [19], А. Ђеранић [20] и С.Ковачевић [21]) као и на Грађевинском факултету у Подгорици (Б. Шћепановић [22], С. Алексић [23,24] и М. Рогач [25]). Посебно је значајно да скоро сви радови сем теоријских и нумеричких истраживања садрже и резултате експеримената спроведених на Грађевинском факултету у Подгорици, гдје постоји добро опремљена лабораторија са квалитетним, професионалним кадром, што је омогућавало поуздане резултате мјерења. Резултати ових истраживања су публиковани у врхунским међународним научним часописима (између осталих радови [26-32]) и цитирани су од истраживача широм свијета у међународним научним часописима, саопштењима на међународним скуповима као и у докторским дисертацијама. Због сложености проблема као и утицаја више параметара у овим радовима је наглашавана потреба за даљим истраживањима.

Већи број свих досадашњих истраживања односи се на носаче без подужних укрућења и њихово понашање је у великој мјери довољно истражено. Носачи са подужним укрућењима се интензивније проучавају тек последње двије деценије [11,33-43]. С обзиром на још већу сложеност понашања у односу на носаче без подужних укрућења, због већег броја параметара и њихове међусобне повезаности ова истраживања нису дала сва потребна објашњења.

Утицај дужине наношења оптерећења код подужно укрућених носача као и утицај карактеристика подужних укрућења је још увек недовољно истражен. Систематска истраживања ове проблематике су вршена само у Србији (експериментална и нумеричка истраживања Н. Марковића и С. Ковачевића [29-32]), а у Колумбији само дјелимично, гдје то није био главни предмет истраживања (нумеричка истраживања [38] и [40]). Упорјеђење резултата ових истраживања са резултатима према EN 1993-1-5 [1] указује да Еврокод не узима у обзир на задовољавајући начин дужину локалног оптерећења и појединих параметара, и даје веома конзервативне резултате за распоне вриједности параметара који су коришћени у досадашњим истраживањима. У наведеним истраживањима добијени су важни закључци, али с обзиром на нужно ограничену варијацију параметара у релативно малом броју истраживања потребна су додатна истраживања ради генерализације добијених закључака.

Истраживање спроведено у оквиру ове дисертације представља наставак и проширење експерименталних и нумеричких истраживања Н. Марковића и С. Ковачевића на Грађевинском факултету у Београду [29-32], која су систематски започела разматрања утицаја дужине nanoшења оптерећења код подужно укрупњених носача.

Ради генерализације закључака добијених у претходним истраживањима, у овом истраживању је извршена параметарска анализа у којој је анализиран утицај дужине локалног оптерећења при варирању одређених параметара као и њихових односа (однос дужине и висине оптерећеног панела ребра – растојање између вертикалних укрупњења, дебљина појаса, дебљина ребра, димензије подужних укрупњења), у распону вриједности које одговарају уобичајеним употребама у различитим грађевинским конструкцијама, као и у досадашњим експерименталним и нумеричким истраживањима. Разматран је утицај дужине оптерећења на граничну носивост подужно неукрупњених и подужно укрупњених носача (искључиво са по једним равним укрупњењем) као и на ефекат ојачања (који је дефинисан као однос између граничне носивости подужно укрупњених и граничне носивости подужно неукрупњених носача).

1.2 ЦИЉ И ЗАДАЦИ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ овог истраживања је квалитативна и квантитативна анализа граничне носивости лимених носача под дејством локалног оптерећења са посебним освртом на утицај подужних укрупњења и њихових карактеристика. Употребом подужних укрупњења долази до повећања граничне носивости па је циљ и да се параметарском анализом и варирањем одређеног броја параметара што прецизније објасни утицај подужних укрупњења на повећање граничне носивости при различитим дужинама расподијељеног (локалног) оптерећења у зависности од посматраних параметара. Овај утицај се може изразити преко ефекта ојачања (дефинисан као однос између граничне носивости подужно укрупњених и подужно неукрупњених носача) који указује на ефикасност коришћења подужних укрупњења.

Циљ је такође да се изврши поређење резултата са постојећим рјешењима датим у Еврокоду и да се дају одговарајући закључци, препоруке и да се дефинишу могућности побољшања постојећих рјешења.

Задатак истраживања обухвата нумеричку анализу утицаја дужине nanoшења оптерећења код подужно укрупњених и неукрупњених носача са посебном освртом на карактеристике подужних укрупњења. Први дио истраживања обухвата дефинисање нумеричког модела, параметарску анализу са варирањем одређених параметара (дужина nanoшења оптерећења, распон носача, дебљина појаса, дебљина ребра, димензије подужних укрупњења) као и анализу могућности моделирања карактеристика материјала.

Наредни задатак истраживања је анализа резултата добијених параметарском анализом и поређење добијених резултата са резултатима добијеним на основу препорука у Еврокоду. Такође, задатак је дефинисање израза за одређивање граничне носивости са узимањем у обзир дужине локалног оптерећења на основу резултата параметарске анализе.

Полазна хипотеза је да појава локалног избочавања представља комплексно понашање носача као сложеног система плоча ребра и појаса са међусобним садејством. Достицање граничне носивости се испољава избочавањем ребра у зони уношења оптерећења и прогресивним савијањем појаса. Достицање граничне носивости је резултат сложеног еласто-пластичног понашања система.

На понашање носача и вриједност граничне силе утичу разни параметри, а поједини од њих као што су дужина распростирања локалног оптерећења, почетне имперфекције и карактеристике попречних и подужних оптерећења нису довољно истражени. У овој параметарској анализи, у циљу што јаснијег издвајања утицаја подужних укрупњења као и због омогућавања поређења различитих параметара полази се од претпоставки да сви носачи имају почетне имперфекције које одговарају првом облику избочавања.

1.3 МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Методе коришћене у овом истраживању могу се сврстати у следеће групе :

- теоријско-аналитичке методе (анализа постојећих теоријских и експерименталних истраживања која су се бавила локалним оптерећењем)
- нумеричка анализа (формирање нумеричких модела носача дефинисањем материјалних и геометријских карактеристика носача, граничних услова и оптерећења носача)
- параметарска анализа (формирање базе података варирањем параметара у нумеричком моделу - дужина локалног оптерећења, однос дужине и висине оптерећеног панела, дебљина ребра, дебљина појаса, крутост укрућења)
- метода статистичке анализе (статистичка анализа добијених резултата)

1.4 ПРИКАЗ СТРУКТУРЕ РАДА

Рад приказан у овој дисертацији садржи 5 поглавља која су организована на следећи начин:

Поглавље 1 - Увод

У овом поглављу је дат увод у проблематику, дефинисани су циљеви, задаци и методологија истраживања и укратко је приказана структура рада.

Поглавље 2 – Преглед и анализа литературе

У овом поглављу су дате опште напомене из теорије избочавања плоча и преглед литературе и досадашњих истраживања. Дати су изводи из одабраних истраживања еластичне критичне силе, граничне носивости као и истраживања која су узимала у обзир утицај дужине оптерећења на граничну носивост. Такође, у овом поглављу је дат и кратак осврт на важећи европски стандард EN 1993-1-5.

Поглавље 3 – Сопствена истраживања

У овом поглављу детаљно је описан модел коначних елемената који је коришћен за симулацију проблема. У њему су детаљно дата објашњења о геометрији носача, мрежи коначних елемената, оптерећењу и граничним условима. Приказани су параметри који су варирани као и начин одабира модела који су коришћени у параметарској анализи.

Затим су приказани резултати параметарске анализе која обухвата 648 модела носача. Анализирана је гранична носивост носача услед дејства локалног оптерећења за различите односе параметара. У посебним подпоглављима је анализиран утицај крутости подужних укрућења, дебљине појаса као и односа дужине и висине оптерећеног панела ребра. Након тога анализирани су резултати за разматране носаче на основу важећег европског прописа EN 1993-1-5 и дата је упоредна анализа. Такође, извршена је компарација граничних носивости разматраних носача са носачима у којима је усвојен идеализовани модел материјала на основу препорука из EN 1993-1-5.

Поглавље 4 – Израз за израчунавање граничне носивости

Дат је израз за израчунавање граничне носивости носача оптерећених локалним оптерећењем који на најбољи начин обухвата утицај разматраних параметара.

Поглавље 5 - Закључци и предлози за даља истраживања

У Поглављу 5 су резимирани закључци истраживања са препорукама за даља истраживања.

Додатно, после поглавља 5, приказан је списак релевантне литературе коришћене у овом истраживању као и додатни материјал који је дат у прилозима: Прилог А (дијаграми ефеката ојачања за све носаче), Прилог Б (утицај дебљине појаса на граничну носивост за све носаче) и Прилог В (утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра на граничну носивост за све носаче)

1.5 ПУБЛИКОВАНИ РАДОВИ

Претходни радови кандидата из области разматране у овом истраживању :

- 1) **A. Ћеранић**, Elasto plastično ponašanje i granična nosivost limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2016, str.79.
- 2) **A. Ћеранић**, S. Kovačević N. Marković, Numerička analiza uticaja dužine delimičnog opterećenja na graničnu nosivost i nosača, Društvo građevinskih konstruktora Srbije, Simpozijum 2016, Zlatibor, 2016.
- 3) S. Kovačević, **A. Ћеранић**, N. Marković, Modeliranje I nosača za numeričku analizu granične nosivosti pri delimičnom opterećenju, Društvo građevinskih konstruktora Srbije, Simpozijum 2016, Zlatibor, 2016.
- 4) M. Bendić, **A. Ћеранић**, S. Kovačević, R. Salatić, N. Marković, Elastic critical load of stiffened I-girders subjected to patch loading, 8th International Conference, Contemporary achievements in Civil Engineering, Subotica, 2021.
- 5) M. Bendić, **A. Ћеранић**, S. Kovačević, R. Salatić, N. Marković, Elastic critical load of the web of I-girders subjected to patch loading, Društvo građevinskih konstruktora Srbije, Simpozijum 2020, Aranđelovac, 2021.
- 6) S. Kovačević, N. Marković, **A. Ћеранић**, M. Bendić, Unfavorable imperfection shape in steel plate girders for web local buckling, Structural Stability Research Council Annual Stability Conference, Louisville, Kentucky, USA, 2021.
- 7) S. Kovačević, **A. Ћеранић**, N. Marković, Patch load resistance of longitudinally stiffened steel plate girders: A parametric study, The 9th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel, Sheffield, 2021.

Поједини дјелови овог истраживања су објављени у следећим радовима :

- 8) **A. Ћеранић**, S. Kovačević, N. Marković, Influence of patch load length and flange stiffness on the ultimate strength of steel plate girders, The 7th International Conference, Civil Engineering – Science and Practice, GNP 2020, Kolašin, 2020, 55-62.
- 9) **A. Ћеранић**, M. Bendić, S. Kovačević, N. Marković, Influence of longitudinal stiffeners on behavior and ultimate resistance of plate girders subjected to patch loading, The 8th International Conference, Civil Engineering – Science and Practice, GNP 2022, Kolašin, 2022.
- 10) **A. Ћеранић**, M. Bendić, S. Kovačević, R. Salatić, N. Marković, Influence of patch load length on strengthening effect in steel plate girders, Journal of Constructional Steel Research, 195 (2022) 107348, 19p., <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107348>

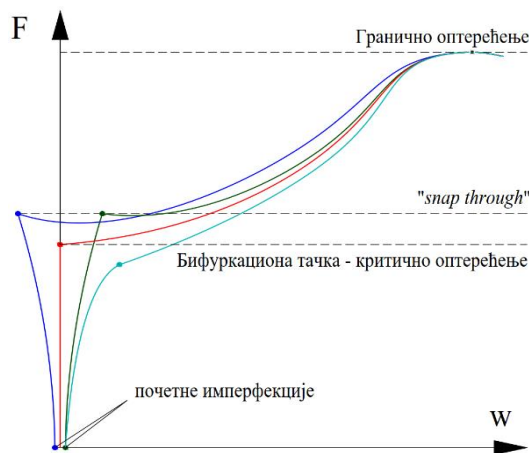
ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРЕ

У радовима више аутора, међу којима су [9], [25], [35] дат је детаљан преглед литературе из разматране области. У овом поглављу су дате опште напомене из теорије избочавања плоча и изводи из одабраних истраживања еластичне критичне силе, граничне носивости као и истраживања која су узимала у обзир утицај дужине оптерећења на граничну носивост. Такође, у овом поглављу је дат и кратак осврт на важећи европски стандард EN 1993-1-5 [1].

2.1 ТЕОРИЈА ИЗБОЧАВАЊА ПЛОЧА - ОПШТЕ НАПОМЕНЕ

Танке плоче су често изложене оптерећењима која проузрокују нормалне напоне притиска или смичуће напоне у равни плоче. Уколико су ти напони у одређеним границама равнотежа сила је стабилна, а понашање плоча се карактерише одсуством бочне деформације (ван равни плоче). Међутим може доћи до изненадне промене карактера деформације, односно може доћи до појаве бочних деформација (избочења) уколико напрезања достигну одређену вриједност.

Када се говори о избочавању плоча, подразумевају се исти принципи као код стабилности других конструктивних елемената. Постојање стања индиферентне равнотеже карактерише прелаз из једног облика равнотеже (стабилна равнотежа) у други облик (лабилна равнотежа).



Слика 4 Стабилност носача. Основни појмови.

Уколико понашање плоче посматрамо на дијаграму F, w (слика 4) можемо уочити да је недеформисани облик (без деформације изван равни плоче) у почетку стабилан положај. При одређеној вредности оптерећења, критичној вредности оптерећења, постоји бесконачно блиски равнотежни положај. Ова тачка представља бифуркациони праг и одговара пресеку између основног равнотежног пута и секундарног равнотежног пута који представља посткритични пут. Даље понашање карактерише повећање деформације при чему долази до развоја секундарних напона.

Постоји разлика у понашању између линијских и површинских конструктивних елемената. Код линијских елемената извијање значи и губитак носивости. Међутим код плоча носивост може да буде значајно већа од еластичне критичне силе избочавања и за плоче је карактеристично посткритично понашање.

За одређивање критичне силе избочавања плоча довољно је користити теорију малих деформација (могу се занемарити деформације средње равни плоче када су помјерања w мања од дебљине плоче). Повећањем оптерећења повећавају се и померања w и достижу вриједности дебљине плоче. У том случају се више не може занемарити утицај деформације средње равни плоче односно мембранских напона узрокованих даљим избочавањем плоче, па се за праћење понашања плоча при повећању оптерећења користи теорија коначних (великих) деформација.

Уколико су плоче дјелови носача, избочавање плоча не мора да значи и губитак носивости читавог носача. У том смислу се и говори о локалном избочавању. До избочавања плоча може да дође при различитим условима оптерећења, а најчешћи случајеви су да је плоча оптерећена дуж појединих или свих контура оптерећењем које доводи до напона притиска у читавој плочи или појединим њеним дјеловима. Уобичајено се разматрају следећи случајеви оптерећења :

- равномерно расподијељено по једној или по обије наспрамне ивице
- линеарно промјенљиво оптерећење
- оптерећење смичућим силама дуж ивица
- оптерећење локалним оперећењем дуж једне или обије ивице (patch loading)
- комбинације свих ових случајева.

Избочавање плоча се може изразити математичким обликом односно диференцијалном једначином која је изведена примјеном теорије малих деформација. Рјешавањем ове диференцијалне једначине уз задовољавање граничних услова долази се до решавања проблема прорачуна критичног оптерећења притиснуте плоче.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \cdot \left(\sigma_x t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\tau_{xy} t \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.1.1)$$

У многим случајевима који се често појављују у пракси, није могуће добити тачно решење диференцијалне једначине уз задовољење свих контурних услова и уз тачну расподјелу напона у плочи. Приближна рјешења у овом случају се добијају рјешавањем диференцијалне једначине уз приближно задовољавање само неких од ивичних услова.

Код плочастих носача, достизањем критичне силе не долази до губитка носивости, тако да је неопходно анализирати даље посткритично понашање носача у циљу одређивања граничне носивости. Након достизања критичног оптерећења долази до неравнојерне прерасподјеле напона, па је анализа посткритичног понашања плоча услед великих деформација знатно компликованија. Гранична носивост се може одредити примјеном приближног аналитичког поступка ефективне ширине плоче, док се у последње вријеме за тачнија решења користе нумеричке анализе на нелинеарним моделима.

Као примјер наведен је поступак за одређивање граничне силе код плоча које су оптерећене раномјерним оптерећењем. Поступак се састоји од три дијела. У првом дијелу се одређује сила F_y ($F_y = b \cdot t \cdot f_y$) која представља силу при достизњу напона течења f_y . Затим се у другом дијелу одређује теоријска елстична критична сила F_{cr} ($F_{cr} = b \cdot t \cdot \sigma_{cr}$) према класичној теорији еластичности. На овај начин је дефинисан параметар виткости као :

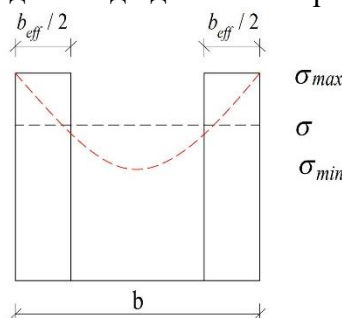
$$\lambda = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (2.1.2)$$

Трећи дио обухвата дефинисање функције која повезује граничну носивост F_u са одређеним параметром виткости

$$\chi = \frac{F_u}{F_y} = \frac{\sigma_u}{f_y} = f(\lambda) \quad (2.1.3)$$

На основу von Karman-ове хипотезе [44] функција χ се може одредити на следећи начин:

Стварна неравномерна расподела напона по ширини плоче може се замијенити равномјерном расподелом на смањеној ширини плоче (ефективној ширини плоче), (слика 5). Када ивични напон σ_{max} достигне напон течења f_y долази до достигања граничне носивости.



Слика 5 Равномјерна расподела напона на ефективној ширини плоче

Ако средњу граничну вриједност напона при достигању носивости обиљежимо са σ_u тада укупну силу при достигању граничне носивости можемо написати као:

$$\sigma_u \cdot b = f_y \cdot b_{eff} \Rightarrow \frac{b_{eff}}{b} = \frac{\sigma_u}{f_y} = \chi \quad (2.1.4)$$

Критичан напон избочавања $(\sigma_{cr})_{eff}$ панела чија је ширина једнака редукованој ширини b_{eff} може се представити на следећи начин

$$(\sigma_{cr})_{eff} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b_{eff}}\right)^2 = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \left(\frac{b}{b_{eff}}\right)^2 = \sigma_{cr} \cdot \left(\frac{b}{b_{eff}}\right)^2 \quad (2.1.5)$$

На основу von Karman-ове хипотезе критични напон избочавања $(\sigma_{cr})_{eff}$ панела са смањеном ширином треба да буде једнак ивичном напону (максималном напону при стварној расподели), односно у случају одређивања носивости – напону течења f_y

$$(\sigma_{cr})_{eff} = f_y \Rightarrow b_{eff} = b \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad \chi = \frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.1.6)$$

Ово решење даје добре резултате за велике вриједности односа ширине плоче и њене дебљине b/t односно λ . Понуђено рјешење није међутим обухватало почетне имперфекције плоче, тако да су дате бројне модификације ове формуле од којих је најпознатија Winter-ова функција [45].

На основу резултата експерименталног истраживања предложен је облик формуле којом је обухваћено нееластично понашање и геометријске имперфекције

$$\frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) \quad \text{за } \lambda \geq 0.67 \quad (2.1.7)$$

Верзија ове формуле написана у другом облику се користи у важећем европском стандарду EN 1993-1-5. Релативна виткост плоче у EN 1993-1-5 је дата као

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28.4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \left[\frac{N}{mm^2}\right]}} \quad k_\sigma - \text{коэф. избочавања} \quad (2.1.8)$$

Осим методе ефективне ширине EN 1993-1-5 за прорачун граничне носивости препоручује и метод редукованог напона. Овај метод је аналоган методу ефективне ширине, заснива се на редукацији напона течења f_y који је константан по ширини плоче и овом методом се могу прорачунавати и неукрућене и укрућене плоче.

2.2 НОСАЧИ ПОД ДЕЈСТВОМ ЛОКАЛНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Случај оптерећења када оптерећење на малој дужини, дјелује управно на појас I - носача а у равни ребра назива се *patch loading*. Употребљаван назив за ово оптерећење у нашем језику је локално (или локализовано) оптерећење.

Лимени I - носачи (слика 3) се састоје од појасева, ребра, ослоначких и подужних укрућења и чине сложен систем плоча. Анализа понашања овог система под дејством оптерећења се своди на решавање и анализу три основна аспекта понашања.

- одређивање напона у ребру
- одређивање еластичне критичне силе
- одређивање граничне носивости

Тачно одређивање напонског стања овог проблема представља веома комплексан задатак, тако да су се у досадашњим истраживањима углавном примјењивали различити приближни поступци.

Одређивање критичне силе аналитичким путем се своди на решавање диференцијалне једначине или се користе енергетске методе и за оба ова начина неопходно је познавање што тачнијег напонског стања. Међутим, како је то углавном веома комплексно, најчешће се приступа одређивању критичне силе примјеном нумеричких метода, коришћењем методе коначних елемената.

Ранија истраживања критичне силе су предузимана са циљем повезивања граничне носивости са граничном силом, међутим експериментална истраживања су показала да се не може успоставити директна веза између ове двије силе. Концепт прорачуна граничне носивости који је дат у савременим европским прописима предвиђа прорачун коришћењем параметра виткости (однос силе при пластификацији и еластичне критичне силе) тако да је прорачун критичне силе локално оптерећених носача поново актуелизован.

У наредним поглављима је дат кратак осврт на истраживања која су се бавила одређивањем критичне силе и на истраживања која су се бавила граничном носивошћу лимених носача оптерећених локалним оптерећењем.

2.2.1 ЕЛАСТИЧНА КРИТИЧНА СИЛА

Као што је већ поменуто, код носача оптерећених локалним оптерећењем, решење проблема еластичне критичне силе, постаје знатно компликованије, прије свега због променљивости напонског стања у плочи, без обзира да ли се користи диференцијална једначина или енергетске методе. У ранијим истраживањима се овом проблему прилазило као независном проблему стабилности плоча. Наиме, прво се одређивао распоред напона у ребру, а затим су се тако одређени напони користили у оквиру критеријума стабилности. Садејство појаса и ребра као и утицај крутости појаса на интензитет критичног оптерећења је мање истраживан.

Развојем рачунара и софтверских пакета у последње вријеме се рјешавању овог проблема најчешће приступа кроз нумеричке поступке на бази методе коначних елемената. На тај начин се добијају приближна решења за коефицијенте извијања уз употребу енергетских метода. Ова метода омогућава дефинисање утицаја појаса на интензитет критичног оптерећења јер се носач анализира као цјелина.

2.2.1.1 Извод из одабраних истраживања критичне силе

Општа формула за прорачун критичне силе је дата наредним изразом тако да се одређивање критичне силе своди на одређивања коефицијента избочавања (k_f).

$$F_{kr} = k_f \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \frac{t_w^3}{h_w} \quad (2.2.1)$$

Следећи аутори су се бавили критичном силом подужно неукрућених носача:

Girkman (1936) [46] је анализирао ребро I - носача и проучавао критично оптерећење (услед дејства локалног оптерећења на појас I - носача) користећи енергетску методу. С обзиром да је носач анализиран као цјелина, у овој анализи је узет у обзир утицај крутости оптерећеног појаса на распростирање оптерећења у ребро. Рјешење је дато у облику детерминанте коју је потребно ријешити за сваки посебан случај.

Zetlin (1955) [47] је ребро I - носача посматрао као изоловану плочу која је оптерећена локалним (равномјерно расподијељеним) оптерећењем по једној ивици. Бочна помјерања ребра су спријечена, а плоча је слободно ослоњена управно на своју раван. Примјењено локално оптерећење (у равни плоче) је уравнотежено параболично расподијељеним напонима смицања дуж наспрамних попречних страница. Користећи енергетску методу *Zetlin* је представио 9 вриједности коефицијента извијања k_F за различите односе распона и висине носача.

White и Cottingham (1962) [48] су користили диференцну методу (метод коначних разлика) у решавању диференцијалне једначине проблема стабилности. Разматрано је више комбинација оптерећења за плоче са различитим односом висине и ширине. Ивице плоче су слободно ослоњене или укљештене (управно на своју раван).

Rockey и Bagchi (1970) [49] су вршили поређење два различита модела ребра. Први модел је подразумијевао анализу изоловане плоче (ребра I - носача) који је одговарао моделу који је коришћен у анализама *Zetlin*-а. Разлика у односу на модел *Zetlin*-а је то што је претпостављено да су реакције на примјењено оптерећење на попречним ивицама носача дате као равномјерно расподијељени смичући напон и дозвољена је ротација попречних ивица. Други модел је представљао I - носач као цјелину (узет у обзир утицај крутости појаса на понашање носача). За анализу оба модела је коришћен метод коначних елемената. Упоредивањем резултата утврђено је да је појас има битан утицај на интензитет критичног оптерећења као и да се облици избочавања разликују.

Khan и сарадници (1977) [50] анализирају решење проблема изоловане плоче оптерећене локалним оптерећењем користећи модификовану енергетску методу. Разматрана су два случаја слободно ослоњене изоловане плоче.

Lagerqvist (1994) [9] користећи методу коначних елемената у детаљној нумеричкој анализи, анализира проблем одређивања критичне силе. Користећи два модела, модел изоловане плоче оптерећене локалним оптерећењем и модел који укључује појасеве I - носача, он спроводи детаљну параметарску анализу. Гранични услови у првом моделу су исти као у раду *Rockey* и *Bagchi*-а. Ограничавањем утицаја појаса на фиксну вриједност долази до једноставнијег израза коефицијента избочавања који је саставни дио стандарда EN 1993-1-5.

Mijuskovic и *Coric (2012)* [51] користећи енергетску методу, предлажу аналитички поступак за одређивање критичног оптерећења плоча различитих граничних услова.

Rogač и сарадници (2014) [52] анализирају утицај фланши на интензитет критичног оптерећења I - носача у параметарској нумеричкој анализи на бази методе коначних елемената.

За потребе европског прописа EN 1993-1-5 било је потребно дефинисати и начин одређивања критичне силе подужно укрућених носача. Допринос у анализи овог проблема су дали *Graciano (2002)* [11], *Davaine (2005)* [35], *Clarín (2007)* [53], *Kovesdi (2018)* [54], *Herrera и Chacon (2019)* [55].

2.2.2 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ

Средином прошлог вијека започета су обимна експериментална и теоријска истраживања проблема граничне силе код носача оптерећених локалним оптерећењем. Циљ ових истраживања је био дефинисање математичког израза који ће се користити у прорачуну граничног оптерећења. Бројна експериментална истраживања су указала на то да критична сила, код лимених носача оптерећених локалним оптерећењем, не може да се директно доведе у везу са граничним оптерећењем, односно да критична сила није мјеродавна за понашање носача, односно не карактерише понашање носача под овим оптерећењем. Након тог закључка престало је интересовање за одређивање критичне силе. С озирим на комплексност проблема постало је јасно да је веома тешко дефинисати једноставан математички модел који ће на најбољи начин узети у обзир утицај свих параметара на граничну носивост носача. Анализирајући резултате бројних експерименталних истраживања многи аутори су предлагали математичке моделе за одређивање граничне силе.

Све те моделе можемо разврстати у двије групе: емпиријски модели (модели у којима су аутори на основу искустава стечених у експерименталним истраживањима предлагали емпиријска изразе) и математички модели засновани на механизму лома (модели у којима се гранична носивост одређује аналитички на унапријед претпостављеном механизму који се састоји од усвојених пластичних зглобова у ребру и појасу). У следећим поглављима су представљени коначни изрази из одабраних истраживања.

2.2.2.1 Извод из одабраних истраживања граничне силе–носачи без подужних укрућења

Емпиријски модели

Granholm (1960) [26] је предложио прву емпиријску формулу за израчунавање граничног оптерећења:

$$F_R = 9 \cdot t_w^2 \quad (2.2.2)$$

Bergfelt (1971) [25] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 0.045 \cdot E \cdot t_w^2 \quad (2.2.3)$$

Herzog (1974) [56] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 10 \cdot t_w^2 \left[1 + \frac{5 I_f h_w}{4 I_w t_w} \left(1 + \frac{s_s}{h_w} \right)^2 \left(0.8 + \frac{b_f}{100 \cdot h_w} \right) \right] \quad (2.2.4)$$

Škaloud, Drdacky (1975) [57] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 0.55 \cdot t_w^2 \sqrt{E \cdot \sigma_w} \sqrt{\frac{t_f}{t_w}} \left(0.9 + 1.5 \frac{s_s}{h_w} \right) \quad (2.2.5)$$

Bergfelt (1976) [58] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 0.68 \cdot t_w^2 \sqrt{E \cdot \sigma_w} \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^{0.6} \quad (2.2.6)$$

Dubas, Gehri (1978) [59] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења :

$$F_R = 4 \cdot t_w^2 \cdot \sigma_w \cdot \sqrt{\frac{E \cdot t_f}{\sigma_w h_w}} \quad \text{за} \quad \frac{h_w}{t_w} < 60 \quad (2.2.7)$$

$$F_R = 0.5 \cdot t_w^2 \cdot \sigma_w \cdot \sqrt{\frac{E \cdot t_f}{\sigma_w h_w}} \quad \text{за} \quad \frac{h_w}{t_w} \geq 60 \quad (2.2.8)$$

Drdacky (1978) [60] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 19.54 \cdot t_w^2 \cdot \sigma_w \cdot \left(1 + 0.004 \cdot \frac{s_s}{t_w}\right) \cdot \left(\frac{I_f}{t_w^4}\right)^{0.1} \quad I_f = \frac{b_f t_f^3}{12} \quad (2.2.9)$$

Spinassas (1990) [61] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = 1.35 \cdot E^{0.3} \cdot \sigma_w^{0.7} \cdot t_w^{1.53} \cdot \left(\frac{b_f t_f^3}{12}\right)^{0.06} \cdot s_s^{0.23} \quad (2.2.10)$$

Алексић (2013) [28] - емпиријска формула за прорачун граничног оптерећења:

$$F_R = k \cdot \pi \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{\frac{E \sigma_w}{12}} \quad k = 1.3 \left[\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3 \left(\frac{b_f}{l_i}\right) \left(\frac{s}{a_1}\right) \right]^{\frac{1}{9}} \quad (2.2.11)$$

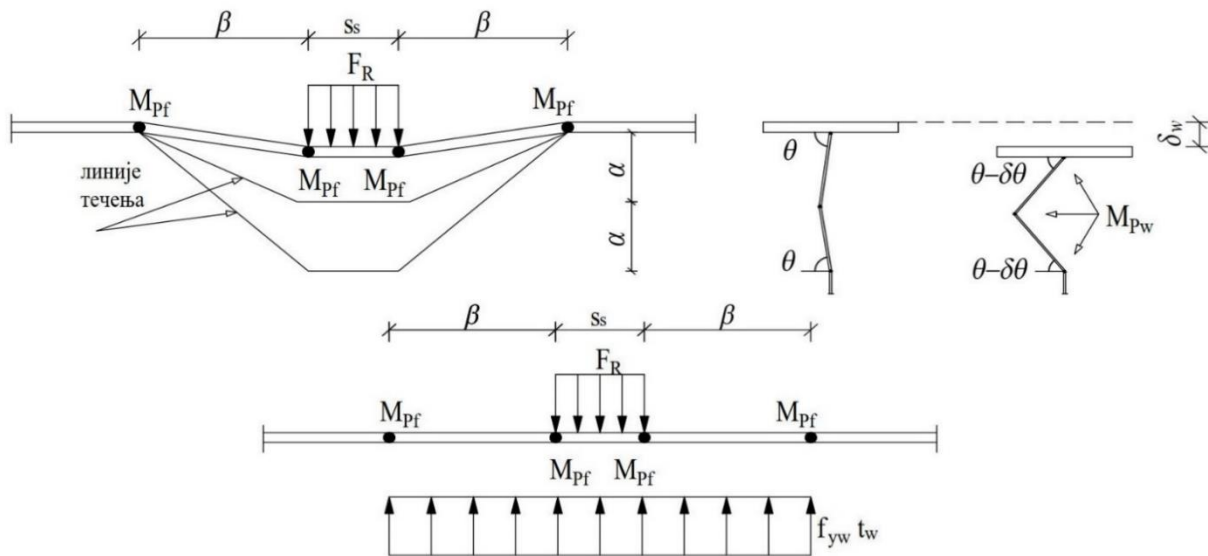
$$l_i = t_w \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{12 \sigma_w}}, \quad s = s_s + 2 \cdot t_f, \quad a_1 = \min \left\{ \frac{3 \cdot h_w}{a} \right\} \quad (2.2.12)$$

Из ових израза може се уочити утицај главних величина које утичу на граничну носивост разматраних носача, а то су t_w (t_w^2), E , σ_w , t_f (I_f), s_s , h_w .

Модели засновани на механизму лома

Модели засновани на механизму лома предвиђају унапријед претпостављен механизам са одређеним бројем линија течења у ребру и пластичних зглобова у оптерећеном појасу. Гранична сила се потом на таквом моделу одређује из услова да је рад спољашњих сила на малом виртуелном помјерању механизма једнак раду унутрашњих сила. Многи аутори су примењивали овакав приступ за одеђивање граничног оптерећења, а овдје ће бити поменути само неки од њих. Решења добијена овим путем често имају полуемпиријски карактер јер се један број параметара одређује на бази анализе експерименталних резултата.

Roberts и *Rockey* (1979) [62] су анализирали моделе лома као на слици 6.



Слика 6 Механизам лома са савијањем ребра – *Roberts, Rockey* [62]

Први модел подразумева савијање ребра:

$$F_{R1} = 0.5 \cdot t_w^2 \sqrt{\frac{E \cdot f_{yw} \cdot t_f}{t_w}} \left[1 + \frac{3 \cdot s_s}{h_w} \cdot \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \quad s_s \leq 0.2 \cdot h_w \quad (2.2.13)$$

У случају већих односа s_s / h_w претпоставка да ће појас остати раван између унутрашњих зглобова није реална тако да се уводи ограничење ове формуле, ограничењем тог односа. Додатно, *Roberts* и *Rockey* за носаче са дебљим ребрима су предложили алтернативни модел који подразумева течење ребра:

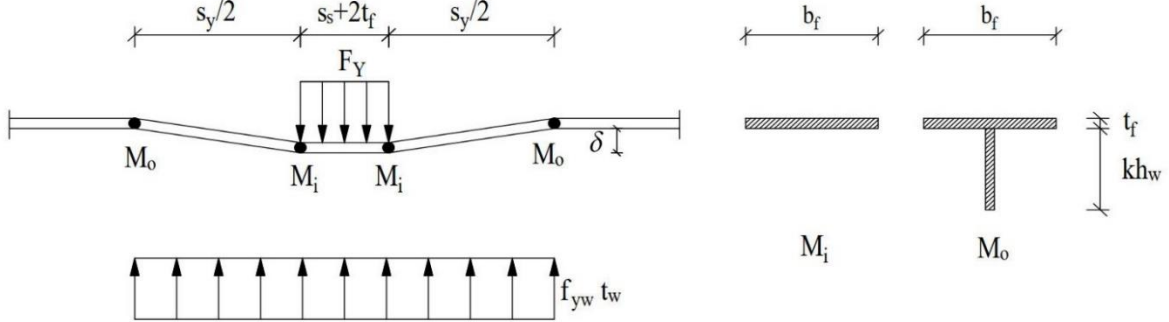
$$F_{R2} = 2 \sqrt{4 \cdot M_{pf} \cdot f_{yw} \cdot t_w + f_{yw} \cdot t_w \cdot s_s} \quad M_{pf} = f_{yf} \cdot \frac{b_f \cdot t_f^2}{4} \quad (2.2.14)$$

За граничну силу се усваја мања од сила срачунатих на ова два начина

$$F_R = \min \left\{ \begin{matrix} F_{R1} \\ F_{R2} \end{matrix} \right. \quad (2.2.15)$$

Bergfelt (1979) [3] је у свом раду разматрао трозглобни модел. Полази се од претпоставке да се појас услед дејства оптерећења на малој дужини понаша као греда на еластичној подлози. Са порастом оптерећења долази до формирања пластичног зглоба у појасу испод оптерећења, а напон у ребру достиже границу течења f_{yw} . Регион у ребру у којем је достигнут напон течења се повећава и до лома долази када се формирају два пластична зглоба симетрично у односу на зглоб испод оптерећења.

Johansson и Lagerqvist (1995) [63] су разматрали механизма лома који је модификована верзија Roberts-овог решења. Поступак прорачуна граничне силе се састоји из три дијела. На основу механичког модела, који је дат на слици 7, се најприје одређује сила при достизању напона течења F_y . Други дио представља одређивање критичне силе F_{cr} и он служи само за дефинисање параметра виткости λ . У трећем дијелу се одређује фактор редукције $\chi(\lambda)$ који повезује граничну носивост и силу при достизању напона течења.



Слика 7 Механички модел – Johansson, Lagerqvist [63]

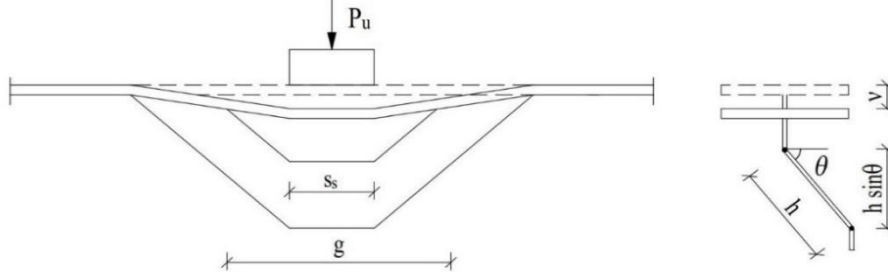
Носивост оваквог модела се повећава јер се узима у обзир утицај дијела ребра па се на тај начин формира фиктивни Т-пресјек.

$$F_R = F_y \cdot \chi(\lambda) \quad (2.2.16)$$

$$F_y = f_{yw} \cdot t_w \cdot \left(s_s + 2 \cdot t_f + 2 \cdot t_f \cdot \sqrt{\frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w} + k^2 \cdot \left(\frac{h_w}{t_w}\right)^2} \right) \quad (2.2.17)$$

Израз у загради представља ефективну дужину оптерећења l_y . Даљим истраживањима и поједностављивањима израза дошли су до коначне процедуре за одређивање граничне силе која се примјењује у важећем пропису EN 1993-1-5.

Lucic (1999) [16] граничну носивост одређује као збир сила P_{u1} и P_{u2} . Сила P_{u1} представља силу која је потребна да би се формирао механизам у ребру (слика 8), а сила P_{u2} силу која је потрошена на деформацију појаса.



Слика 8 Механизам лома – Лучић [16]

Усвајањем напонских расподјела по горњој и доњој линији течења и изједначавањем рада унутрашњих и спољашњих сила на виртуалном помјерању механизма израчунава се сила P_{u1} док се процјена силе P_{u2} врши помоћу еластичне теорије савијања греде.

$$P_u = P_{u1} + P_{u2} \quad (2.2.18)$$

$$P_{u1} = F_{p1} \cdot s_s + \frac{M_{p1} \cdot s_s}{h \cdot \cos\theta} + \frac{M_p \cdot (2 \cdot g - s_s)}{h \cdot \cos\theta} \quad P_{u2} = \frac{48 \cdot E_f \cdot I_f \cdot v}{l^3} \quad (2.2.19)$$

гдје су M_p – моменат пуне пластификације, M_{p1} – моменат пластификације и F_{p1} – сила пластификације који су дефинисани изразима, док се остале величине у формули одређују или анализом експерименталних резултата или дају емпиријским изразима.

2.2.2.2 Извод из одабраних истраживања граничне силе–носачи са подужним укрућењима

Корекциони фактори

У почетку истраживања локалног оптерећења (*patch loading*-а) већина истраживања је спровођена на подужно неукрућеним носачима. Анализом експерименталних података многи аутори су предлагали емпиријске или полуемпиријске изразе за одређивање граничне носивости.

Након 1990. године се почиње са значајнијим истраживањима носача са подужним укрућењима и примјећен је повољан утицај подужних укрућења на граничну носивост. Утицај је уведен у прорачун тако што је гранична носивост неукрућених носача множена са корекционим фактором који је узимао у обзир утицај подужног укрућења, а који одговара ефекту ојачања.

$$F_R^{stiff} = F_R^{unstif} f(s) \quad (2.2.20)$$

Bergfelt (1979) [3] даје израз за корекциони фактор који узима у обзир утицај подужног укрућења. Гранична носивост неукрућеног носача израчуната на основу механизма лома је

$$F_R^{unstif} = 0.8 \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{E \cdot f_{yw}} \cdot \sqrt{\frac{t_i}{t_w}} \cdot f(s_s, h_w, etc) \quad (2.2.21)$$

$$f(s) = 1 + \left(\frac{1}{3} - \frac{b_1}{h_w} \right) \cdot \sqrt{\frac{a_\eta}{3 \cdot b_1}} \quad (2.2.22)$$

a_η – растојање између спољашњих пластичних зглобова у оптерећеном појасу

Марковић и Хајдин (1992) [26] су предложили да се утицај подужног укрућења на граничну носивост укључи преко фактора корекције који је дат у следећем облику

$$f(s) = 1.28 - 0.7 \cdot \frac{b_1}{h_w} \quad 0.1 < \frac{b_1}{h_w} < 0.4 \quad (2.2.23)$$

гдје је h_w дебљина ребра а b_1 растојање подужног укрућења од оптерећеног појаса.

Предложени израз се користи као корекциони фактор изрази за одређивање граничног оптерећења који су дали *Roberts и Rockey (1979)* [62]

$$F_R^{unstif} = 0.5 \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot f_{yw} \cdot t_f}{t_w}} \left[1 + \frac{3 \cdot s_s}{h_w} \cdot \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \quad (2.2.24)$$

а предложен је на основу анализе постојећих експерименталних истраживања. Овај израз је укључен у процедуру пројектовања кроз стандард BS 5400-3 [64].

Kutmanova и Skaloud (1992) [65] анализирајући базу сопствених вишегодишњих експерименталних података коришћењем методе нелинеарне регресије дошли су до израза за корекциони фактор који на најбољи начин описује утицај подужног укрућења на граничну носивост

$$F_R^{unstif} = 12.6 \cdot t_w^2 \cdot f_{yw} \cdot \left[1 + 0.004 \cdot \left(\frac{s_s}{h_w} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{l_f}{t_w^4} \right) \sqrt{\frac{f_{yf}}{240}} \right]^{0.153} \quad (2.2.25)$$

$$f(s) = 0.958 - 0.09 \ln \left(\frac{b_1}{h_w} \right) \quad (2.2.26)$$

Graciano (2003) [34] полази од решења Johansson и Lagerqvist (1995) [63] за одређивање граничне носивости подужно неукрућених носача (које је укључено у важећи европски пропис EN 1993-1-5) и примјеном методе нелинеране регресије дефинише корекциони фактор на следећи начин

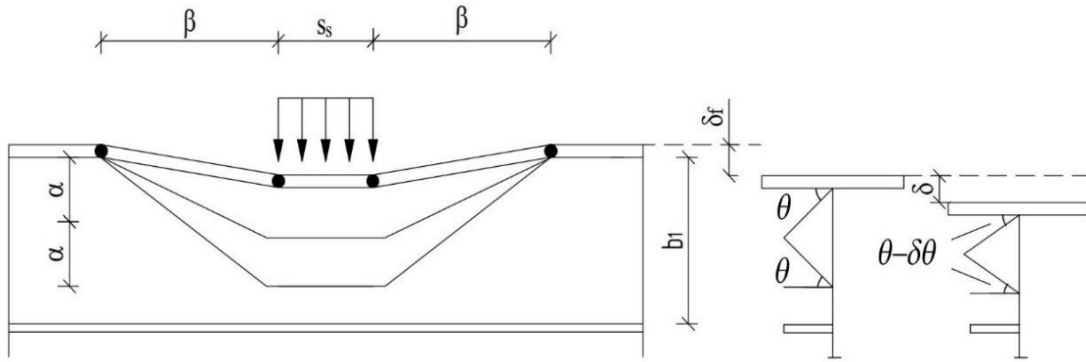
$$F_R^{unstif} = \chi_F \frac{l_y t_w f_{yw}}{\gamma_{M1}} \quad (2.2.27)$$

$$f(s) = 0.556 - 0.277 \cdot \ln \left(\frac{b_1}{h_w} \cdot \frac{f_{yf}}{f_{yw}} \cdot \frac{t_w}{t_f} \right) \quad (2.2.28)$$

Модели засновани на механизму лома

Модели за механизам лома подужно укрућених носача настали су модификацијом Roberts-овог модела лома. Неки од њих су приказани овдје.

Graciano (2002) [11] уз претпоставку формирања линија течења у горњем панелу ребра (дио панела између укрућења и оптерећеног појаса) као на слици 9 дефинише изразе за граничну носивост у зависности од положаја подужног укрућења.



Слика 9 Мехнизам лома – Graciano [11]

$$F_{rl} = 4 \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot f_{yw} \cdot t_f}{b_1}} + \frac{24 \cdot E \cdot I_f \cdot (c_e - \eta) \cdot M_w^2}{b_1 \cdot M_f^2} \quad \alpha = b_1/2 \leq 20 \cdot t_w \quad \text{за } b_1/t_w \leq 40 \quad (2.2.29)$$

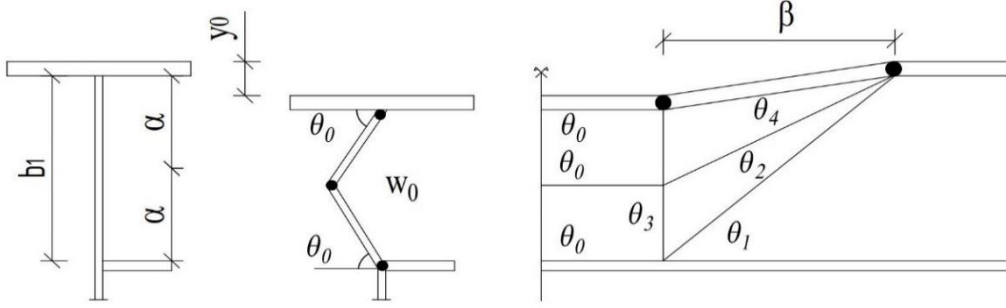
$$F_{rl} = F_{ro} = 2 \cdot f_{yw} \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot t_f}{\alpha \cdot f_{yf}}} + \frac{12 \cdot E \cdot I_f \cdot (c_e - \eta) \cdot M_w^2}{\alpha \cdot M_f^2} \quad \alpha = 20 t_w f_{yw} / f_{yf} \quad \text{за } b_1/t_w > 40 \quad (2.2.30)$$

$$M_f = \frac{f_{yf} \cdot b_f \cdot t_f^2}{4} \quad M_w = \frac{f_{yw} \cdot t_w^2}{4} \quad \beta = \left(\frac{M_f \cdot \alpha \cdot \cos\theta}{M_w} \right)^{1/2} \quad (2.2.31)$$

$$\eta = \frac{(4 \cdot \beta + 2 \cdot c_e) \cdot M_w}{2 \cdot M_w + f_{yw} t_w \alpha \cos\theta} \quad (2.2.32)$$

$$c_e = s_s + 2 \cdot t_f \quad - \quad \text{ефективна дужина оптерећења} \quad (2.2.33)$$

Davaine (2005) [35] такође разматра модификовани модел Roberts-a који је представљен на слици 10



Слика 10 Мехнизам лома – Davaine [35]

$$F_{Rk} = F_{b,Rk} = \frac{4M_{yf}}{\beta} + \frac{m_{yw}}{2w_0} \left[2\beta + 4s_s + 3 \frac{2\beta^2 + b_1^2}{\beta} - \eta \right] \quad \text{за} \quad \eta \leq 2\beta + s_s \quad (2.2.34)$$

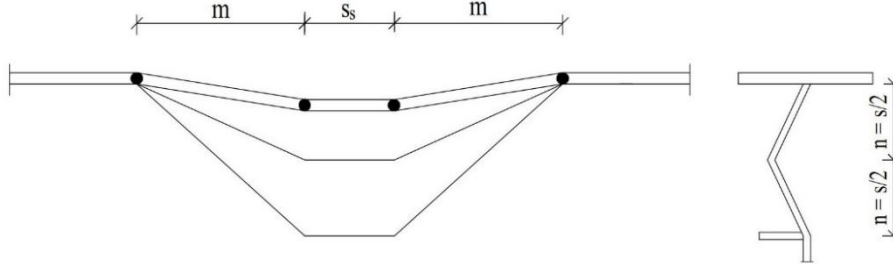
$$F_{Rk} = F_y = f_{yw} t_w \left[s_s + 2t_f \left(1 + \sqrt{\frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w}} \right) \right] \quad \text{за} \quad \eta > 2\beta + s_s \quad (2.2.35)$$

$$M_f = \frac{f_{yf} \cdot b_f \cdot t_f^2}{4} \quad m_{yw} = \frac{f_{yw} \cdot t_w^2}{4} \quad \beta = \sqrt{\frac{3b_1^2}{8} + \frac{M_{yf}}{m_{yw}}} w_0 \leq \frac{a - s_s}{2} \quad (2.2.36)$$

$$\eta = \frac{1}{t_w f_{yw} + \frac{m_{yw}}{2w_0}} \left[\frac{4M_{yf}}{\beta} + \frac{m_{yw}}{2w_0} \left(2\beta + 4s_s + 3 \frac{2\beta^2 + b_1^2}{\beta} \right) \right] \quad (2.2.37)$$

Овај поступак разматра могућност формирања механизма лома како у горњем, тако и у доњем делу панела ребра и знатно је сложенији од решења других аутора и поред одређених упрошћења.

Марковић, Хајдин (2012) [27] слика 11



Слика 11 Мехнизам лома – Хајдин, Марковић [27]

$$P_p = \frac{4 \cdot M_f}{m} + (m + 2 \cdot m_1 + m_2) \cdot \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} + 2 \cdot s_s \cdot \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} - 2 \cdot \eta \frac{M_w}{n \cdot \cos \theta} \quad (2.2.38)$$

$$M_w = \frac{\sigma_w \cdot t_w^2}{4} \quad M_f = \frac{\sigma_f \cdot b_f \cdot t_f^2}{4} \quad m_1 = \sqrt{m^2 + n^2} \quad m_2 = \sqrt{m^2 + 4 \cdot n^2} \quad (2.2.39)$$

$$\eta = \frac{m + 2 \cdot m_1 + m_2 + 2 \cdot s_s}{2 + \frac{\sigma_w \cdot t_w \cdot n \cdot \cos \theta}{M_w}} \quad (2.2.40)$$

Овај модел такође представља модификацију Roberts-овог модела, са главном претпоставком да је средња линија течења на половини између оптерећеног појаса и подужног укружења. За косе линија течења се узима њихова стварна дужина m_1 и m_2 .

2.3 УТИЦАЈ ДУЖИНЕ ЛОКАЛНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Иако су многи параметри интензивно проучавани, утицај дужине оптерећења на граничну носивост (у комбинацији са другим геометријским параметрима као што су дебелина ребра, дебелина појаса, однос дужине и висине оптерећеног панела ребра, почетне имперфекције) није довољно проучаван у прошлости.

Детаљан преглед дотадашњих експерименталних истраживања подужно неукрућених носача код којих је анализиран и утицај дужине оптерећења дао је *Марковић (2003)* [18].

Анализирањем експерименталних и нумеричких резултата аутори су предлагали емпиријске изразе за прорачун граничне носивости кроз моделе понашања-механизме лома (неки од њих су описани у поглављима 2.2.2.1 и 2.2.2.2) или предлагањем корекционих фактора који обухватају утицај дужине оптерећења $f(s_s)$ за носаче без подужних укрућења.

Нека од истраживања носача без подужних укрућења су наведена испод.

Bergfelt (1976) [58] је на основу анализе појаса носача као греде на еластичној подлози дао израз који обухвата утицај дужине оптерећења

$$f(s_s) = \frac{\frac{s_s}{2L}}{1 - e^{-\frac{s_s}{2L}} \cdot \cos\left(\frac{s_s}{2L}\right)} \quad (2.3.1)$$

$$L = \sqrt[4]{4 \cdot I_f \cdot \frac{h_w}{t_w}} \approx 6.7 \cdot t_f \quad (2.3.2)$$

Bergfelt (1979) [3] анализом експерименталних резултата, умјесто овог израза предлаже нови корекциони фактор на следећи начин

$$f(s_s) = 1 + 40 \cdot \frac{s_s}{a} \cdot \frac{t_w}{h_w} \leq 1.4 \quad (2.3.3)$$

гдје је a - положај крајњих пластичних зглобова

Luo i Edlund (1994) [66] након спроведене нумеричке анализе носача трапезастог облика ребра предлажу корекциони фактор

$$F_{s_s} = F_{s_s=0} \left(1 + \frac{1}{240} \cdot s_s\right) \quad s_s - \text{узето у } mm \quad (2.3.4)$$

Drdacky (1982) [60] је утицај дужине оптерећења укључио у израз за прорачун граничне носивости на следећи начин

$$P_u = A \cdot \sigma_{yw} \cdot d^2 \cdot \left(1 + 0.004 \cdot \frac{s_s}{h_w}\right) \cdot \left(\frac{I_{fb}}{h_w^4}\right)^B \quad (2.3.5)$$

Marković (2003) [18] анализом експерименталних резултата предлаже израз којим се узима у обзир утицај дужине оптерећења као

$$F_{s_s} = F_{s_s=0} \cdot \left(1 + 0.012 \cdot \frac{s_s}{t_w}\right) \quad (2.3.6)$$

У овом раду је дат и предлог за утицај дужине оптерећења код носача са подужним укрућењима. То је био први израз који је узимао у обзир утицај овог параметра на граничну носивост носача са подужним укрућењима.

$$F_{s_s} = F_{s_s=0} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{s_s}{t_w}\right) \quad (2.3.7)$$

$k=0.008$ за носаче са укрућењима и $s_s < 75 \text{ mm}$

$k=0.014$ за носаче са укрућењима и $s_s > 75 \text{ mm}$

У почетку истраживања феномена локалног оптерећења (*patch loading-a*), утицај дужине оптерећења код носача са подужним укрућењима није истраживан систематски. У појединим експерименталним и нумеричким радовима, разматран је утицај овог параметра на граничну носивост али се прегледом литературе може закључити да су истраживања која се бавила тим утицајем ријетка.

Преглед експерименталних истраживања подужно укрућених носача услед дејства локалног оптерећења дат је у табели 1.

Табела 1 Експериментална истраживања подужно укрућених носача услед дејства локалног оптерећења

Експериментално истраживање	Година	Број тестова	s_s / a	s_s / h_w	s_s^* [mm]
Rockey et al. [72]	1978	4	0.05	0.05	40
Bergfelt [3,73]	1979&1983	15	0.01-0.11	0.05-0.16	40 (13), 120 (2)
Roberts & Markovic [74-75]	1981	2	0.1	0.1	50
Oxford [76]	1983	1	0.05	0.08	100
Shimizu et al. [77]	1987	1	0.5	0.3	300
Galea et al. [78]	1987	2	0.39	0.54	690
Janus et al. [79]	1988	101	0.1	0.1-0.2	50 (71), 62 (18), 100 (12)
Dubas & Tschamper [80]	1990	16	0.02-0.14	0.04-0.24	40 (8), 240 (8)
Dogaki et al. [81]	1991	2	0.1	0.1	90
Salkar [82]	1992	2	0.2	0.2	127
Carretero & Lebet [83]	1998	6	0.19-0.25	0.38-0.5	200 (2), 300 (4)
Walbridge & Lebet [84]	2001	5	0.2	0.29	200
Markovic & Kovacevic [29]	2003	8	0-0.3	0-0.3	0, 25, 50, 75, 100, 125, 150 (2)
Kuhlmann & Seitz [85]	2004	2	0.58	0.30	700
Kovacevic & Markovic[31] ^a	2020	7	0-0.25	0-0.5	0, 50, 100, 150 (2), 200, 250

* У колони s_s је дата дужина оптерећења а у загради број тестова у којима је она примијењена.

Из ове табеле се може закључити да у експерименталним истраживањима која су проучавала понашање подужно укрућених носача, утицај дужине оптерећења није системски испитиван. У тим истраживањима дужина оптерећења је разматрана, обично у склопу анализе других параметара и није постојао довољан број варијација овог параметра који би служио за дефиницију општијих закључака. *Марковић* [18, 29] је започео истраживања, која су потом настављена у експерименталним истраживањима [31] и то су прва систематска истраживања утицаја дужине оптерећења на граничну носивост подужно укрућених носача.

Анализом доступне литературе је такође утврђено да и нумеричка истраживања утицаја дужине оптерећења код носача са подужним укрућењима нису тако честа. Овдје је дат кратак преглед истраживања у којима је мијењана дужина оптерећења.

Davaine (2005) [35] је нумеричком анализом разматрала носаче са већом висином ребра (2-5 m). Спроведена је опширна параметарска анализа на 366 модела у којој је вариран већи број параметара. У комбинацији са различитим положајем подужног укрућења мијењана је и дужина наношења оптерећења.

Maiorana (2009) [76] је у циљу упоређивања резултата, као додатак у свом раду који се прије свега односио на нумеричку анализу неукрућених носача, анализирао и утицај дужине оптерећења на подужно укрућеним носачима без отвора.

Loaiza, Graciano и Chacon (2016, 2017) [77,78] су у опширној нумеричкој анализи такође анализирали утицај релативне крутости и положаја подужних укрућења на критично оптерећење носача са више подужних укрућења. У параметерској анализи је варирано више параметара међу којим и дужина наношења оптерећења.

Mezghanni (2013) [88] је такође нумерички анализирао утицај различитих параметара на критично оптерећење. У параметарској анализи носача оптерећених локалним оптерећењем анализиран је и утицај дужине оптерећења.

Loaiza, Graciano и Casanova (2018) [38], [40] су истраживали подужно неукрућене и укрућене носаче. Формиран је нумерички модел и спроведена параметарска анализа са циљем истраживања утицаја појединих параметара и њихових односа на граничну носивост. Иако су носачи који су коришћени у тој анализи били већих димензија, односи појединих параметара су били слични као у анализи која је спроведена у овом истраживању. Та анализа је из тог разлога узета као компаративна референца за истраживање дато у овој дисертацији.

Ковачевић и Марковић (2019,2020) [30], [32] су након експерименталних анализа [29, 31] приступили нумеричкој анализи подужно неукрућених и укрућених носача. Након верификације модела, поређењем са експерименталним резултатима, урађена је опсежна параметарска анализа у којој је анализан утицај различитих дужина оптерећења на граничну носивост подужно неукрућених и укрућених носача уз варирање осталих параметара. Ове радове аутор је користио као полазну тачку у својим истраживањима. Ова истраживања су детаљније објашњена у поглављу 3.1.

На основу овог прегледа може се утврдити да су систематска истраживања ове проблематике вршена само у Србији (експериментална и нумеричка истраживања Н. Марковића и С. Ковачевића [29-32]), а у Колумбији само делимично, где то није био главни предмет истраживања (нумеричка истраживања [38] и [40]). Управо та истраживања су коришћена за контролу добијених резултата који су добијени у нумеричкој анализи представљеној у овој дисертацији. Резултати тих референтних истраживања су коришћени и за верификацију предложеног израза за прорачун граничне носивости подужно укрућених носача (поглавље 4).

2.4 EN 1993-1-5 : EUROCODE 3 : Прорачун челичних конструкција – пуни лимени елементи

Важећи европски стандард користи фактор редукције за локално избочавање χ_F да би се одредила рачунска носивост. Модел за одређивање граничне носивости који је имплементиран у важећи европски стандард EN 1993-1-5 [1] дефинише носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача као

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \quad L_{eff} = \chi_F \cdot l_y \quad (2.4.1)$$

$$\Rightarrow F_{Rd} = \chi_F \frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{\gamma_{M1}} \quad (2.4.2)$$

γ_{M1} - парцијални фактор

l_y - ефективна дужина оптерећења дефинисана као

χ_F - фактор редукције ефективне дужине услијед локалног избочавања

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad (2.4.3)$$

$$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_f}{f_{yw} \cdot t_w}, \quad \begin{cases} m_2 = 0.02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 & \text{за } \bar{\lambda}_F > 0 \\ m_2 = 0 & \text{за } \bar{\lambda}_F \leq 0 \end{cases} \quad (2.4.4)$$

$$\chi_F = \frac{0.5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1 \quad \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (2.4.5)$$

s_s - је дужина оптерећења, a - ширина ребра, b_f - ширина оптерећеног појаса

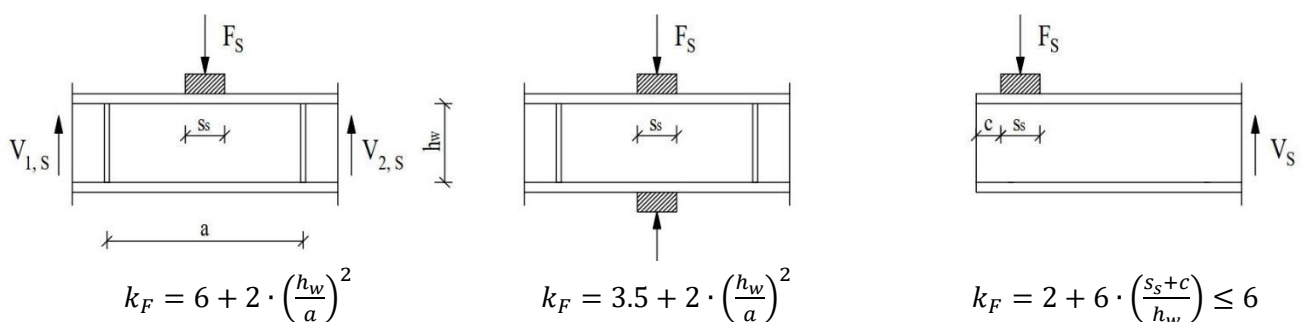
Критично оптерећење подужно неукрућених носача се израчунава на основу израза (2.4.6), користећи коефицијент избочавања који је дефинисан за различите случајеве оптерећења (слика 12), док се критично оптерећење подужно укрућених носача израчунава на основу израза (2.4.7)

$$F_{cr}^{unstiff} = 0.9 \cdot k_F^{unstiff} \cdot E \frac{t_w^3}{h_w}; \quad k_F^{unstiff} = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \quad (2.4.6)$$

$$F_{cr}^{stiff} = 0.9 \cdot k_F^{stiff} \cdot E \frac{t_w^3}{h_w}; \quad k_F^{stiff} = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(5.44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0.21\right) \cdot \sqrt{\gamma_s} \quad (2.4.7)$$

E - Young-ов модул еластичности

γ_s - релативна крутост на савијање подужних укрућења

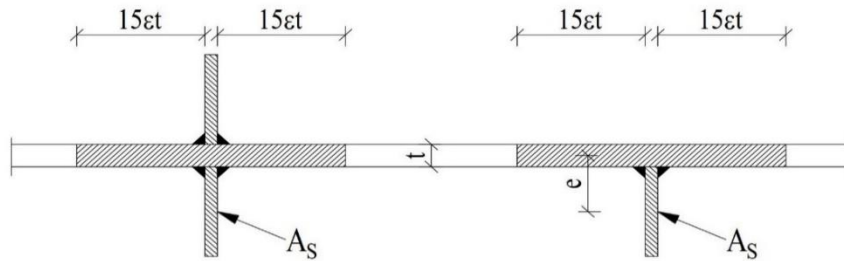


Слика 12 Коефицијенти избочавања за различите случајеве оптерећења (EN 1993-1-5)[1]

У Еврокоду EN 1993-1-5 је дат израз за релативну крутост на савијање подужних укрућења:

$$\gamma_s = 10.9 \cdot \frac{I_{sl}}{h_w \cdot t_w^3} \leq \gamma^* ; \quad \gamma^* = 13 \cdot \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \cdot \left(0.3 - \frac{b_1}{a}\right) \quad (2.4.8)$$

I_{sl} - момент инерције укрућења укључујући и садејствујући дио ребра (слика 13).



Слика 13 Ефективни попречни пресјек укрућења (EN 1993-1-5)[1]

Критично оптерећење подужно укрућених носача може се приказати као

$$F_{cr}^{stiff} = F_{cr}^{unstiff} + \Delta F_{cr} \quad (2.4.9)$$

$$\Delta F_{cr} = 0.9 \cdot k'_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \quad k'_F = \left(5.44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0.21\right) \cdot \sqrt{\gamma_s} \quad (2.4.10)$$

Из дефиниција за гранично оптерећење подужно неукрућеног и подужно укрућеног носача можемо дефинисати ефекат ојачања на следећи начин :

$$\beta = \frac{F_{Rd}^{stiff}}{F_{Rd}^{unstiff}} = \frac{\chi_F^{stiff}}{\chi_F^{unstiff}} = \sqrt{F_{cr}^{stiff} / F_{cr}^{unstiff}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta F_{cr}}{F_{cr}^{unstiff}}} = \sqrt{1 + \frac{k'_F}{k_F^{unstiff}}} \quad (2.4.11)$$

Може се примијетити да ефективна дужина оптерећења l_y и остали параметри као што су s_s , t_w , t_f нису укључени у овај израз што значи да на основу EN 1993-1-5 :

- Ефекат ојачања β не зависи од дужине оптерећења
- Дебљина ребра нема утицај на ефекат ојачања β ако је $\gamma_s > \gamma^*$
- Дебљина оптерећеног појаса нема утицаја на ефекат ојачања β
- Ефекат ојачања је ограничен граничном вриједношћу релативне крутости укрућења γ^*

У новом предлогу Еврокода који је у процесу усвајања унијете су неке промјене као: дат је сложенији израз за χ_F , изостављен је члан m_2 . Ове промјене су донијеле извјесна побољшања, али не мијењају изнад наведене коментаре.

2.5 ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ

Данас је потпуно јасно да гранична носивост локално оптерећених лимених носача зависи од утицаја више параметара као што су: утицај основних димензија носача, карактеристике материјала, утицај дужине и висине оптерећеног панела ребра, утицај вертикалних укрућења ребара, утицај хоризонталних укрућења ребара, утицај дужине наношења оптерећења, утицај почетних имперфекција, положај оптерећења на носачу, утицај ексцентрицитета оптерећења у односу на раван ребра и сл.

На основу бројних експерименталних истраживања утврђено је да дебљина и материјалне карактеристике ребра имају најзначајнији утицај на граничну носивост и може се рећи да је гранична носивост носача пропорционална квадрату дебљине ребра носача. Општа функција за одређивање граничне носивости може се представити на следећи начин:

$$F_R = t_w^2 \cdot \sqrt{E \cdot f_{yw} \cdot f(s_s, t_f, b_f, f_{yf}, t_w, h_w, f_{yw}, \alpha, b_1, b_s, h_s)} \quad (2.5.1)$$

Прегледом литературе и анализом досадашњих експерименталних и нумеричких резултата може се закључити да се мали број истраживања бавио утицајем дужине наношења оптерећења. Остали параметри који имају утицај на граничну носивост су детаљније анализирани и варирану у бројним студијама док је дужина наношења оптерећења била константна или варирана у веома малом опсегу.

Већи број свих досадашњих истраживања односи се на носаче без подужних оптерећења и њихово понашање је у великој мери довољно истражено. С обзиром на још већу комплексност понашања подужно укрућених носача у односу на носаче без подужних укрућења, због већег броја параметара и њихове међусобне повезаности истраживања подужно укрућених носача нису дала сва потребна објашњења.

Посебно утицај дужине наношења оптерећења код подужно укрућених носача као и утицај карактеристика подужних укрућења је још увек недовољно истражен.

Важећи европски стандард EN 1993-1-5 (2006) [1] дефинише полуемиријски модел за прорачун граничне носивости, који не обухвата утицај свих параметара који утичу на граничну носивост.

Јасно је да је, у циљу што прецизнијег објашњења понашања носача и што прецизнијег одређивања граничне носивости, неопходно истовремено узети у обзир утицај већег броја параметара.

Неопходно је разматрање утицаја дужине локалног оптерећења при варирању одређених параметара (однос дужине и висине оптерећеног панела ребра, дебљина појаса, дебљина ребра, карактеристике подужних укрућења) у распону вредности које одговарају уобичајеним употребама у различитим грађевинским конструкцијама. Међутим, код савремених технологија изградње мостова, ради се о веома великим попречним пресецима који су оптерећени овом врстом оптерећења. Експериментална истраживања у тим случајевма, из практичних разлога, нису актуелна. Нумеричке симулације се тако, израдом модела у софтверима базираним на методи коначних елемената, уз параметарске анализе намећу као најбољи начин рјешавања овог проблема. У радовима Loaiza, Graciano, Casanova [38] и Davaine [35] су тако анализирани носачи већих димензија попречног пресека.

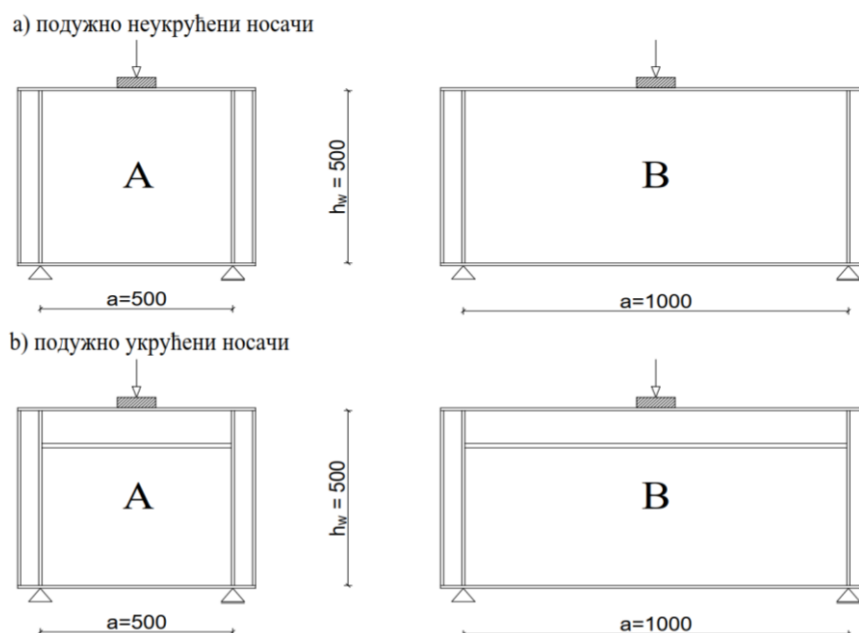
Један од мотива нумеричке анализе у оквиру ове дисертације је да се, варирањем више параметара, допуни база података о понашању лимених носача под дејством локалног оптерећења и да се на што бољи начин покуша обухватити утицај дужине оптерећења.

ПОГЛАВЉЕ 3**СОПСТВЕНА НУМЕРИЧКА ИСТРАЖИВАЊА****3.1 УВОД**

Истраживања проблематике понашања подужно неукрућених и укрућених лимених носача (заварених челичних I - носача) оптерећених локалним попречним оптерећењем (расподијељеним оптерећењем на одређеној дужини) на једном појасу у равни ребра носача која се обављају на Грађевинском факултету у Београду почела су 1970-их година под вођством академика Николе Хајдина, у оквиру међународне сарадње са Универзитетом у Кардифу и Академијом наука у Прагу. Истраживање приказано у овој дисертацији представља наставак експерименталних и нумеричких истраживања Н. Марковића и С. Ковачевића приказаних у радовима [18,21,29-32] гдје је главни предмет био утицај дужине локалног (концентрисаног или расподијељеног на малој дужини) оптерећења на граничну носивост челичних I – носача, подужно неукрућених или укрућених равним укрућењима. Експериментални дио истраживања приказан у радовима [18,21,29,31] је инициран као проширење обимних истраживања започетих у Прагу [6], која су се бавила проблемом локалног оптерећења и у којима је разматран утицај великог броја параметара. У тим истраживањима [6] није било тежиште на разматрању дужине локалног оптерећења, па је она била углавном константна. Димензије експериментално испитиваних носача у истраживањима у Београду [29,31] су одабране као репрезентативне из истраживања у Прагу, а у консултацији са проф. М. Шкалоудом који је водио та истраживања.

За утицај дужине оптерећења код подужно неукрућених носача углавном је познато да се мења линеарно са дужином оптерећења, али не постоји опште прихваћено јединствено решење. За подужно укрућене носаче до данас, сем истраживања приказаних овдје, нема других систематских истраживања дужине локалног оптерећења.

Та експериментална истраживања која су спровели Н. Марковић и С. Ковачевић [29,31], заједно садрже 28 тестова, подужно неукрућених и подужно укрућених носача. Разматрани су носачи висине 500 mm, распона 500 mm (серија А) и 1000 mm (серија В), односно однос дужине и висине оптерећеног панела ребра је био $\alpha = a / h_w = 1$ и $\alpha = a / h_w = 2$. У тестовима је варирана дужина нашоња оптерећења, док су остали параметри били константни за сваки од разматраних распона (слика 14).



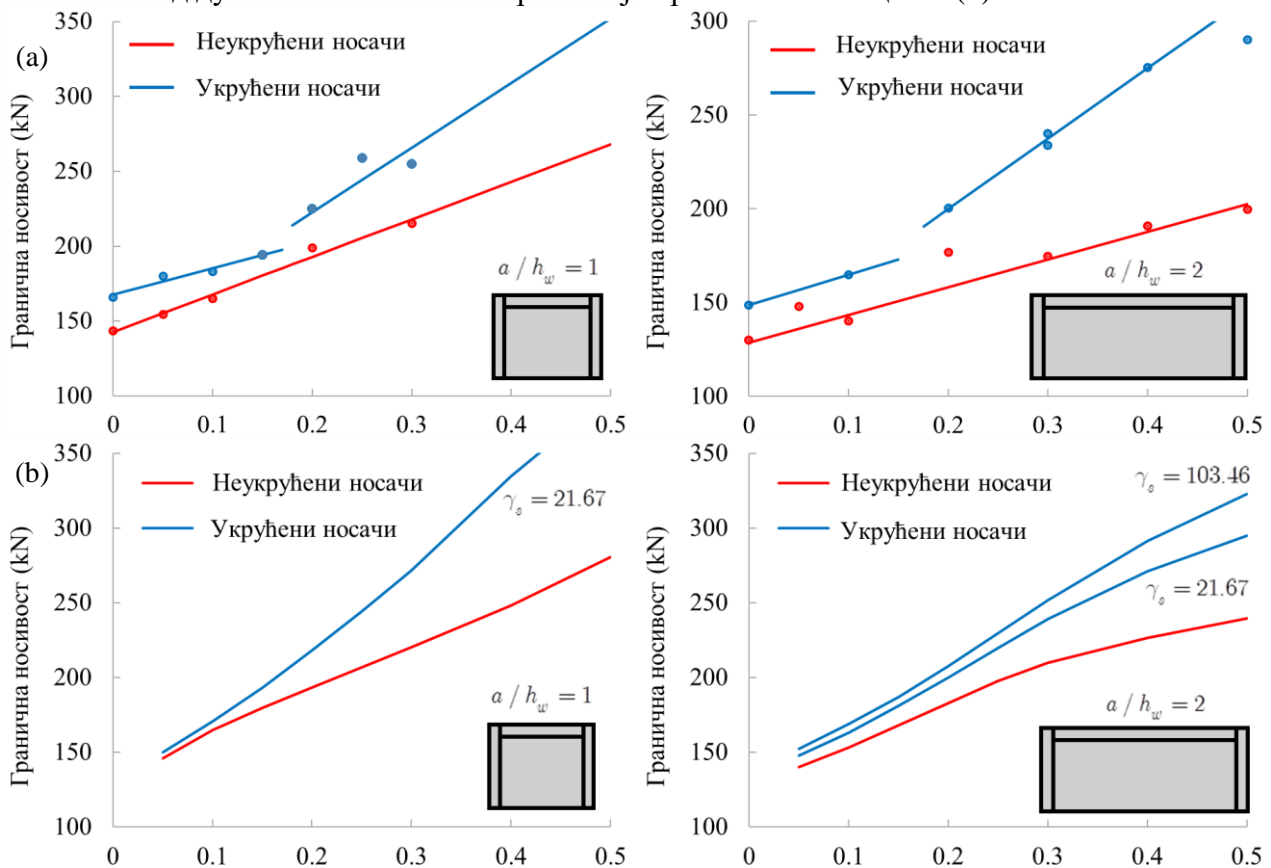
Слика 14 Носачи у експерименталним истраживањима [29] (носачи серије А), [31] (носачи серије В)

Разматрани I - носач слободно ослоњен испод вертикалних укрућења представља један панел ребра између вертикалних укрућења неког могућег реалног носача оптерећеног локалним оптерећењем у том панелу. Ово је уобичајени приступ у оваквим истраживањима у свијету да би се искључили глобални утицаји (прије свега момент и трансверзалне силе од других оптерећења), а разматрали само основни утицаји од локалног оптерећења. Могући утицаји од заједничког дејства локалног оптерећења и момената и трансверзалних сила од других оптерећења се истражују различитим додатним истраживањима. Овакав прилаз је неопходан због сложености самог проблема.

Резултати експеримената су показали да се добија мали ефекат ојачања β (однос граничне носивости подужно укрућеног и подужно неукрућеног носача) за мале дужине оптерећења односно већи ефекат ојачања за веће дужине оптерећења.

Као што се може видјети на слици 15 (а) (преузето из [29], [31]) за однос $s_s / h_w > 0.15$ ефекат ојачања почиње значајно да расте са повећањем дужине оптерећења. Ова зависност ефекта ојачања у односу на дужину оптерећења је потврђена и нумеричком анализом која је спроведена након експерименталних истраживања.

Експериментална истраживања су послужила као основ за формирање нумеричког модела и спровођење нумеричке анализе [30,32]. У формираним нумеричким моделима осим утицаја дужине оптерећења испитиван је и утицај почетних имперфекција на граничну носивост неукрућених и укрућених носача. Репрезентативан график граничне носивости у зависности од дужине оптерећења је приказан на слици 15 (b).



Слика 15 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених носача, (а) експериментални резултати [29],[31], (b) нумерички резултати [30],[32]

Може се закључити да и у случају нумерички анализираних носача (слика 15 (b)) код одређеног односа s_s / h_w долази до значајног повећења ефекта ојачања са повећењем дужине оптерећења. У овим нумеричким истраживањима је утврђено да наведени закључци важе и при различитим почетним имперфекцијама

У наведеним експерименталним истраживањима су коришћене следеће константне димензије носача: $t_w = 4 \text{ mm}$, $t_f = 8 \text{ mm}$, $b_f = 120 \text{ mm}$ и $h_w = 500 \text{ mm}$, вертикална укрућења су истих димензија као појасеви. Дужина панела ребра је: $a = 500 \text{ mm}$ у [29], односно $a = 1000 \text{ mm}$ у [31]. У оба експеримента је коришћено за случај подужно укрућених носача подужно равно укрућење, димензија $b_s = 30 \text{ mm}$, $t_s = 8 \text{ mm}$, које се налазило на удаљености од једне петине висине носача ($b_l = 0.2 h_w$) од оптерећеног појаса. У нумеричким истраживањима је, додатно још, разматрано алтернативно подужно укрућење других димензија. Као резултат претходног и карактеристични односи параметара су били константни: $h_w / t_w = 125$, $t_f / t_w = 2$, $t_s / t_w = 2$ и $b_l / h_w = 0.2$, осим $\alpha = a / h_w$ које је за серију А било $\alpha = 1$, а за серију В $\alpha = 2$. Дужине локалног оптерећења су вариране, односно вариран је параметар s_s / h_w .

Како до данас у свету нема одговарајућих истраживања у проблематици разматраној у овом раду, а с обзиром на ограниченост параметара у радовима [18,21,29-32] и у циљу генерализације закључака о утицају дужине оптерећења на граничну носивост утврђено је да је нумеричку анализу неопходно проширити на такав начин да се обухвате различите вриједности карактеристичних односа (a / h_w , h_w / t_w , t_f / t_w , t_s / t_w).

Циљ ове дисертације је да нумерички анализира утицај дужине локалног оптерећења код подужно неукрућених и укрућених носача са истовременим варирањем осталих геометријских карактеристика носача (дебљина ребра, дебљина појаса, однос дужине и висине оптерећеног панела, димензије подужног укрућења) кроз параметарску анализу. Осим тога, циљ је и одређивање максималног ефекта ојачања примјеном подужних укрућења. Постављени циљеви су дефинисали избор параметара који ће се варирати у параметарској анализи. Одлучено је да претходна верификована нумеричка истраживања приказана у [30,32] буду основа ових истраживања. С обзиром на ограниченост параметара у приказаним претходним истраживањима, утврђено је да је нумеричку анализу неопходно проширити на довољно репрезентативан начин. Због утицаја великог броја параметара и, као последица тога, могућег сувише великог броја нумеричких симулација задржан је положај укрућења (који је и репрезентативан, као положај који се примењује у случају савијања), из претходних истраживања, као и висина носача и ширина појаса.

Одлучено је да се избором димензија у параметарској анализи обухвате по три вриједности карактеристичних односа (a / h_w , h_w / t_w , t_f / t_w , t_s / t_w) и то две граничне (доња и горња) и приближно средња између њих, одређених на основу анализе вредности које се користе у експерименталним и нумеричким истраживањима. Параметар s_s / h_w чији се утицај истражује је такође вариран (видети 3.3).

Нумерички модел у параметарској анализи је заснован на моделу коришћеном у [30,32], прилагођен потребама параметарске анализе и приказан је у наредном поглављу 3.2.

Извршена су прелиминарна истраживања са циљем одређивања начина избора димензија подужних укрућења која ће се разматрати. Извршено је у тој фази укупно 414 симулација (које неће бити приказане у овом истраживању), а које су довеле до начина избора укрућења описаног у дијелу 3.3.1.

Укупни број симулација (модела) у овом истраживању износи 414 (у прелиминарном истраживању), 524 (објашњено у дијелу 3.3.1) и 648 (у главном дијелу истраживања који је потпуно и детаљно приказан у овој дисертацији), односно укупно 1586 симулација.

Утицај параметара (a / h_w , h_w / t_w , t_f / t_w , t_s / t_w) у комбинацији са утицајем дужине оптерећења (параметар s_s / h_w) анализиран је у параметарској анализи која је дата у поглављу 3.3. На основу резултата ове параметарске анализе дефинисан је у поглављу 4. израз за прорачун граничне носивости који узима у обзир утицај тих параметара. Методом статистичке анализе израз је верификован, не само за резултате ове параметарске анализе, већ и за експерименталне резултате истраживања [29], [31] као и за резултате нумеричке анализе [38].

3.2 НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ

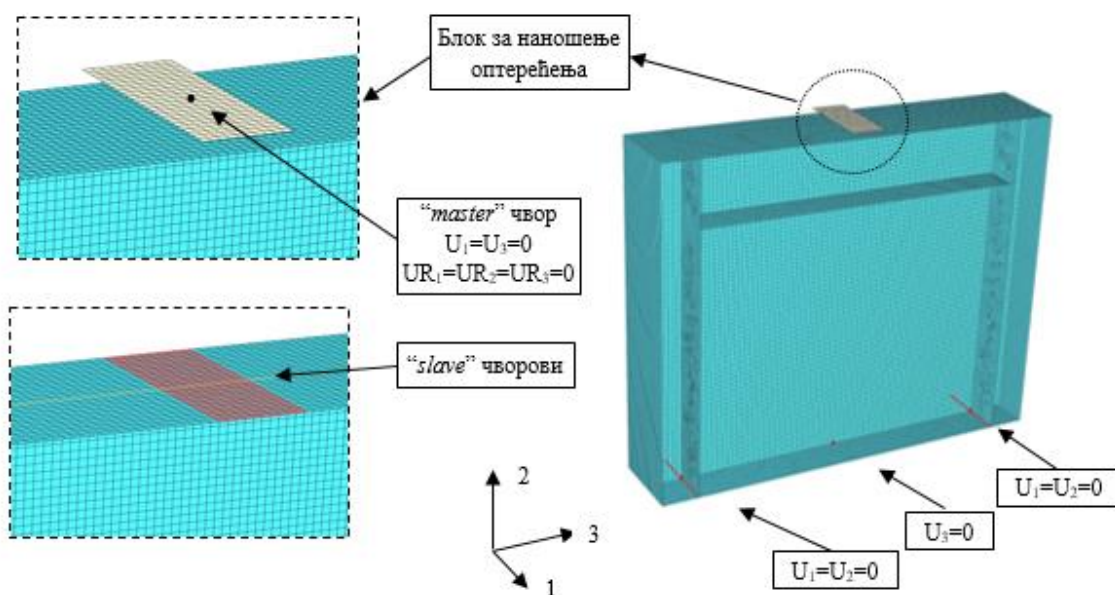
Нумеричка симулација проблема је спроведена користећи софтвер Abaqus [7], верзија 6.13, који је софтвер вишенамјенске анализе на бази коначних елемената. Анализа изабраних I - носача извршена је инкременталном нелинеарном анализом коришћењем геометријске и материјалне нелинеарности.

Нумерички модел је развијен на основу димензија носача коришћених у експерименталним истраживањима [29, 31], укључујући подужно неукрућене и укрућене челичне носаче и базиран је на моделу коришћеном у [30, 32] уз прилагођавања потребама планиране параметарске анализе. У овим експерименталним истраживањима су коришћене следеће димензије носача : $t_w = 4 \text{ mm}$, $t_f = 8 \text{ mm}$, $h_w = 500 \text{ mm}$ и $b_f = 120 \text{ mm}$. Дужина оптерећеног панела ребра је: $a = 500 \text{ mm}$ у [29], односно $a = 1000 \text{ mm}$ у [31]. У оба експеримента је коришћено за случај подужно укрућених носача једно подужно равно укрућење, димензија $b_s = 30 \text{ mm}$, $t_s = 8 \text{ mm}$, које се налазило на удаљености од једне петине висине носача ($b_l = 0.2 h_w$). Димензије које нису вариране у параметарској анализи (које су биле константне) одговарају наведеним димензијама у експерименталним истраживањима [29, 31]

Гранични услови и оптерећење

Оптерећење и гранични услови су примијењени тако да на најбољи начин симулирају услове из експерименталних истраживања [29, 31]. Оптерећење се на горњи појас преноси преко крутих блокова оптерећења који су моделирани као посебан дио конструкције (слика 16). Ширина блокова оптерећења одговара ширини оптерећеног појаса, а дужина блока је једнака дужини локалног оптерећења s_s . Концентрисане силе ($s_s = 0$) су моделиране као линијско оптерећење које дјелује читавом ширином појаса. Централни чвор крутог блока оптерећења је дефинисан као “*master*” чвор, док су одговарајући чворови на оптерећеном појасу одређени као “*slave*” чворови.

Примијењен је “*displacement-controlled*” приступ који се заснива на праћењу помјерања “*master*” чвора услед дејства оптерећења, слика 16. Извршена је инкрементална анализа коришћењем модификоване Риксове методе [8] да би се пратио сложени нелинеарни одговор носача на оптерећење. Спријечена су сва помјерања “*master*” чвора, осим у вертикалном правцу (у правцу нашошења оптерећења).



Слика 16 Нумерички модел – мрежа коначних елемената, гранични услови, оптерећење

У циљу што реалнијег дефинисања контакта између блока за наношење оптерећења и горњег појаса коришћена је “*surface-to-surface*” метода дискретизације са дефинисаним особинама контакта. Контакт је дефинисан као “*чврст*” контакт у правцу наношења оптерећења без трења у тангенцијалном правцу (*normal behavior – hard contact, tangential behavior – frictionless*). На позицији ослоначких укрућења су спријечена помјерања у вертикалном правцу као и помјерања у попречном правцу (управно на раван ребра носача), слика 16. Додатно, спријечено је помјерање чвора на средини доњег појаса у подужном правцу (подужни правац ребра носача).

Ови гранични услови су коришћени и у линераној анализи (*linear buckling analyses*, која је коришћена за генерисање геометријских имперфекција носача) као и у геометријско-материјалној нелинераној анализи. Сви елементи носача (ребро, појасеви, попречна укрућења и подужно укрућење) су међуобно спојени у компактан модел носача.

У циљу превазилажења преклапања између елемената ребра и појасева, чворови појаса су постављени на врху појаса (*shell offset - top*) за горњи појас, односно на дну појаса (*shell offset - bottom*) за доњи појас. Ребро носача, попречна и подужна укрућења су моделирана са чворовима у средини (*shell offset - middle*).

Почетне геометријске имперфекције унете су у нумерички модел коришћењем првог облика извијања добијеног модалном анализом (*linear buckling analyses*). Овај облик извијања има С-облик деформације и сличан је за подужно укрућене и неукрућене носаче. Усвојена је максимална амплитуда имперфекција $h_w/100$ [30].

Мрежа коначних елемената

Носачи су моделирани у реалној величини, помоћу четвороугаоних плочастих (*shell*) елемената са редукованом интеграцијом S4R, слика 16. Ови елементи се често примјењују код моделирања напрезања плочастих носача (танких и дебелих плоча). Поузданост и прецизност употребе ових елемената је доказана у сличним анализама овог проблема.

Мрежа коначних елемената је израђена коришћењем елемената величине 5 mm. Величина елемената је одређена на основу претходно спроведене анализе конвергенције [30].

Материјалне карактеристике

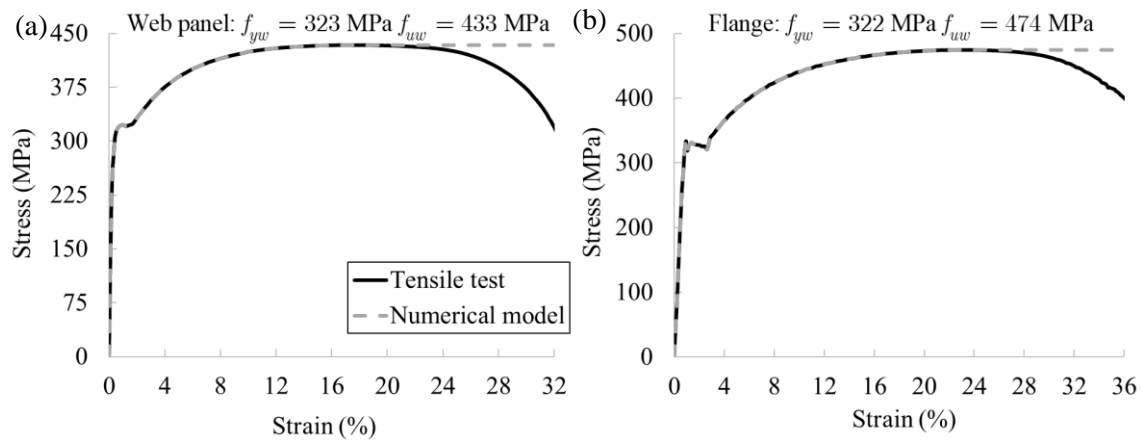
Карактеристике материјала коришћене у нумеричком моделу су добијене као просјечне вриједности података одређених у стандардним тестовима затезања у експериментима [29] [31]. Материјал је моделиран као изотропан материјал са von Mises -овим критеријумом.

У циљу укључивања материјалне нелинеарности, дијаграм номиналних вриједности напон-дилатација (*engineering stress-strain diagram*), који је добијен тестом затезања, конвертован је у стварни дијаграм напон - дилатација (*true stress-true strain diagram*) коришћењем израза:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad \varepsilon_{ln} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (3.2.1)$$

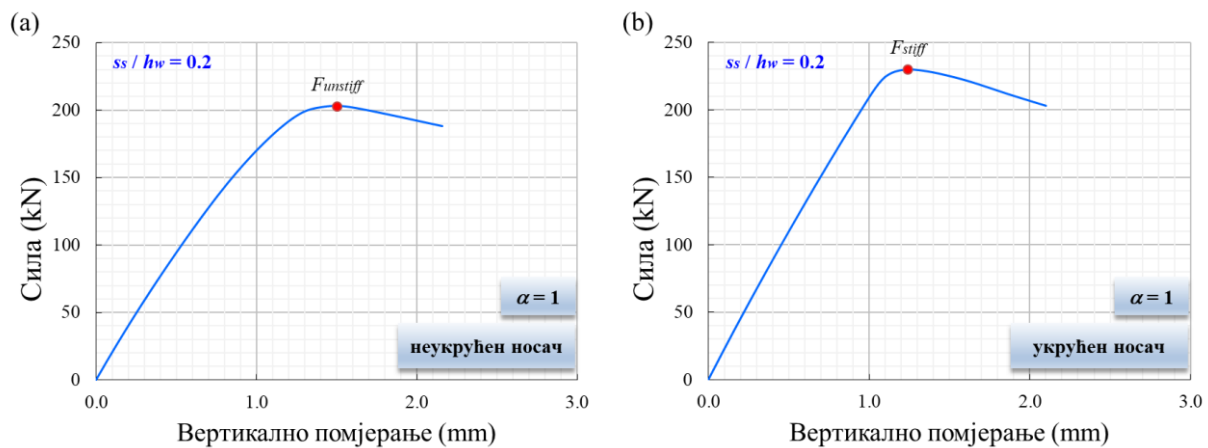
гдје су σ_{eng} и ε_{eng} номинални напон и дилатација, респективно.

Нелинеарна крива напон-дилатација је идеализована мултилинеарном кривом; претпостављен је неограничен дуктилни плато након достизања максималне чврстоће (слика 17). Young-ов модул еластичности и Poisson-ов коефицијент су 205 GPa и 0.30, респективно. Напони течења су преузети из експеримената носача.



Слика 17 Дијаграм напон-дилатација (а) ребро, (б) појас (преузето из [30])

Одређивање граничне носивости се одређује примјеном горе описаног нумеричког модела. Носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача одређена је пратећи криву оптерећење-помјерање, слика 18. Ниво оптерећења након кога се помјерање ребра и оптерећеног појаса повећавају без даљег повећања оптерећења дефинисан је као гранична носивост. Облик лома носача је различит за различите односе параметара модела (укрућен носач, неукрућен носач, крутост укрућења, виткост ребра, дужина наносења оптерећења...).



Слика 18 Крива сила-помјерање за подужно (а)неукрућене и (б)укрућене носаче

Верификација модела

Валидност модела коначних елемената је провјерена у [30, 32] поређењем са експерименталним резултатима подужно неукрућених и укрућених носача [29, 31].

Просјечна грешка нумерички добијене носивости у односу на носивост добијену експериментално за носаче распона $a = 500$ mm је износила 0,83% (коэффициент варијације = 4,45%) односно 2,60% (коэффициент варијације = 7,75%) за подужно неукрућене и подужно укрућене носаче, а за носаче распона $a = 1000$ mm 6,15% (коэффициент варијације = 6,95%) односно 2,78% (коэффициент варијације = 6,26%) за подужно неукрућене и подужно укрућене челичне носаче.

3.3 ПАРАМЕТАРСКА АНАЛИЗА

У овом истраживању су разматрани лимени носачи (I - носачи) подужно неукрућени и подужно укрућени који су ојачани само једним равним подужним укрућењем. Неукрућени носачи су анализирани ради добијања ефекта ојачања који је дефинисан као однос граничне носивости подужно укрућених и подужно неукрућених носача.

Димензије носача у овој анализи су одређене на такав начин да карактеристични односи (a/h_w , h_w/t_w , t_f/t_w , t_s/t_w) имају по три вриједности и обухвате средње и граничне вриједности односа који се често користе у експерименталним и нумеричким истраживањима.

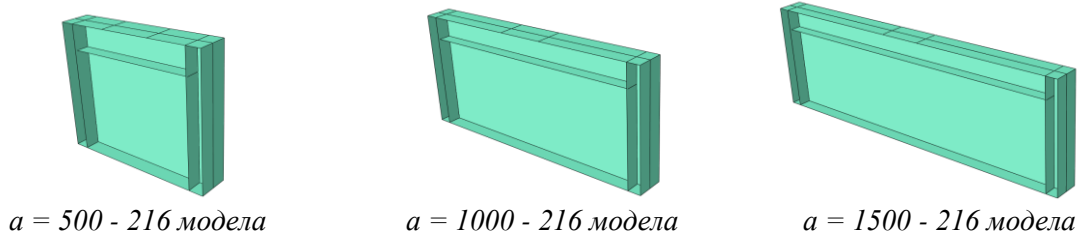
Параметри који нису варирани су:

1. висина ребра $h_w = 500 \text{ mm}$
2. ширина појаса $b_f = 500 \text{ mm}$
3. положај подужног укрућења $b_1 = 0.2h_w = 100 \text{ mm}$
4. напон течења ребра $f_{yw} = 323 \text{ MPa}$
5. напон течења појаса $f_{yw} = 323 \text{ MPa}$

Параметри који су варирани су:

1. дужина оптерећеног панела : три вриједности $a = 500, 1000, 1500 \text{ mm}$
(однос дужине и висине оптерећеног панела - $\alpha = a/h_w = 1, 2$ и 3)
2. дебљина ребра: по три вриједности $t_w = 1.25, 2, 4 \text{ mm}$ - за сваку од дужина оптерећеног панела ребра - укупно девет случајева
(виткост ребра $h_w/t_w = 400, 250, 125$, за сваку од три дужине оптерећеног панела $a = 500, 1000, 1500$)
3. дебљина појаса: за сваки од претходних (3x3) девет случајева за сваку дебљину ребра по три дебљине појаса, тако да је однос $t_f/t_w = 2, 4, 6$ за сваку од њих - за $t_w = 1.25 \rightarrow t_f = 2.5, 5, 7.5 \text{ mm}$, за $t_w = 2 \rightarrow t_f = 4, 8, 12 \text{ mm}$, и за $t_w = 4 \rightarrow t_f = 8, 16, 24 \text{ mm}$ што чини укупно 27 комбинација.
(дебљина појаса је изабрана тако да је однос $t_f/t_w = 2, 4, 6$ за свих претходних девет случајева)
4. за сваки од претходних (3x3x3) 27 комбинација при свакој дебљини појаса разматрана су по четири случаја: један без укрућења и три са подужним укрућењима, при чему дебљине укрућења одговарају односу $t_s/t_w = 1, 2$ и 3 према одговарајућој дебљини ребра, односно ако је $t_w = 1.25 \rightarrow t_s = 1.25, 2.5, 3.75 \text{ mm}$, ако је $t_w = 2 \rightarrow t_s = 2, 4, 6 \text{ mm}$ и ако је $t_w = 4 \rightarrow t_s = 4, 8, 12 \text{ mm}$ што чини укупно 108 комбинација (при томе ширина укрућења је одређена кроз анализу конвергенције – објашњено у наставку у 3.3.1).
5. дужина оптерећења: за сваку од претходних (3x3x3x4) 108 комбинација по 6 дужина оптерећења: $s_s = 0 \text{ mm}$ (концентрисано – линисји оптерећење), $s_s = 50 \text{ mm}$, $s_s = 100 \text{ mm}$, $s_s = 150 \text{ mm}$, $s_s = 200 \text{ mm}$, $s_s = 250 \text{ mm}$ што чини укупно 648 случајева (симулација), слика 19.

Комбиновање ових параметара омогућило је различите анализе резултата при константним вредностима појединих параметара. Почетне геометријске имперфекције су укључене кроз први облик извијања добијен анализом сопствених вриједности уз горе описане граничне услове и оптерећење.



Слика 19 Број модела у нумеричкој анализи

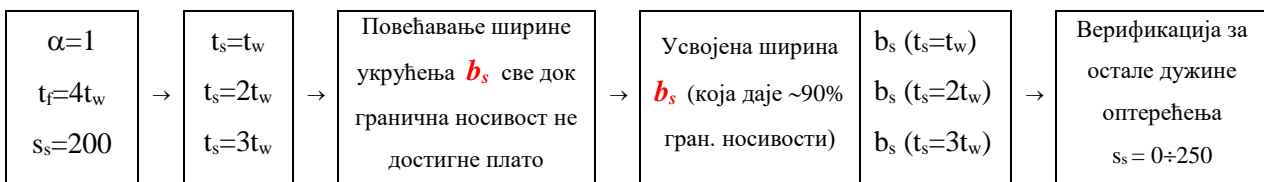
3.3.1 АНАЛИЗА КОНВЕРГЕНЦИЈЕ

Посебна пажња посвећена је избору подужних укрућења. За сваку дебљину ребра коришћена су три различита подужна укрућења. Дебљина подужног укрућења t_s је варирана тако да је однос дебљине укрућења и дебљине ребра био $t_s / t_w = 1, 2, 3$.

Ширина подужних укрућења одређена је на основу анализе конвергенције за гранично стање носивости за сваку дебљину t_s , са циљем да се пронађе њихов максималан (практични) допринос на ефекат ојачања. Ширина b_s је варирана све док гранична носивост није достигла плато, односно све док повећање ширине укрућења више није имало утицај на граничну носивост (максимална крутост укрућења γ_{max}). Усвојена подужна укрућења разматрана у параметарској анализи (Табела 2) дају приближно 90% граничне носивости. Сматрало се да је неекономично користити укрућења који дају 100% максималног граничног оптерећења јер је пораст граничног оптерећења непропорционалан утрошку материјала потребног за укрућења (добија се мали пораст у граничној носивости за веома велике димензије укрућења).

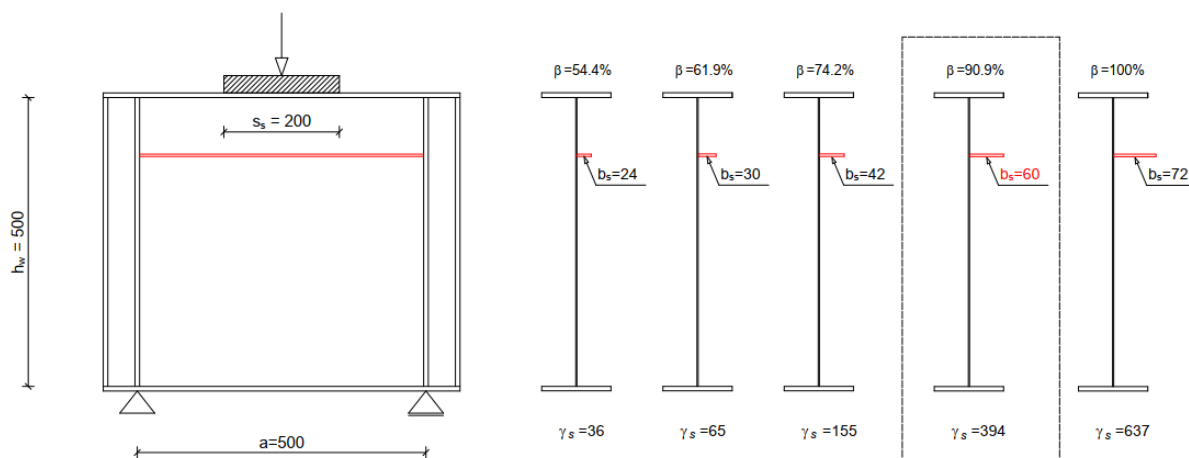
Ова анализа конвергенције је изведена за однос дужине и висине панела ребра $\alpha = 1$, за сваку дебљину ребра, средњу дебљину појаса $t_f = 4t_w$, дужину оптерећења $s_s / h_w = 0.40$ ($s_s = 200 \text{ mm}$) и три дебљине укрућења t_s ($t_s = t_w$; $t_s = 2t_w$; $t_s = 3t_w$).

Алгоритам одређивања димензија укрућења може се представити на следећи начин:



Добијене ширине b_s из ове анализе конвергенције су затим верификоване за све остале дужине оптерећења и друге дебљине појаса ($t_f = 2t_w$; $t_f = 6t_w$) за однос дужине и висине оптерећеног панела ребра $\alpha = 1$. Затим су, усвојене димензије провјерене и коришћене и за односе $\alpha = 2$ и $\alpha = 3$. За потребе анализе конвергенције је урађено 524 нумеричких модела.

Илустрација утицаја релативне крутости на савијање подужног укрућења на граничну носивост приказана је на репрезентативном примјеру датом на слици 20. Полази се од носача следећих карактеристика $\alpha = 1$, $t_w = 2 \text{ mm}$, $t_f = 4t_w$, дужина нашоњења оптерећења $s_s=200$, дебљина подужног укрућења $t_s = 2t_w$ (подаци дати у Табели 3).

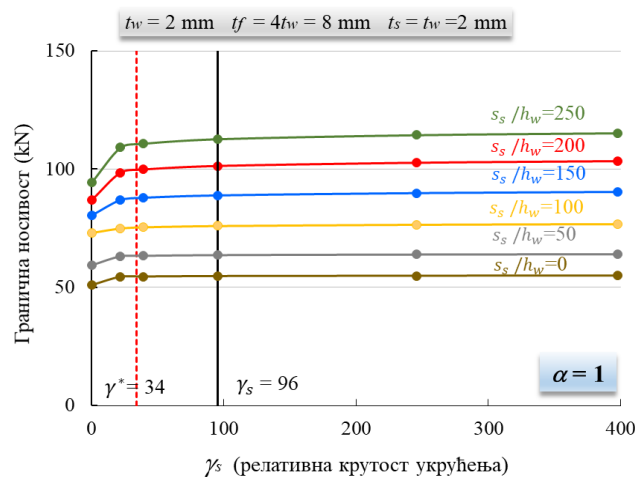


Слика 20 Поступак избора ширине подужног укрућења у анализи конвергенције

У табели 2 су приказани резултати анализе конвергенције за носач дебљине ребра $t_w = 2$, дебљине појаса $t_f = 8$ mm, и дебљине подужног укрућења $t_s = t_w$. Ширина подужног укрућења је варирана за дужину локалног оптерећења $s_s = 200$ mm (уоквирено црвеном бојом) све док није достигнут плато граничне носивости (слика 21). Усвојене су димензије укрућења које одговарају ~90 % граничне носивости. Након тога усвојене димензије су провјерене за остале дужине оптерећења.

Табела 2 Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрућења γ_s за $t_s = t_w$

t_w	t_f	t_s	b_s	γ_s	s_s	s_s/h_w	Fn	$\beta = \frac{F_{n,stiff}}{F_{n,unstiff}}$	$\Delta\beta$	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(kN)		(%)	
2	8	неукрућен носач				0	0	50.86	-	-
		2	24	22	0	0	54.40	1.07	86.9	
		2	30	39	0	0	54.52	1.07	89.9	
		2	42	96	0	0	54.69	1.08	93.9	
		2	60	246	0	0	54.85	1.08	98.0	
		2	72	398	0	0	54.94	1.08	100.0	
2	8	неукрућен носач				50	0.1	59.24	-	-
		2	24	22	50	0.1	63.13	1.07	80.8	
		2	30	39	50	0.1	63.37	1.07	85.7	
		2	42	96	50	0.1	63.65	1.07	91.5	
		2	60	246	50	0.1	63.91	1.08	97.0	
		2	72	398	50	0.1	64.06	1.08	100.0	
2	8	неукрућен носач				100	0.2	72.89	-	-
		2	24	22	100	0.2	74.87	1.03	50.7	
		2	30	39	100	0.2	75.38	1.03	63.9	
		2	42	96	100	0.2	75.95	1.04	78.4	
		2	60	246	100	0.2	76.51	1.05	92.8	
		2	72	398	100	0.2	76.79	1.05	100.0	
2	8	неукрућен носач				150	0.3	80.46	-	-
		2	24	22	150	0.3	86.87	1.08	65.4	
		2	30	39	150	0.3	87.81	1.09	75.0	
		2	42	96	150	0.3	88.81	1.10	85.3	
		2	60	246	150	0.3	89.76	1.12	94.9	
		2	72	398	150	0.3	90.26	1.12	100.0	
2	8	неукрућен носач				200	0.4	86.88	-	-
		2	24	22	200	0.4	98.44	1.13	70.3	
		2	30	39	200	0.4	99.82	1.15	78.6	
		2	42	96	200	0.4	101.30	1.17	87.7	
		2	60	246	200	0.4	102.66	1.18	95.9	
		2	72	398	200	0.4	103.33	1.19	100.0	
2	8	неукрућен носач				250	0.5	94.49	-	-
		2	24	22	250	0.5	109.10	1.15	70.3	
		2	30	39	250	0.5	110.84	1.17	78.7	
		2	42	96	250	0.5	112.75	1.19	87.9	
		2	60	246	250	0.5	114.46	1.21	96.1	
		2	72	398	250	0.5	115.26	1.22	100.0	

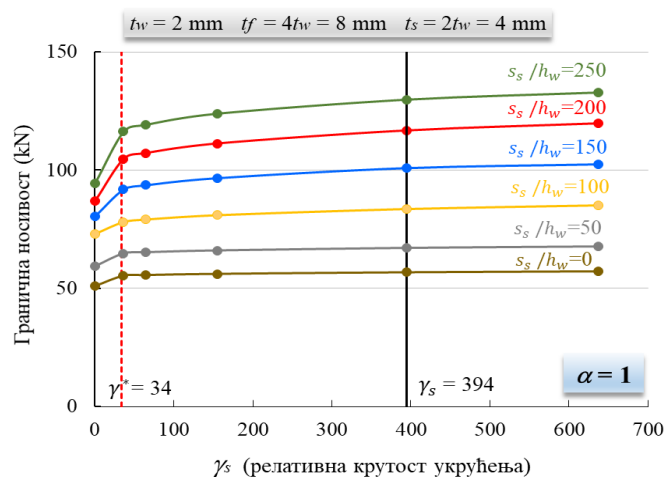


Слика 21 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = t_w$

У табели 3 су приказани резултати анализе конвергенције за носач дебљине ребра $t_w = 2$, дебљине појаса $t_f = 8$ mm, и дебљине подужног укрућења $t_s = 2t_w$. Ширина подужног укрућења је варирана за дужину локалног оптерећења $s_s = 200$ mm (уоквирено црвеном бојом) све док није достигнут плато граничне носивости (слика 22). Усвојене су димензије укрућења које одговарају ~90 % граничне носивости. Након тога усвојене димензије су провјерене за остале дужине оптерећења.

Табела 3 Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрућења γ_s за $t_s = 2t_w$

t_w	t_f	t_s	b_s	γ_s	s_s	s_s/h_w	Fn	$\beta = \frac{F_{n,stiff}}{F_{n,unstiff}}$	$\Delta\beta$	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(kN)		(%)	
2	8	неукрућен носач				0	0	50.86	-	-
		4	24	36	0	0	55.33	1.09	71.1	
		4	30	65	0	0	55.60	1.09	75.3	
		4	42	155	0	0	56.08	1.10	83.0	
		4	60	394	0	0	56.75	1.12	93.7	
		4	72	637	0	0	57.15	1.12	100.0	
2	8	неукрућен носач			50	0	59.24	-	-	
		4	24	36	50	0.1	64.71	1.09	65.6	
		4	30	65	50	0.1	65.16	1.10	71.0	
		4	42	155	50	0.1	65.92	1.11	80.1	
		4	60	394	50	0.1	66.97	1.13	92.6	
		4	72	637	50	0.1	67.59	1.14	100.0	
2	8	неукрућен носач			100	0	72.89	-	-	
		4	24	36	100	0.2	78.02	1.07	42.0	
		4	30	65	100	0.2	79.06	1.08	50.5	
		4	42	155	100	0.2	80.90	1.11	65.7	
		4	60	394	100	0.2	83.53	1.15	87.2	
		4	72	637	100	0.2	85.09	1.17	100.0	
2	8	неукрућен носач			150	0	80.46	-	-	
		4	24	36	150	0.3	91.83	1.14	51.7	
		4	30	65	150	0.3	93.62	1.16	59.8	
		4	42	155	150	0.3	96.63	1.20	73.5	
		4	60	394	150	0.3	100.87	1.25	92.7	
		4	72	637	150	0.3	102.47	1.27	100.0	
2	8	неукрућен носач			200	0	86.88	-	-	
		4	24	36	200	0.4	104.75	1.21	54.4	
		4	30	65	200	0.4	107.21	1.23	61.9	
		4	42	155	200	0.4	111.25	1.28	74.2	
		4	60	394	200	0.4	116.73	1.34	90.9	
		4	72	637	200	0.4	119.72	1.38	100.0	
2	8	неукрућен носач			250	0	94.49	-	-	
		4	24	36	250	0.5	116.25	1.23	56.9	
		4	30	65	250	0.5	119.18	1.26	64.5	
		4	42	155	250	0.5	123.86	1.31	76.8	
		4	60	394	250	0.5	129.76	1.37	92.2	
		4	72	637	250	0.5	132.74	1.40	100.0	

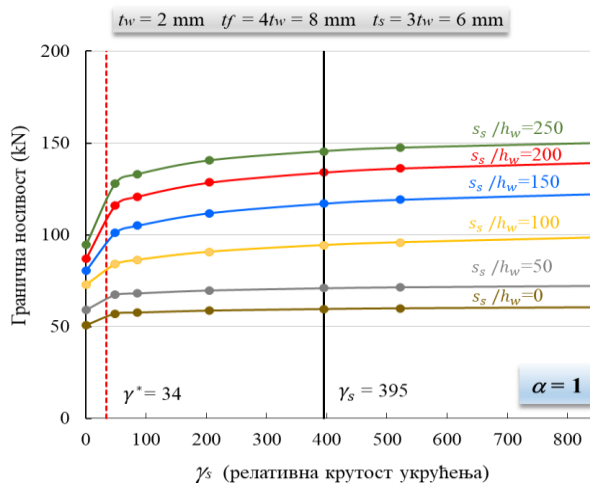


Слика 22 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = 2t_w$

У табели 4 су приказани резултати анализе конвергенције за носач дебљине ребра $t_w = 2$, дебљине појаса $t_f = 8$ mm, и дебљине подужног укрућења $t_s = 3t_w$. Ширина подужног укрућења је варирана за дужину локалног оптерећења $s_s = 200$ mm (уоквирено црвеном бојом) све док није достигнут плато граничне носивости (слика 23). Усвојене су димензије укрућења које одговарају ~90 % граничне носивости. Након тога усвојене димензије су провјерене за остале дужине оптерећења.

Табела 4 Анализа конвергенције крутости на савијање подужног укрућења γ_s за $t_s = 3t_w$

t_w	t_f	t_s	b_s	γ_s	s_s	s_s/h_w	Fn	$\beta = \frac{F_{n,stiff}}{F_{n,unstiff}}$	$\Delta\beta$	
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(kN)		(%)	
2	8	неукрућен носач				0	0	50.86	-	-
		6	24	48	0	0	57.05	1.12	64.6	
		6	30	86	0	0	57.63	1.13	70.5	
		6	42	205	0	0	58.66	1.15	81.3	
		6	54	395	0	0	59.54	1.17	90.5	
		6	60	522	0	0	59.90	1.18	94.3	
		6	72	846	0	0	60.45	1.19	100.0	
2	8	неукрућен носач				50	0	59.24	-	-
		6	24	48	50	0.1	67.35	1.14	62.3	
		6	30	86	50	0.1	68.22	1.15	69.0	
		6	42	205	50	0.1	69.77	1.18	80.9	
		6	54	395	50	0.1	71.01	1.20	90.4	
		6	60	522	50	0.1	71.53	1.21	94.4	
		6	72	846	50	0.1	72.26	1.22	100.0	
2	8	неукрућен носач				100	0	72.89	-	-
		6	24	48	100	0.2	83.99	1.15	43.4	
		6	30	86	100	0.2	86.41	1.19	52.8	
		6	42	205	100	0.2	90.77	1.25	69.9	
		6	54	395	100	0.2	94.39	1.29	84.1	
		6	60	522	100	0.2	95.88	1.32	89.9	
		6	72	846	100	0.2	98.47	1.35	100.0	
2	8	неукрућен носач				150	0	80.46	-	-
		6	24	48	150	0.3	100.98	1.25	49.2	
		6	30	86	150	0.3	104.99	1.30	58.8	
		6	42	205	150	0.3	111.80	1.39	75.1	
		6	54	395	150	0.3	117.01	1.45	87.6	
		6	60	522	150	0.3	119.15	1.48	92.7	
		6	72	846	150	0.3	122.19	1.52	100.0	
2	8	неукрућен носач				200	0	86.88	-	-
		6	24	48	200	0.4	115.92	1.33	55.4	
		6	30	86	200	0.4	120.81	1.39	64.7	
		6	42	205	200	0.4	128.50	1.48	79.4	
		6	54	395	200	0.4	134.04	1.54	89.9	
		6	60	522	200	0.4	136.28	1.57	94.2	
		6	72	846	200	0.4	139.33	1.60	100.0	
2	8	неукрућен носач				250	0	94.49	-	-
		6	24	48	250	0.5	127.78	1.35	60.1	
		6	30	86	250	0.5	132.96	1.41	69.5	
		6	42	205	250	0.5	140.47	1.49	83.0	
		6	54	395	250	0.5	145.48	1.54	92.1	
		6	60	522	250	0.5	147.34	1.56	95.4	
		6	72	846	250	0.5	149.87	1.59	100.0	



Слика 23 Утицај релативне крутости укрућења на граничну носивост $\alpha = 1$, $t_w = 2$, $t_f = 4t_w$, $t_s = 3t_w$

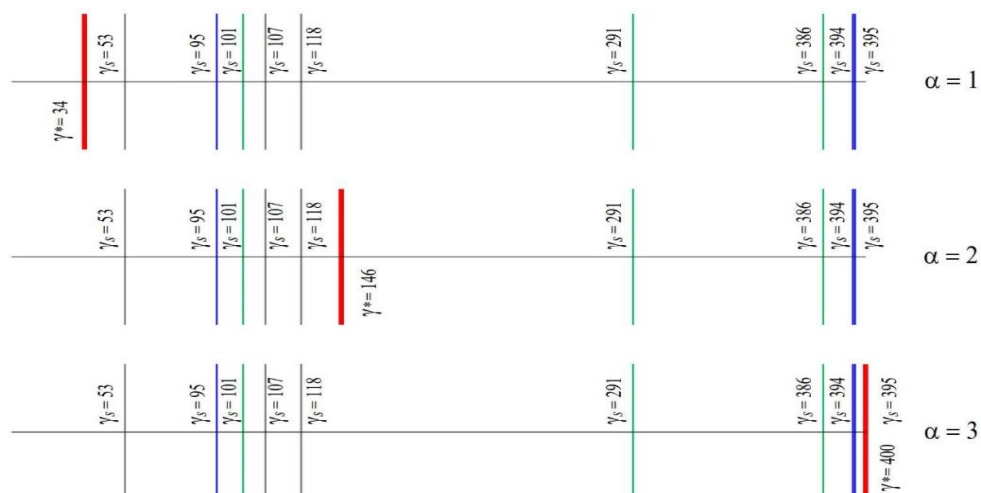
Подужна укрућења су класификована према EN 1993-1-5, односно користећи γ^* у изразу (2.4.8). Овај израз је одређен за разматрања критичне силе. У Еврокоду не постоји посебан критеријум за одређивање γ^* за разматрање граничног оптерећења. Такође у постојећој литератури нема јединственог решења за ову вриједност. Да би се ипак на неки начин описала крутост подужних укрућења коришћен је овај израз. У вези са овим дата је дискусија у поглављу 3.4.2.1.

Подужна укрућења коришћена за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 1$ (за све дебљине ребра) могу се класификовати као *јака*. За однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 3$, услов $\gamma_s < \gamma^*$ је задовољен за сва три подужна укрућења (за све дебљине ребра), па се та укрућења могу класификовати као *слаба*. Носачи код којих је однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 2$ садрже и *слаба* и *јака* подужна укрућења.

У табели 5 дата је класификација подужних укрућења коришћених у параметарској анализи, а на слици 24 графички приказ релативне крутости подужних укрућења у односу на граничну вриједност. Као што је горе поменуто, циљ је био да се утврди утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра на ефекат ојачања и граничну носивост. Зато су димензије подужних укрућења одређене за случај $\alpha = 1$ такође одабране и за остале односе дужине и висине оптерећеног панела ребра.

Табела 5 Класификација подужних укрућења коришћених у параметарској анализи.

t_w (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	$a = 500 \text{ mm}$ $\gamma^* = 34$ (2.4.8)	$a = 1000 \text{ mm}$ $\gamma^* = 146$ (2.4.8)	$a = 1500 \text{ mm}$ $\gamma^* = 400$ (2.4.8)
4	4×52 ($\gamma_s = 53$)	јако	слабо	слабо
	8×58 ($\gamma_s = 118$)	јако	слабо	слабо
	12×50 ($\gamma_s = 107$)	јако	слабо	слабо
2	2×42 ($\gamma_s = 95$)	јако	слабо	слабо
	4×60 ($\gamma_s = 394$)	јако	јако	слабо
	6×54 ($\gamma_s = 395$)	јако	јако	слабо
1.25	1.25×32 ($\gamma_s = 101$)	јако	слабо	слабо
	2.5×40 ($\gamma_s = 291$)	јако	јако	слабо
	3.75×40 ($\gamma_s = 386$)	јако	јако	слабо



Слика 24 Релативна крутост подужног укрућења γ_s у односу на граничну вриједност релативне крутости γ^*

У параметарској студији је коришћен нелинеарни модел коначних елемената описан у поглављу 3.2. За потребе анализе конвергенције је урађено укупно 524 модела.

3.4 РЕЗУЛТАТИ ПАРАМЕТАРСКЕ АНАЛИЗЕ

Резултати параметарске анализе су приказани у овом поглављу табеларно и графички.

Добијене граничне носивости за подужно неукрућене и укрућене лимене носаче су сумиране у табелама 6 - 11. У одвојеним табелама дате су вриједности граничне носивости (табела 6, табела 8 и табела 10) као и однос граничне носивости подужно укрућених и неукрућених носача као ефекат ојачања ($\beta = F_{stif}/F_{unstif}$) (табела 7, табела 9 и табела 11).

Графички преглед резултата нумеричке анализе је дат за одабране карактеристичне примере, за одређене распоне, дебљине ребра, дебљине појаса, укрућења и дужине ношења оптерећења на сликама од 25 до 59.

У делу 3.4.1. су приказане криве сила-вертикално помјерање за поједине носаче за неукрућене и укрућене носаче на слици 25; слике деформација носача као цјелине при достизању граничног оптерећења (из абакуса), графици деформација средњег вертикалног пресека ребра као и криве сила-вертикално помјерање од слике 26 до 34.

У делу 3.4.2. је приказан утицај крутости укрућења на граничну носивост од слике 35 до 44; дијаграми ефекта ојачања у функцији дужине оптерећења од слике 45 до 49.

У делу 3.4.3. је приказан утицај дебљине појаса на сликама 51 до 54.

У делу 3.4.4. је приказан утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра на сликама од 55 до 59.

У поглављу (3.5) су за носаче разматране у параметарској анализи у табелама 13 до 18 приказане вриједности граничне носивости и ефекти ојачања одређени применом Еврокода. Такође су дати упоредни дијаграми граничне носивости и ефекта ојачања према EN 1993-1-5 и према нумеричкој анализи на сликама од 60 до 65. На крају овог поглавља су дати закључци на основу наведених поређења.

У поглављу (3.6) је извршено поређење добијених граничних носивости са граничним носивостима носача у којима је материјал моделиран идеализованим дијаграмима.

Увид у ове табеле и поређење резултата за различите случајеве омогућавају различите закључке. Главни закључак је да се гранична носивост носача повећава са повећањем дебљине ребра, дебљине појаса, дебљине подужног укрућења и дужине оптерећења, док се граничне носивости носача смањују са повећањем односа дужине и висине оптерећеног панела.

Дати су коментари после после појединих цијелина.

Конкретни закључци у вези са различитим параметрима дати су у наредним поглављима.

За све носаче су дати: дијаграми ефекта ојачања у функцији дужине оптерећења у прилогу А; дијаграми којима се описује утицај дебљине појаса у прилогу Б; дијаграми којима се описује утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра у прилогу В.

3.4.1 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ

3.4.1.1 Табеларни преглед резултата нумеричке анализе

У табели 6 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене нумеричком анализом, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 1$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 6 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) носача за $[\alpha = 1]$

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	128.94	163.14	203.0	237.50	263.25	291.11
		4×52	53	136.56	170.70	210.84	256.70	301.22	342.44
		8×58	118	142.81	180.68	223.11	280.03	336.35	386.99
		12×50	107	147.10	187.03	229.88	294.28	355.43	418.63
	16	неукрућен носач	-	196.55	228.23	251.93	278.44	308.60	346.49
		4×52	53	201.99	231.51	268.33	312.00	357.23	403.51
		8×58	118	212.70	246.29	287.11	343.19	401.58	459.70
		12×50	107	220.17	256.46	298.30	364.06	420.82	485.20
	24	неукрућен носач	-	254.93	274.02	308.05	349.59	401.23	469.31
		4×52	53	264.50	290.52	326.48	369.78	428.08	504.04
		8×58	118	279.20	306.30	347.62	403.80	473.99	567.15
		12×50	107	289.14	318.53	361.00	429.43	513.21	614.36
2	4	неукрућен носач	-	35.92	47.08	60.25	72.40	78.54	84.76
		2×42	95	40.57	52.04	64.82	77.49	89.74	100.90
		4×60	394	42.04	54.43	71.14	87.83	103.26	116.01
		6×54	395	42.85	56.73	79.61	101.11	118.35	130.18
	8	неукрућен носач	-	50.86	59.24	72.89	80.46	86.88	94.49
		2×42	95	54.69	63.65	75.95	88.81	101.30	112.75
		4×60	394	56.76	66.97	83.53	100.87	116.73	129.76
		6×54	395	59.54	71.01	94.54	117.01	134.04	145.48
	12	неукрућен носач	-	63.39	70.99	81.87	89.07	98.38	112.21
		2×42	95	65.51	73.82	86.18	99.34	112.39	125.52
		4×60	394	68.21	78.23	95.01	112.89	129.24	143.53
		6×54	395	71.61	83.74	108.12	131.14	147.74	160.23
1.25	2.5	неукрућен носач	-	15.24	20.97	25.53	30.31	33.26	35.54
		1.25×32	101	16.23	23.19	27.47	31.45	35.56	39.60
		2.5×40	291	16.57	23.33	28.09	32.68	37.48	42.09
		3.75×40	386	17.07	23.67	29.22	35.08	41.05	46.41
	5	неукрућен носач	-	20.63	24.58	29.14	33.95	36.19	38.82
		1.25×32	101	23.08	26.86	30.97	35.06	39.23	43.28
		2.5×40	291	22.92	27.08	31.74	36.47	41.36	46.00
		3.75×40	386	22.87	27.54	33.09	39.19	45.38	50.81
	7.5	неукрућен носач	-	24.61	28.00	33.03	36.58	39.46	43.71
		1.25×32	101	26.52	29.91	34.00	38.19	42.50	46.91
		2.5×40	291	26.53	30.30	34.94	39.81	44.84	49.71
		3.75×40	386	26.69	30.99	36.56	42.83	49.16	54.77

У табели 7 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$), за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 1$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

Табела 7 Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за $[\alpha = 1]$.

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	128.94	163.14	203.0	237.50	263.25	291.11
		4×52	53	1.06	1.05	1.04	1.08	1.14	1.18
		8×58	118	1.11	1.11	1.10	1.18	1.28	1.33
		12×50	107	1.14	1.15	1.13	1.24	1.35	1.44
	16	неукрупњен носач	-	196.55	228.23	251.93	278.44	308.60	346.49
		4×52	53	1.03	1.01	1.07	1.12	1.16	1.16
		8×58	118	1.08	1.08	1.14	1.23	1.30	1.33
		12×50	107	1.12	1.12	1.18	1.31	1.36	1.40
	24	неукрупњен носач	-	254.93	274.02	308.05	349.59	401.23	469.31
		4×52	53	1.04	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07
		8×58	118	1.10	1.12	1.13	1.16	1.18	1.21
		12×50	107	1.13	1.16	1.17	1.23	1.28	1.31
2	4	неукрупњен носач	-	35.92	47.08	60.25	72.40	78.54	84.76
		2×42	95	1.13	1.11	1.08	1.07	1.14	1.19
		4×60	394	1.17	1.16	1.18	1.21	1.31	1.37
		6×54	395	1.19	1.21	1.32	1.40	1.51	1.54
	8	неукрупњен носач	-	50.86	59.24	72.89	80.46	86.88	94.49
		2×42	95	1.08	1.07	1.04	1.10	1.17	1.19
		4×60	394	1.12	1.13	1.15	1.25	1.34	1.37
		6×54	395	1.17	1.20	1.30	1.45	1.54	1.54
	12	неукрупњен носач	-	63.39	70.99	81.87	89.07	98.38	112.21
		2×42	95	1.03	1.04	1.05	1.12	1.14	1.12
		4×60	394	1.08	1.10	1.16	1.27	1.31	1.28
		6×54	395	1.13	1.18	1.32	1.47	1.50	1.43
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	15.24	20.97	25.53	30.31	33.26	35.54
		1.25×32	101	1.06	1.11	1.08	1.04	1.07	1.11
		2.5×40	291	1.09	1.11	1.10	1.08	1.13	1.18
		3.75×40	386	1.12	1.13	1.14	1.16	1.23	1.31
	5	неукрупњен носач	-	20.63	24.58	29.14	33.95	36.19	38.82
		1.25×32	101	1.12	1.09	1.06	1.03	1.08	1.11
		2.5×40	291	1.11	1.10	1.09	1.07	1.14	1.18
		3.75×40	386	1.11	1.12	1.14	1.15	1.25	1.31
	7.5	неукрупњен носач	-	24.61	28.00	33.03	36.58	39.46	43.71
		1.25×32	101	1.08	1.07	1.03	1.04	1.08	1.07
		2.5×40	291	1.08	1.08	1.06	1.09	1.14	1.14
		3.75×40	386	1.08	1.11	1.11	1.17	1.25	1.25

У табели 8 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене нумеричком анализом, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 2$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 8 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) носача за [$\alpha = 2$]

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	124.50	153.01	183.09	210.14	226.45	239.64
		4×52	53	130.35	162.88	199.27	237.91	270.69	295.93
		8×58	118	134.86	170.41	209.46	254.28	294.04	325.72
		12×50	107	137.56	175.53	216.40	267.30	314.52	352.47
	16	неукрућен носач	-	182.34	203.93	228.34	244.60	257.26	269.15
		4×52	53	195.54	222.93	255.54	292.63	326.98	354.36
		8×58	118	203.19	232.97	269.04	309.85	347.08	375.89
		12×50	107	208.71	241.01	279.64	328.00	372.60	397.22
	24	неукрућен носач	-	229.61	241.42	254.82	267.49	279.94	292.36
		4×52	53	252.74	272.83	300.82	334.72	365.37	389.86
		8×58	118	263.20	285.02	317.06	353.33	385.92	410.40
		12×50	107	272.31	296.06	333.07	376.60	410.38	423.59
2	4	неукрућен носач	-	35.19	44.88	52.94	59.37	64.58	68.66
		2×42	95	38.13	48.61	59.50	69.78	79.22	87.53
		4×60	394	40.46	51.21	63.69	75.34	85.96	95.28
		6×54	395	41.53	52.90	68.12	82.25	94.72	104.98
	8	неукрућен носач	-	48.42	54.73	61.48	68.05	73.05	76.34
		2×42	95	51.76	60.02	70.17	80.51	90.44	99.55
		4×60	394	53.76	62.69	74.64	86.43	97.47	107.17
		6×54	395	55.26	65.11	79.87	94.49	107.54	118.19
	12	неукрућен носач	-	57.49	62.16	68.50	74.56	78.31	81.50
		2×42	95	62.51	69.46	79.12	89.33	99.39	108.36
		4×60	394	64.44	72.47	84.11	95.96	107.18	117.01
		6×54	395	65.56	75.87	90.35	105.18	118.30	128.94
1.25	2.5	неукрућен носач	-	15.01	19.68	22.55	24.76	26.61	28.18
		1.25×32	101	16.63	21.87	25.60	29.13	31.59	34.06
		2.5×40	291	16.47	22.04	25.76	29.11	32.53	35.98
		3.75×40	386	16.61	22.38	26.59	30.48	34.49	38.38
	5	неукрућен носач	-	20.28	23.16	25.49	27.71	29.99	31.54
		1.25×32	101	21.78	25.43	28.84	32.27	35.27	38.45
		2.5×40	291	21.98	25.70	29.36	32.93	36.60	40.20
		3.75×40	386	22.16	26.14	30.32	34.47	38.70	42.78
	7.5	неукрућен носач	-	23.32	25.38	27.50	29.73	32.08	33.38
		1.25×32	101	25.33	28.28	31.47	34.69	37.98	41.28
		2.5×40	291	25.51	28.63	32.17	35.79	39.57	43.27
		3.75×40	386	25.74	29.21	33.30	37.54	41.99	46.07

У табели 9 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$), за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 2$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

Табела 9 Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за [$\alpha = 2$].

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	124.50	153.01	183.09	210.14	226.45	239.64
		4×52	53	1.05	1.06	1.09	1.13	1.20	1.23
		8×58	118	1.08	1.11	1.14	1.21	1.30	1.36
		12×50	107	1.10	1.15	1.18	1.27	1.39	1.47
	16	неукрупњен носач	-	182.34	203.93	228.34	244.60	257.26	269.15
		4×52	53	1.07	1.09	1.12	1.20	1.27	1.32
		8×58	118	1.11	1.14	1.18	1.27	1.35	1.40
		12×50	107	1.14	1.18	1.22	1.34	1.45	1.48
	24	неукрупњен носач	-	229.61	241.42	254.82	267.49	279.94	292.36
		4×52	53	1.10	1.13	1.18	1.25	1.31	1.33
		8×58	118	1.15	1.18	1.24	1.32	1.38	1.40
		12×50	107	1.19	1.23	1.31	1.41	1.47	1.45
2	4	неукрупњен носач	-	35.19	44.88	52.94	59.37	64.58	68.66
		2×42	95	1.08	1.08	1.12	1.18	1.23	1.27
		4×60	394	1.15	1.14	1.20	1.27	1.33	1.39
		6×54	395	1.18	1.18	1.29	1.39	1.47	1.53
	8	неукрупњен носач	-	48.42	54.73	61.48	68.05	73.05	76.34
		2×42	95	1.07	1.10	1.14	1.18	1.24	1.30
		4×60	394	1.11	1.15	1.21	1.27	1.33	1.40
		6×54	395	1.14	1.19	1.30	1.39	1.47	1.55
	12	неукрупњен носач	-	57.49	62.16	68.50	74.56	78.31	81.50
		2×42	95	1.09	1.12	1.16	1.20	1.27	1.33
		4×60	394	1.12	1.17	1.23	1.29	1.37	1.44
		6×54	395	1.14	1.22	1.32	1.41	1.51	1.58
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	15.01	19.68	22.55	24.76	26.61	28.18
		1.25×32	101	1.11	1.11	1.13	1.18	1.19	1.21
		2.5×40	291	1.10	1.12	1.14	1.18	1.22	1.28
		3.75×40	386	1.11	1.14	1.18	1.23	1.30	1.36
	5	неукрупњен носач	-	20.28	23.16	25.49	27.71	29.99	31.54
		1.25×32	101	1.07	1.10	1.13	1.16	1.18	1.22
		2.5×40	291	1.08	1.11	1.15	1.19	1.22	1.27
		3.75×40	386	1.09	1.13	1.19	1.24	1.29	1.36
	7.5	неукрупњен носач	-	23.32	25.38	27.50	29.73	32.08	33.38
		1.25×32	101	1.09	1.11	1.14	1.17	1.18	1.24
		2.5×40	291	1.09	1.13	1.17	1.20	1.23	1.30
		3.75×40	386	1.10	1.15	1.21	1.26	1.31	1.38

У табели 10 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене нумеричком анализом, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 3$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 10 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) носача за [$\alpha = 3$]

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	121.27	147.61	172.67	190.45	202.52	212.73
		4×52	53	125.18	154.86	184.80	207.54	222.08	234.54
		8×58	118	128.83	160.83	194.27	224.10	242.32	255.72
		12×50	107	131.39	165.55	201.84	237.39	260.52	276.48
	16	неукрућен носач	-	179.73	200.29	221.08	234.17	244.30	253.07
		4×52	53	190.04	216.41	244.83	271.09	287.47	301.15
		8×58	118	196.55	224.61	256.82	289.74	314.58	330.13
		12×50	107	201.34	231.29	266.72	304.65	334.97	352.49
	24	неукрућен носач	-	223.97	233.80	245.08	255.01	264.10	272.27
		4×52	53	246.13	265.30	289.25	308.05	322.58	336.01
		8×58	118	255.39	276.90	305.91	335.19	357.51	372.78
		12×50	107	262.57	285.43	318.22	353.25	378.64	392.89
2	4	неукрућен носач	-	33.66	41.95	47.47	51.10	54.20	57.04
		2×42	95	34.86	43.59	50.32	55.00	59.01	62.62
		4×60	394	37.68	47.66	57.35	65.00	71.22	76.41
		6×54	395	38.37	49.01	60.36	69.65	77.11	82.98
	8	неукрућен носач	-	47.18	52.58	57.69	61.86	64.91	67.38
		2×42	95	49.52	56.52	64.66	71.64	77.62	82.64
		4×60	394	51.37	59.24	68.58	77.33	85.18	92.18
		6×54	395	51.38	61.09	72.07	82.42	91.67	99.46
	12	неукрућен носач	-	55.49	59.18	63.55	67.05	69.68	72.01
		2×42	95	60.81	66.46	74.65	82.34	88.82	93.93
		4×60	394	62.22	68.78	77.83	86.82	95.22	102.85
		6×54	395	63.71	71.22	81.98	92.62	102.32	110.65
1.25	2.5	неукрућен носач	-	14.05	17.72	19.43	20.70	21.88	22.98
		1.25×32	101	14.36	18.07	19.77	21.10	22.36	23.58
		2.5×40	291	16.01	20.42	22.70	24.32	25.77	27.13
		3.75×40	386	16.42	21.34	24.73	27.05	28.68	30.23
	5	неукрућен носач	-	19.78	22.25	24.04	25.53	26.85	27.92
		1.25×32	101	20.34	23.58	26.23	28.27	29.92	31.30
		2.5×40	291	21.07	24.48	27.60	30.56	33.32	35.03
		3.75×40	386	21.32	24.88	28.26	31.56	34.80	37.85
	7.5	неукрућен носач	-	22.62	24.26	25.81	27.26	28.60	29.67
		1.25×32	101	24.27	26.95	29.70	31.95	33.66	35.08
		2.5×40	291	24.75	27.54	30.50	33.52	36.62	39.61
		3.75×40	386	24.97	27.91	31.17	34.53	37.90	41.20

У табели 11 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$), за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 3$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

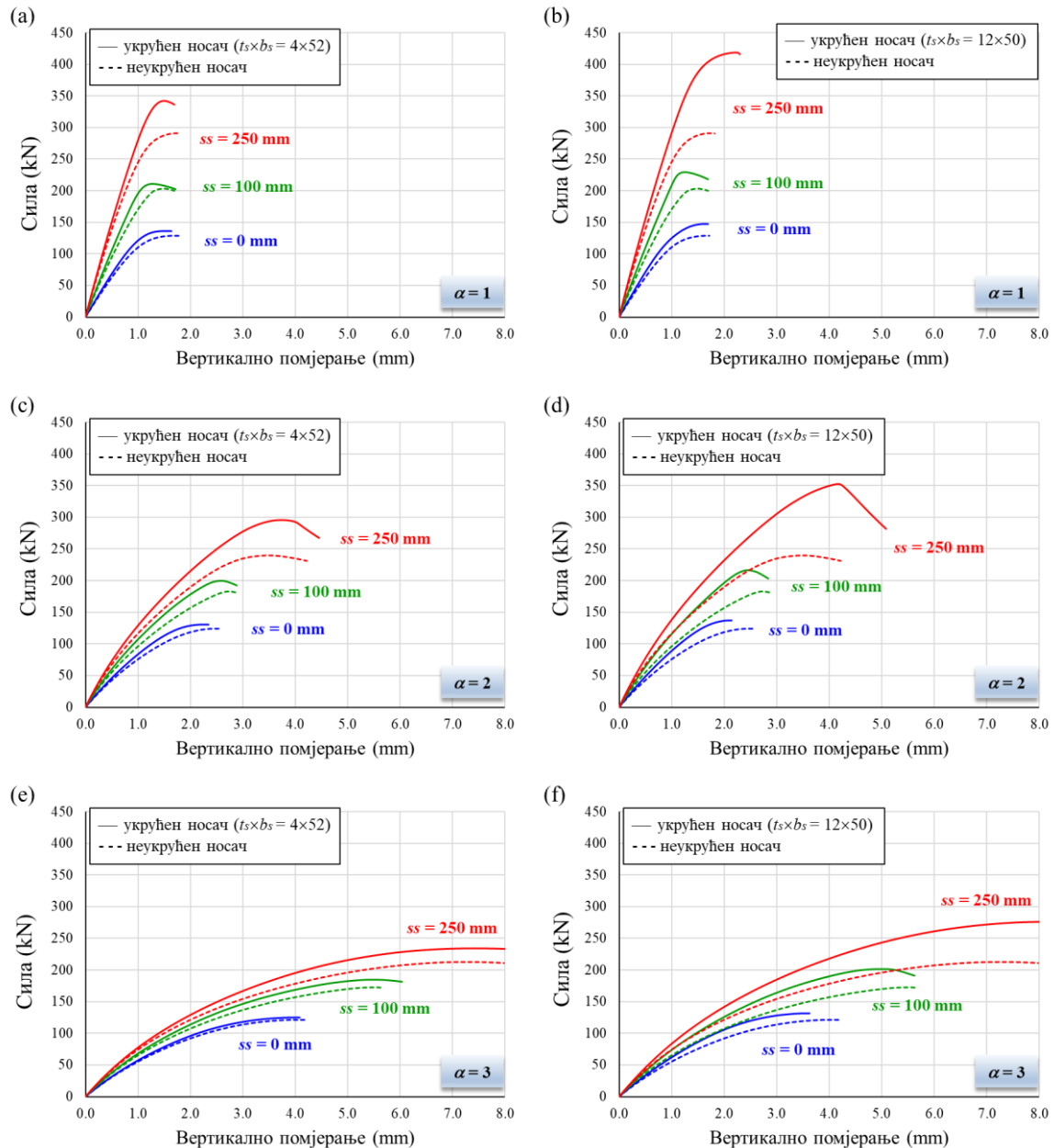
Табела 11 Ефекат ојачања подужно укрупњених носача ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) за [$\alpha = 2$].

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	121.27	147.61	172.67	190.45	202.52	212.73
		4×52	53	1.03	1.05	1.07	1.09	1.10	1.10
		8×58	118	1.06	1.09	1.13	1.18	1.20	1.20
		12×50	107	1.08	1.12	1.17	1.25	1.29	1.30
	16	неукрупњен носач	-	179.73	200.29	221.08	234.17	244.30	253.07
		4×52	53	1.06	1.08	1.11	1.16	1.18	1.19
		8×58	118	1.09	1.12	1.16	1.24	1.29	1.30
		12×50	107	1.12	1.15	1.21	1.30	1.37	1.39
	24	неукрупњен носач	-	223.97	233.80	245.08	255.01	264.10	272.27
		4×52	53	1.10	1.13	1.18	1.21	1.22	1.23
		8×58	118	1.14	1.18	1.25	1.31	1.35	1.37
		12×50	107	1.17	1.22	1.30	1.39	1.43	1.44
2	4	неукрупњен носач	-	33.66	41.95	47.47	51.10	54.20	57.04
		2×42	95	1.04	1.04	1.06	1.08	1.09	1.10
		4×60	394	1.12	1.14	1.21	1.27	1.31	1.34
		6×54	395	1.14	1.17	1.27	1.36	1.42	1.45
	8	неукрупњен носач	-	47.18	52.58	57.69	61.86	64.91	67.38
		2×42	95	1.05	1.07	1.12	1.16	1.20	1.23
		4×60	394	1.09	1.13	1.19	1.25	1.31	1.37
		6×54	395	1.09	1.16	1.25	1.33	1.41	1.48
	12	неукрупњен носач	-	55.49	59.18	63.55	67.05	69.68	72.01
		2×42	95	1.10	1.12	1.17	1.23	1.27	1.30
		4×60	394	1.12	1.16	1.22	1.29	1.37	1.43
		6×54	395	1.15	1.20	1.29	1.38	1.47	1.54
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	14.05	17.72	19.43	20.70	21.88	22.98
		1.25×32	101	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03
		2.5×40	291	1.14	1.15	1.17	1.17	1.18	1.18
		3.75×40	386	1.17	1.20	1.27	1.31	1.31	1.32
	5	неукрупњен носач	-	19.78	22.25	24.04	25.53	26.85	27.92
		1.25×32	101	1.03	1.06	1.09	1.11	1.11	1.12
		2.5×40	291	1.07	1.10	1.15	1.20	1.24	1.25
		3.75×40	386	1.08	1.12	1.18	1.24	1.30	1.36
	7.5	неукрупњен носач	-	22.62	24.26	25.81	27.26	28.60	29.67
		1.25×32	101	1.07	1.11	1.15	1.17	1.18	1.18
		2.5×40	291	1.09	1.14	1.18	1.23	1.28	1.34
		3.75×40	386	1.10	1.15	1.21	1.27	1.33	1.39

3.4.1.2 Графички преглед резултата нумеричке анализе

Дијаграми сила помјерање за носаче ($t_w = 4$, $t_f = 8$)

На слици 25 су дати дијаграми сила - вертикално помјерање (вертикално помјерање горњег појаса у средњем пресеку ребра) за носаче са дебелином ребра $t_w = 4$ mm, дебелином појаса $t_f = 8$ mm. Приказане су дијаграми подужно неукрућених и укрућених носача (најслабије и најјаче укрућење) за дужине наносења оптерећења $s_s = 0, 100, 250$, за све односе дужине и ширине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, \alpha = 2$ и $\alpha = 3$).

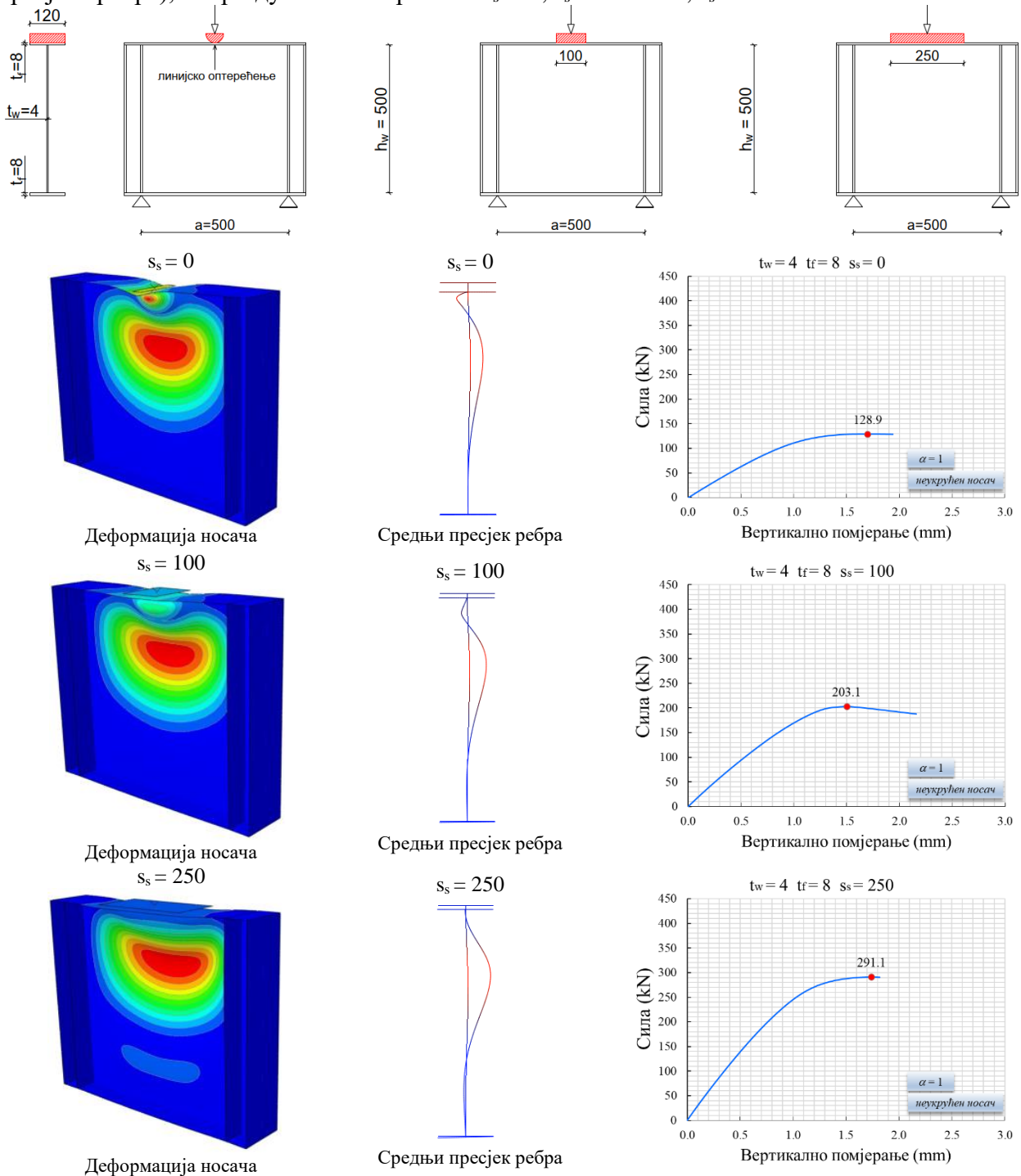


Слика 25 Дијаграми сила-вертикално помјерање за неукрућене носаче и укрућене носаче (a) $t_s \times b_s = 4 \times 52$, $\alpha = 1$, (b) $t_s \times b_s = 12 \times 50$, $\alpha = 1$, (c) $t_s \times b_s = 4 \times 52$, $\alpha = 2$, (d) $t_s \times b_s = 12 \times 50$, $\alpha = 2$, (e) $t_s \times b_s = 4 \times 52$, $\alpha = 3$, (f) $t_s \times b_s = 12 \times 50$, $\alpha = 3$

Са дијаграма се може примјетити да са повећањем распона носача долази до смањења граничне носивости и до знатног повећања вертикалног помјерања при достизању граничног оптерећења.

Деформација и гранична носивост неукрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 1$)

На слици 26 су разматрани подужно неукрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 1$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm и дебљина појаса $t_f = 8$ mm. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – вертикално помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.

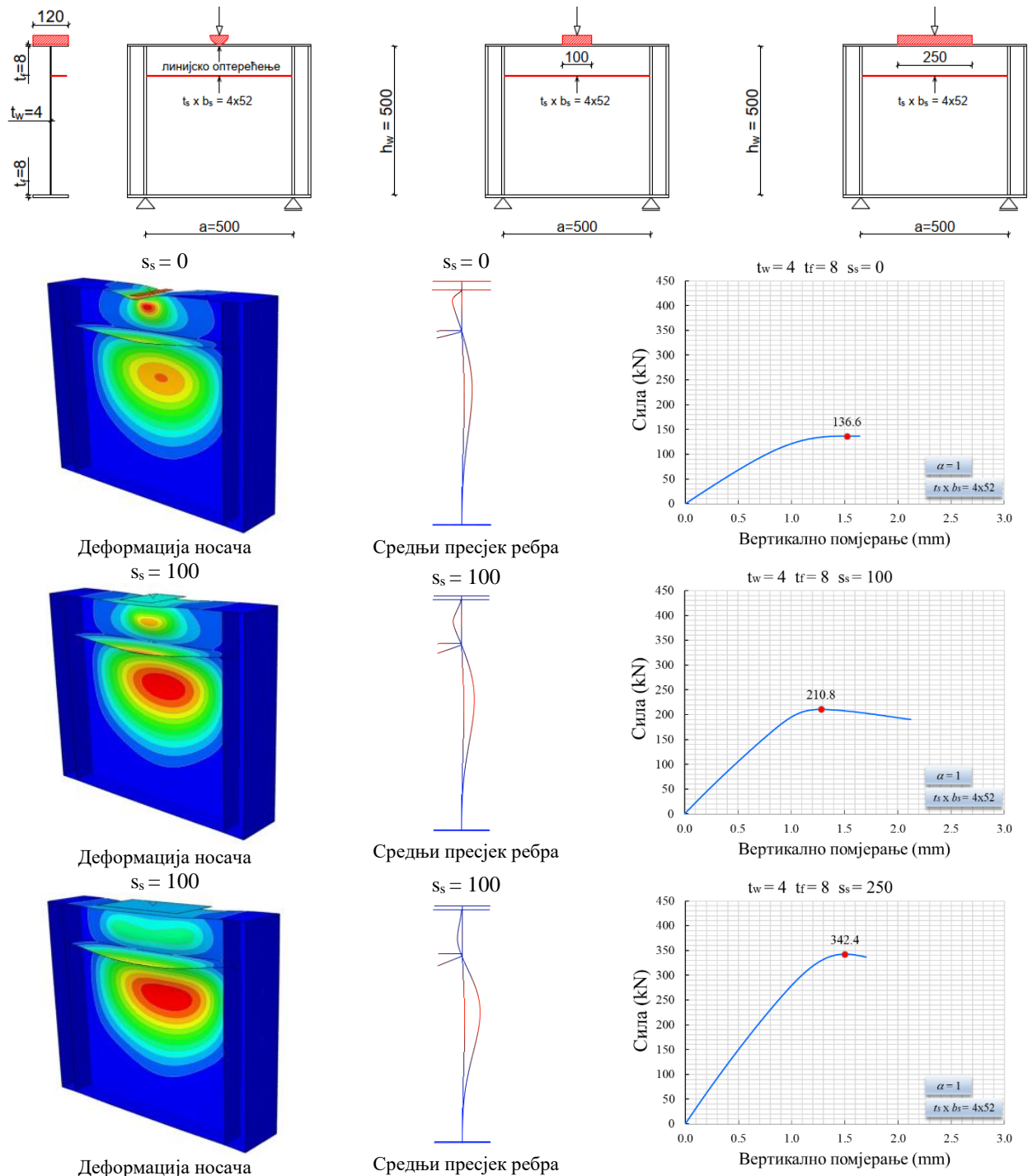


Слика 26 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$ ($\alpha = 1$)

Може се примијетити да са порастом дужине оптерећења долази до повећања граничне носивости и до промјене облика деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости.

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 1$)

На слици 27 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 1$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 4 \times 52$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.

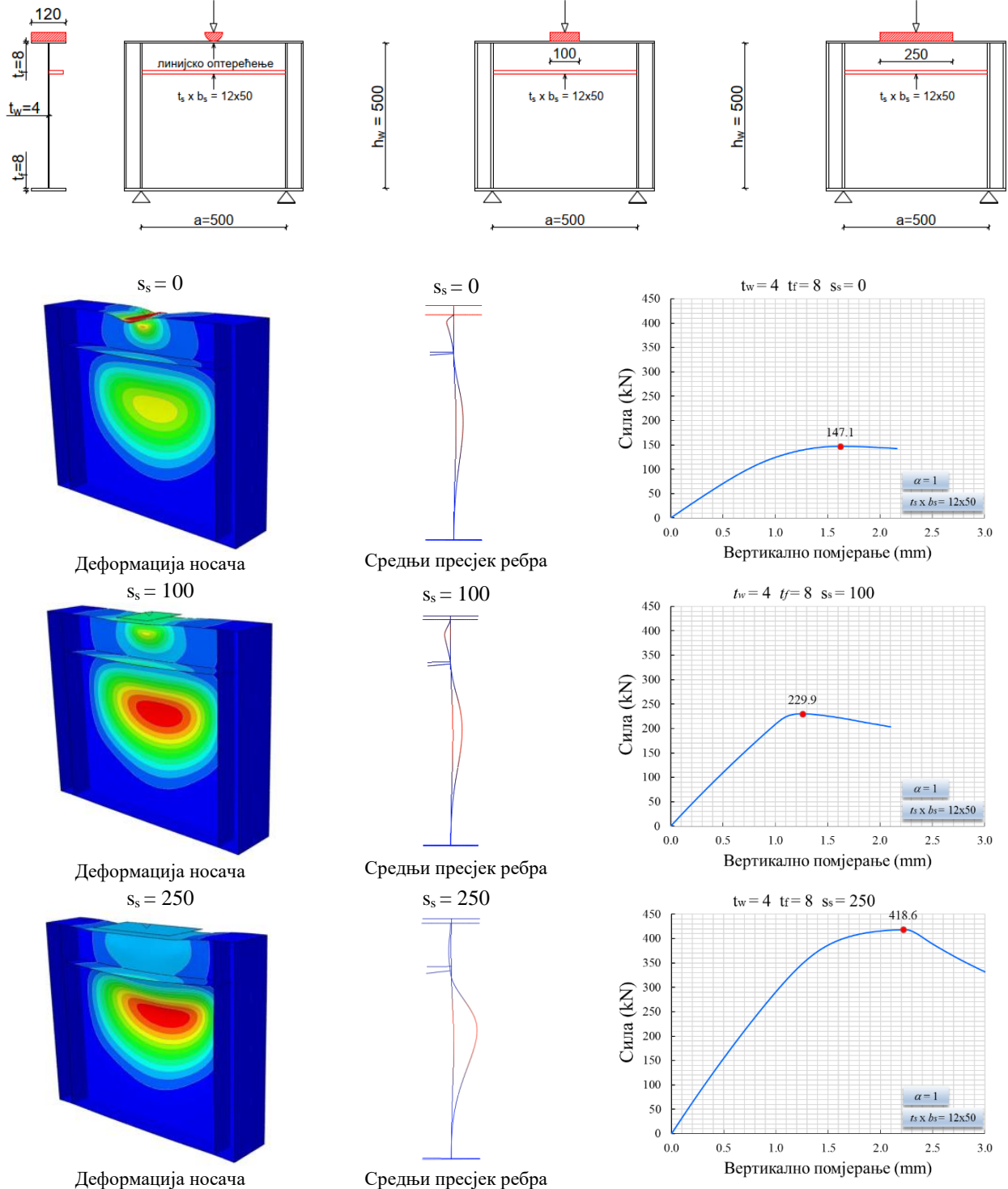


Слика 27 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s b_s = 4 \times 52$ ($\alpha = 1$)

Може се примијетити да са порастом дужине оптерећења долази до повећања граничне носивости. Облик деформације средњег пресека ребра је сличан за мале и велике дужине локалног оптерећења.

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 1$)

На слици 28 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 1$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 12 \times 52$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.

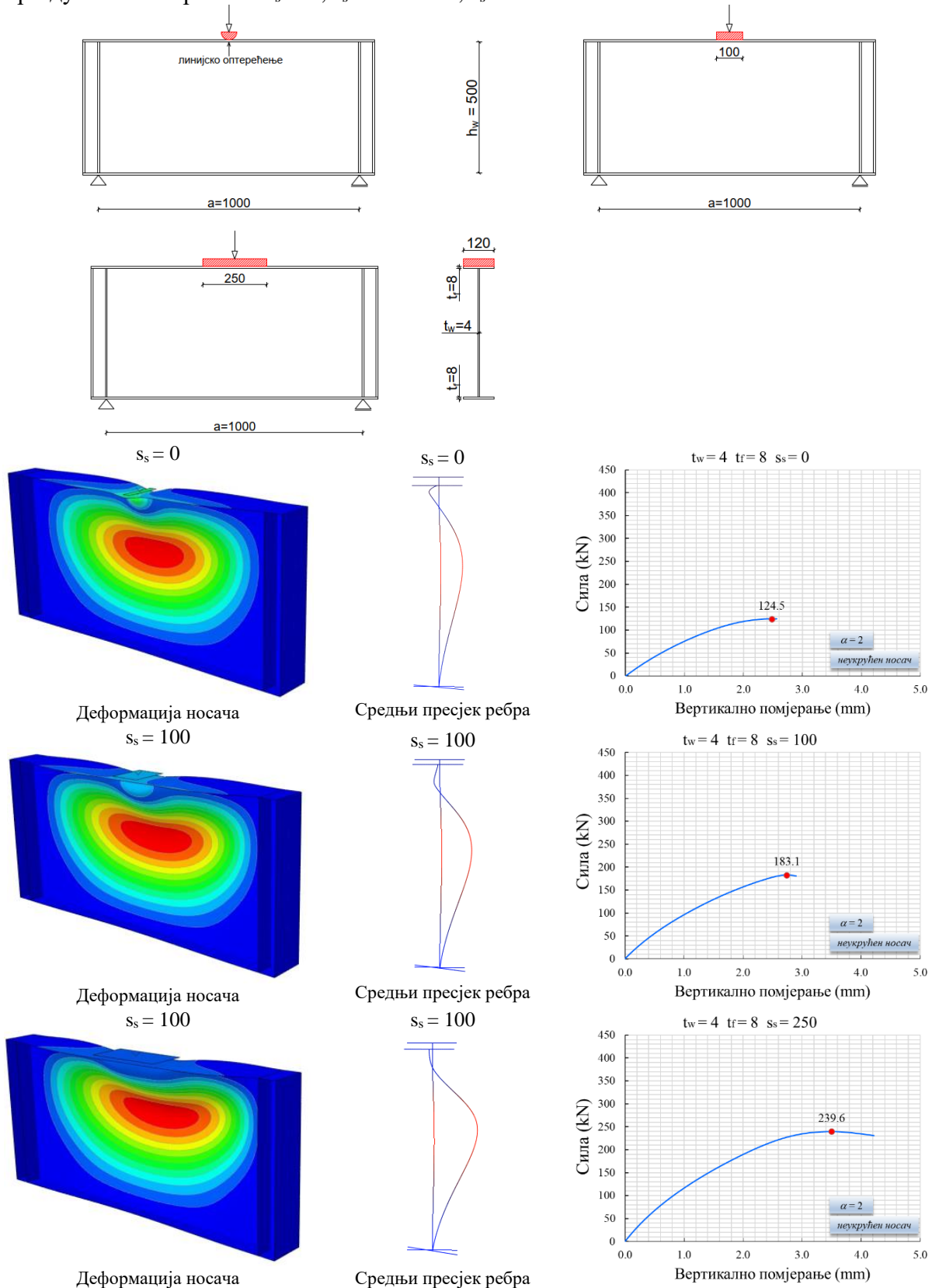


Слика 28 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s \times b_s = 12 \times 50$ ($\alpha = 1$)

Може се примети да са порастом дужине оптерећења долази до повећања граничне носивости. Облик деформације средњег пресека ребра је сличан за мале и велике дужине локалног оптерећења.

Деформација и гранична носивост неукрућеног носача ($t_w = 4, t_f = 8, \alpha = a / h_w = 2$)

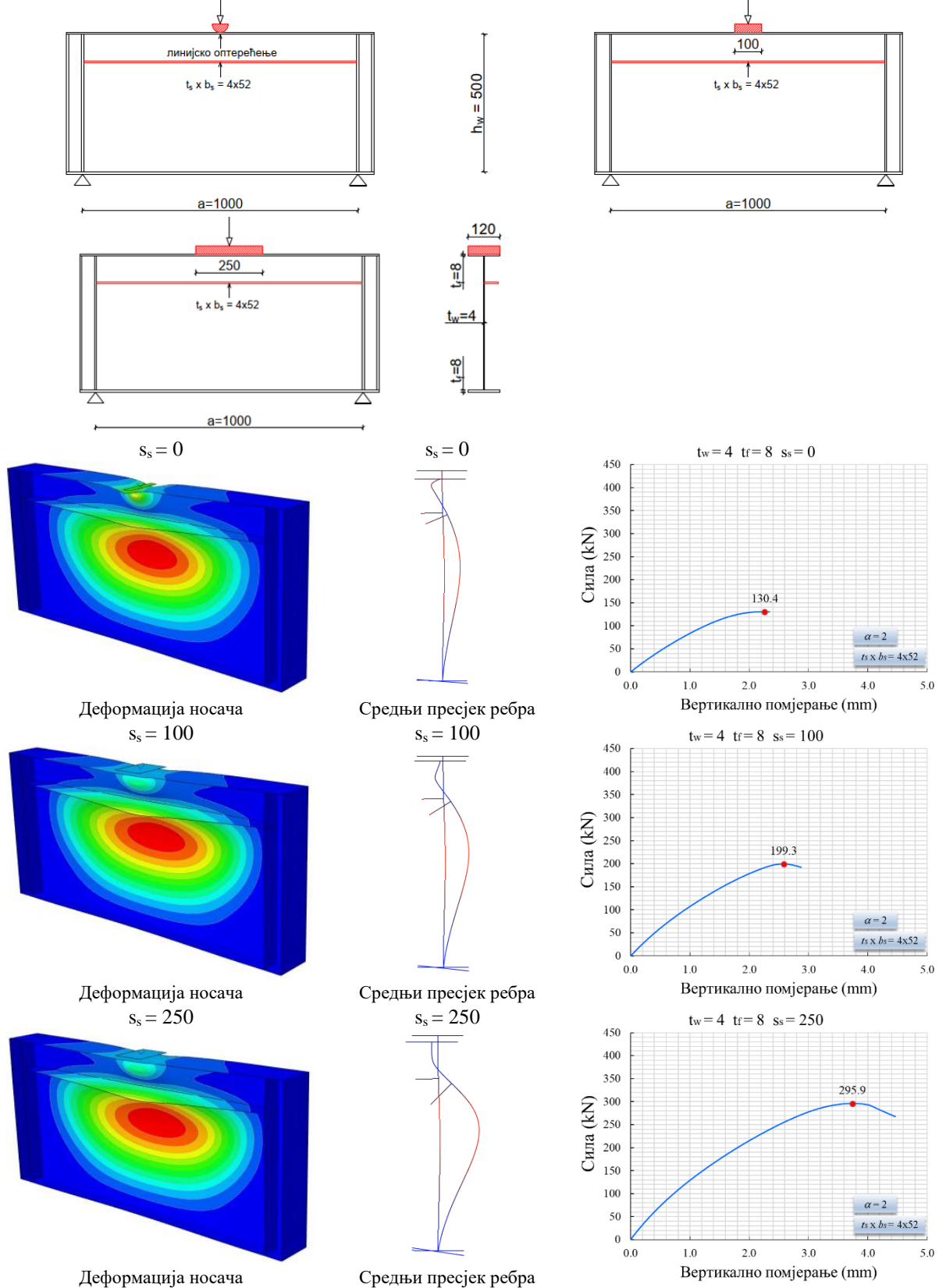
На слици 29 су разматрани подужно неукрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 2$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm,. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0, s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.



Слика 29 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w=4, t_f=8, (\alpha=2)$

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 2$)

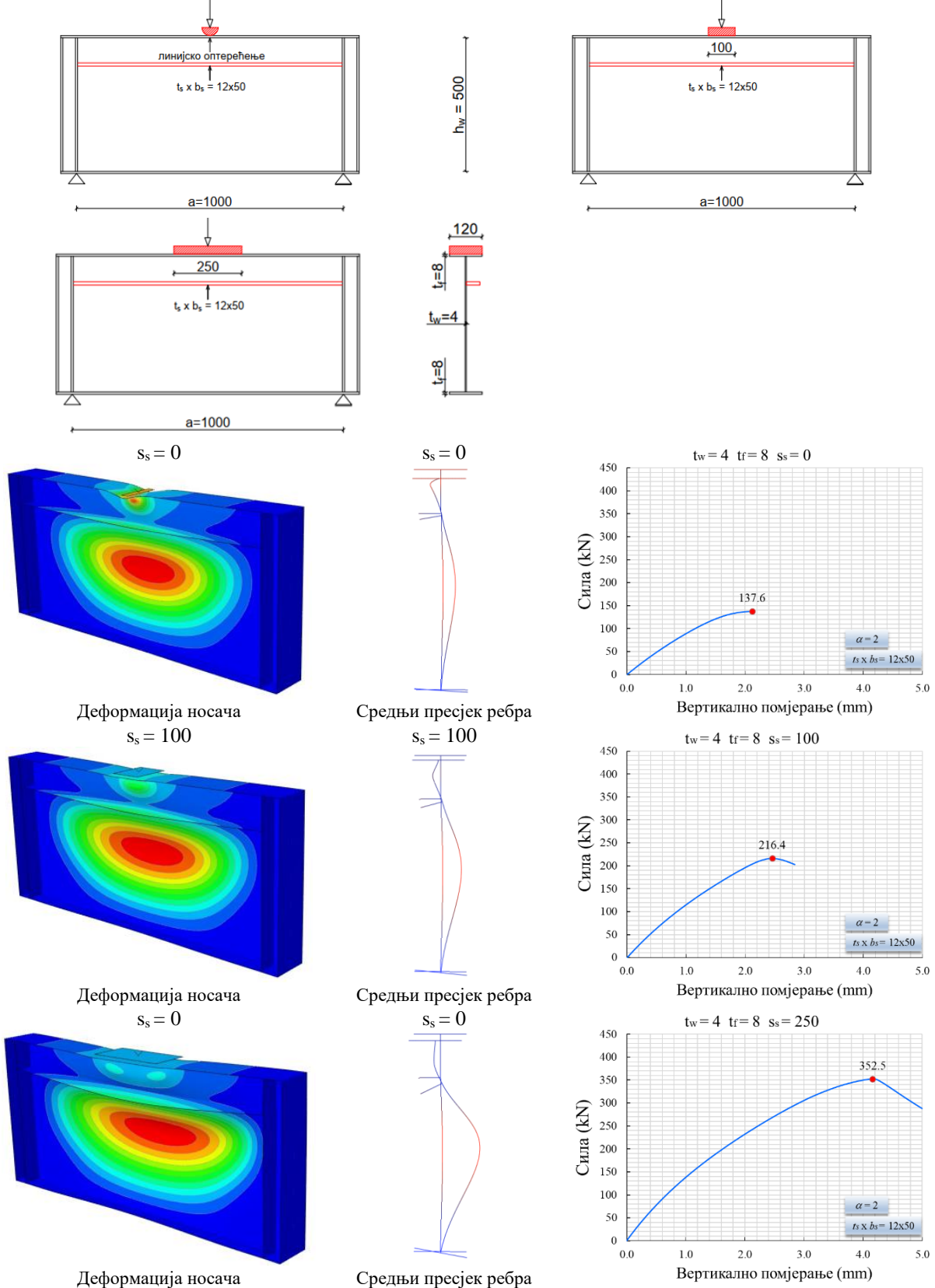
На слици 30 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 2$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 4 \times 52$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.



Слика 30 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s \times b_s = 4 \times 52$ ($\alpha = 2$)

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 2$)

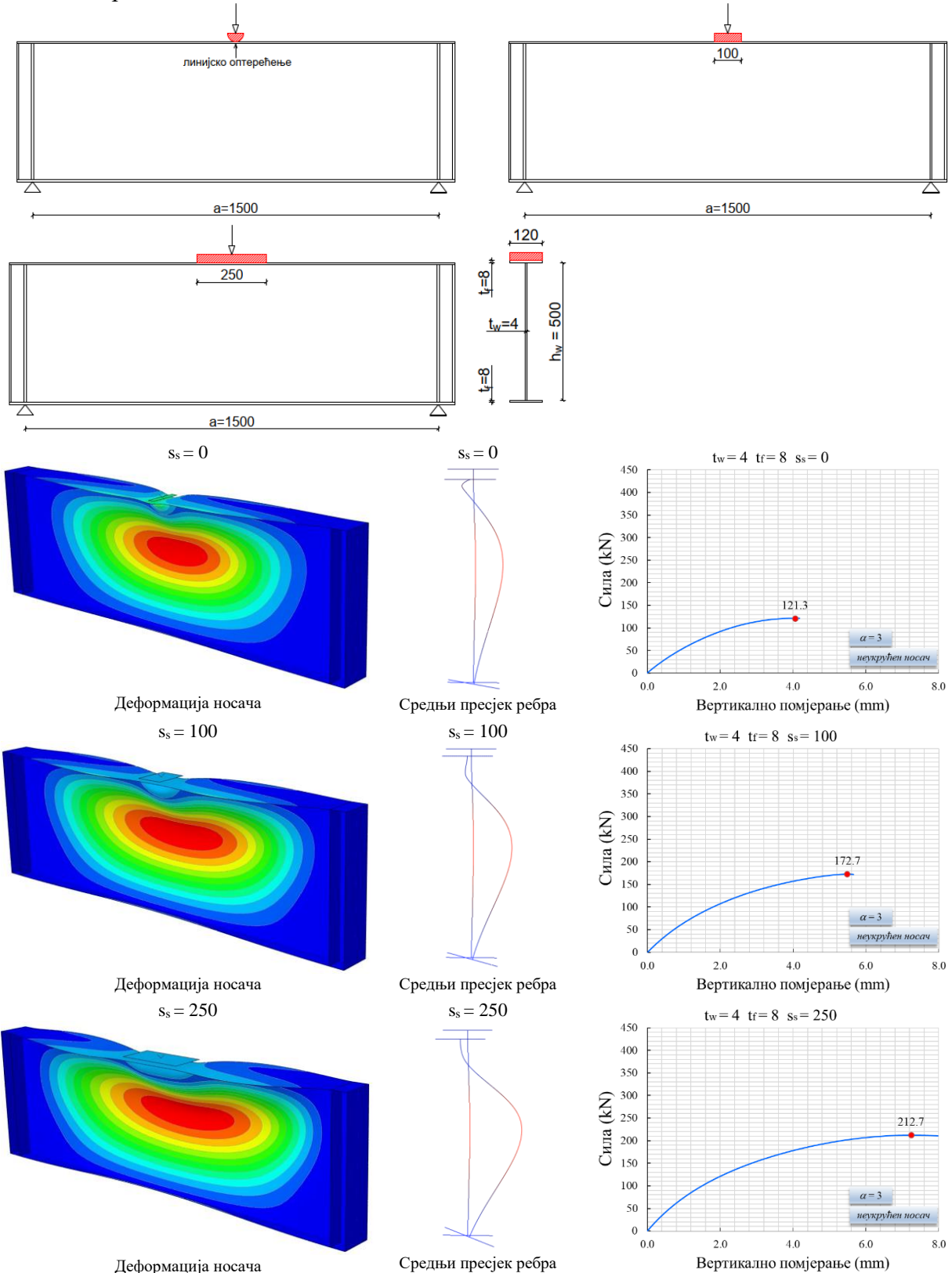
На слици 31 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 2$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 12 \times 50$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.



Слика 31 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s \times b_s = 12 \times 50$ ($\alpha = 2$)

Деформација и гранична носивост неукрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 3$)

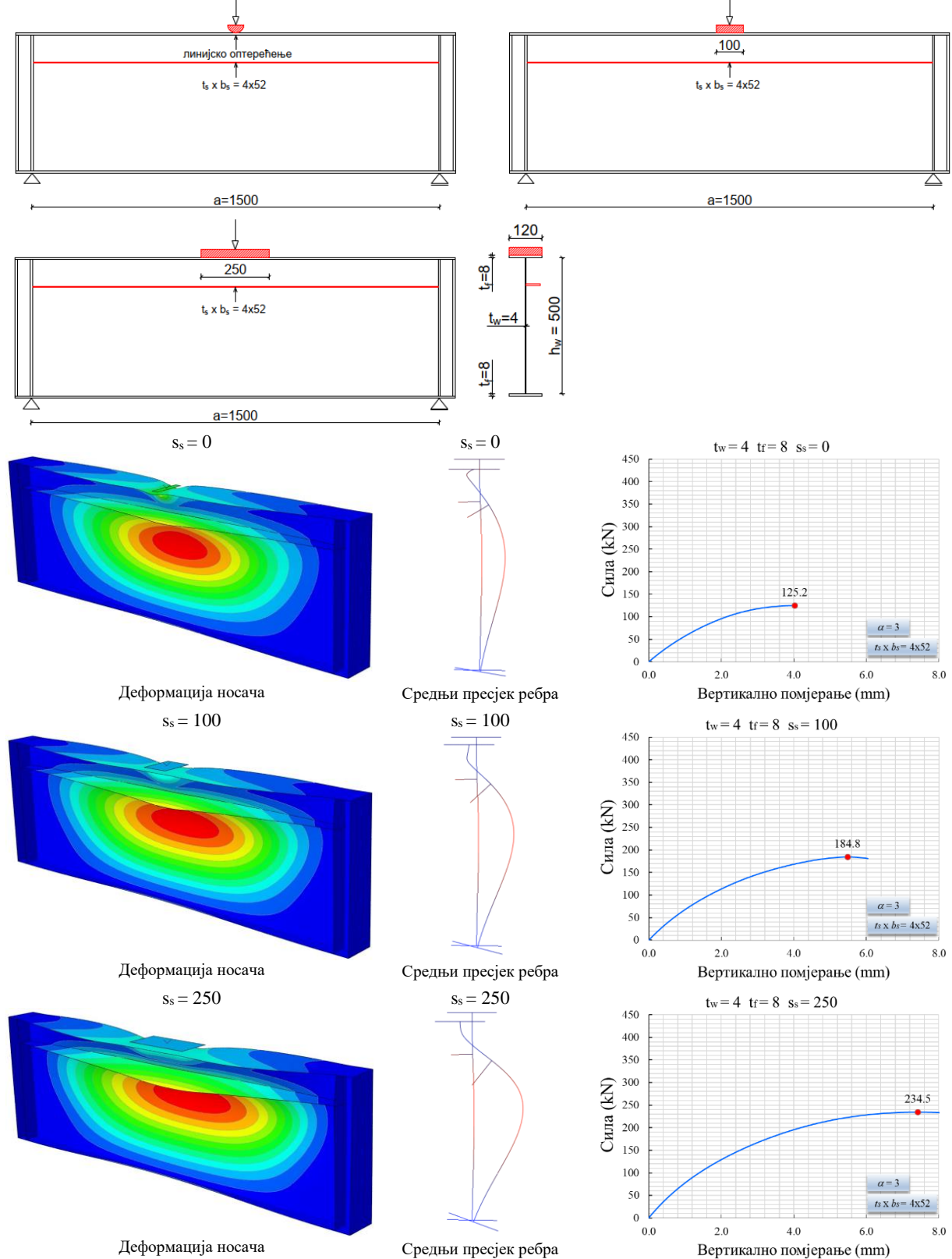
На слици 32 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 3$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.



Слика 32 Деформације и гранична носивост неукрућеног носача $t_w=4$, $t_f=8$ ($\alpha=3$)

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$, $\alpha = a / h_w = 3$)

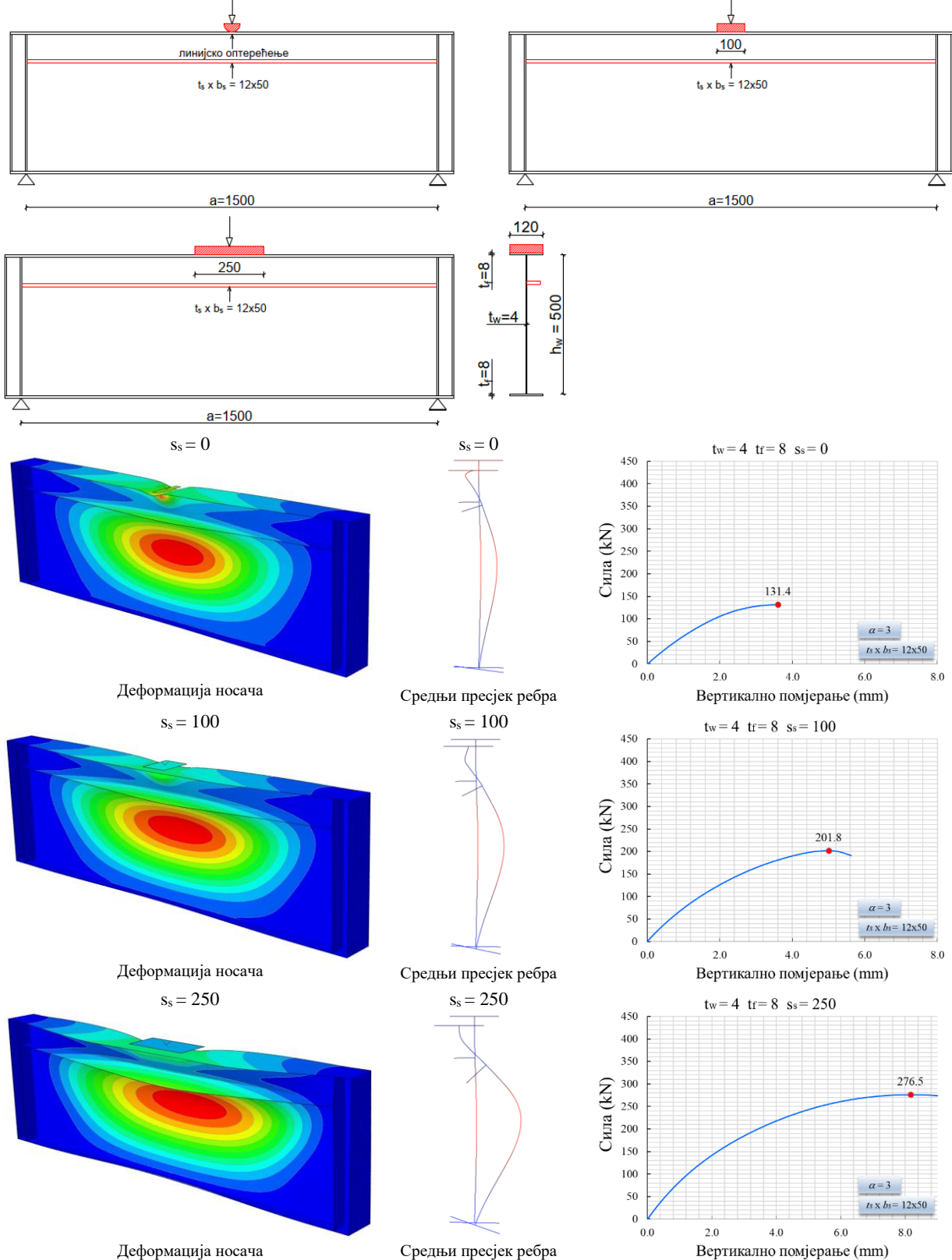
На слици 33 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 3$, дебљина ребра $t_w = 4$ mm, дебљина појаса $t_f = 8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 4 \times 52$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm



Слика 33 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w = 4$, $t_f = 8$, $t_s \times b_s = 4 \times 52$ ($\alpha = 3$)

Деформација и гранична носивост укрућеног носача ($t_w=4$, $t_f=8$, $\alpha = a / h_w=3$)

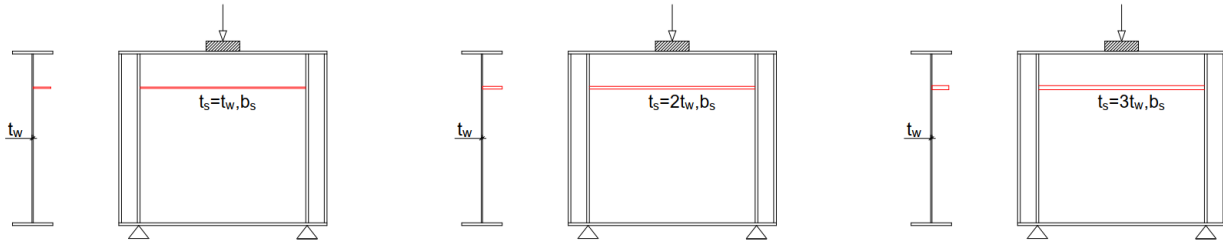
На слици 34 су разматрани подужно укрућени носачи следећих карактеристика: дужина оптерећеног панела ребра $\alpha = 3$, дебљина ребра $t_w=4$ mm, дебљина појаса $t_f=8$ mm, подужно укрућење $t_s \times b_s = 12 \times 50$. Приказане су деформације носача и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости као и дијаграми сила – помјерање (горњег појаса средњег пресека ребра), за три дужине оптерећења $s_s = 0$, $s_s = 100$ mm, $s_s = 250$ mm.



Слика 34 Деформације и гранична носивост укрућеног носача $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s \times b_s=12 \times 50$ ($\alpha=3$)

3.4.2 УТИЦАЈ КРУТОСТИ УКРУЋЕЊА НА ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ И ЕФЕКАТ ОЈАЧАЊА

У овом истраживању су разматрана по 3 укрућења за све разматране дебљине ребра и за све односе дужине и висине оптерећеног панела. Дебљина укрућења је одабрана тако да је однос $t_s / t_w = 1, 2$ и 3 . Ширина разматраних укрућења b_s је усвојена на основу претходно спроведене анализе конвергенције (3.3.1).



Слика 35 Варирана дебљина подужног укрућења

Подужна укрућења имају значајан утицај на повећање граничне носивости. Утицај подужних укрућења на граничну носивост носача је приказан кроз *ефекат ојачања* (*strengthening effect*) који представља однос граничне носивости подужно укрућених и подужно неукрућених носача.

Као што се може примијетити у табелама 7, 9 и 11, ефекат ојачања зависи од релативне крутости подужног укрућења, односа дужине и висине оптерећеног ребра, дужине оптерећења и крутости оптерећеног појаса.

Важећи европски стандард EN 1993-1-5 дефинише процедуру за одређивање граничне носивости подужно неукрућених и укрућених носача оптерећених локалним оптерећењем.

Израз за ефективну дужину оптерећења (2.4.3) је исти за подужно укрућене и неукрућене носаче и не узима у обзир утицај подужних укрућења на ефективну дужину, тако да је ефекат ојачања израчунат на основу ових препорука константан.

Утицај подужног укрућења је укључен кроз коефицијент избочавања k'_F (2.4.10) и не зависи од дужине оптерећења, дебљине појаса и односа дужине и висине оптерећеног панела ребра.

Подужна укрућења носача, који су анализирана у овом раду, су равна укрућења, налазе се на растојању од $b_I = 100 \text{ mm}$ ($b_I = 0.2h_w$) у односу на горњи појас а димензије укрућења су одређене на основу претходно спроведене анализе конвергенције (поглавље 3.3.1).

Изабране димензије укрућења дају $\sim 90 \%$ максималног повећања носивости а поређењем њихове крутости са граничним крутостима на основу (2.4.9) коришћена укрућења се могу класификовати као *слаба* или *јака*, у зависности од тога да ли су мања или већа у односу на γ^* . (табела 2)

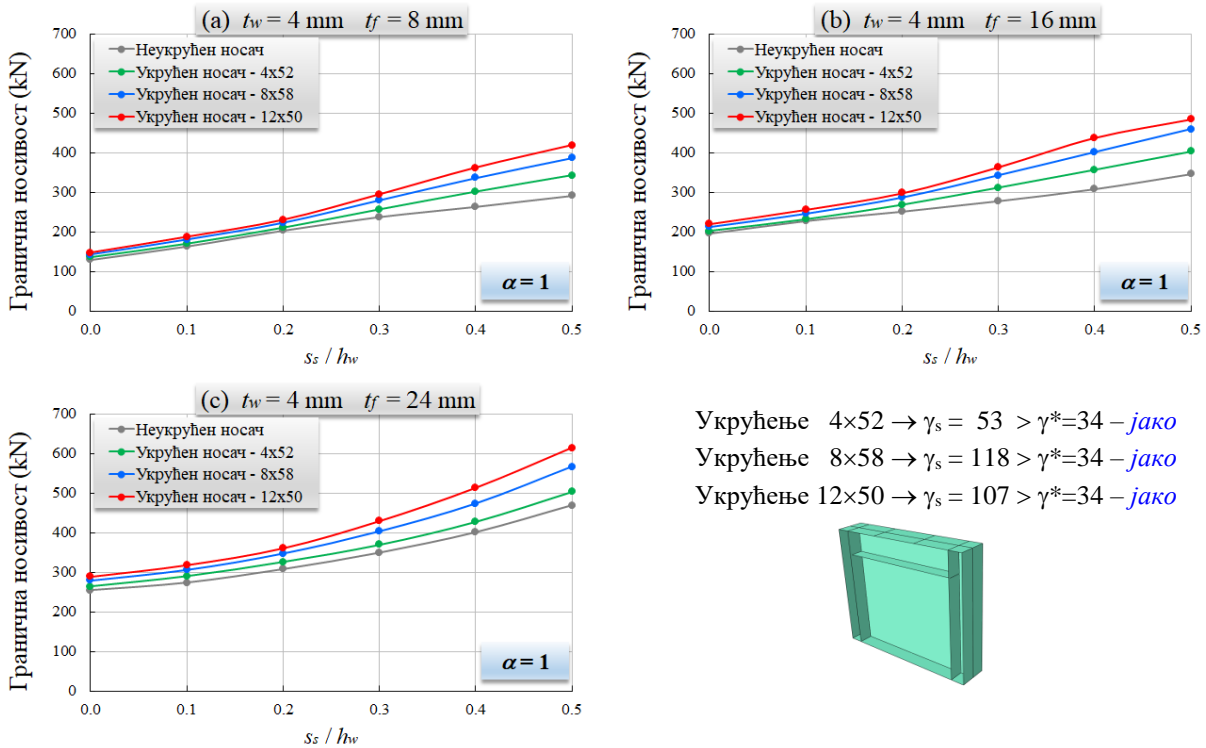
За све разматране односе дужине и висине оптерећеног панела ребра $\alpha = 1, 2, 3$ као и за све дебљине појаса ($t_f = 2t_w$, $t_f = 4t_w$ и $t_f = 6t_w$), гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача дата је као функција дужине оптерећења на сликама 34 - 42.

Дијаграми ефеката ојачања у функцији дужине оптерећења за носаче дебљине ребра $t_w = 4 \text{ mm}$ са приказом процентуалног повећања ефекта ојачања услед коришћења укрућења различитих крутости су приказани на сликама 43-45.

Дијаграми ефеката ојачања у функцији дужине оптерећења за све носаче су дати у прилогу А.

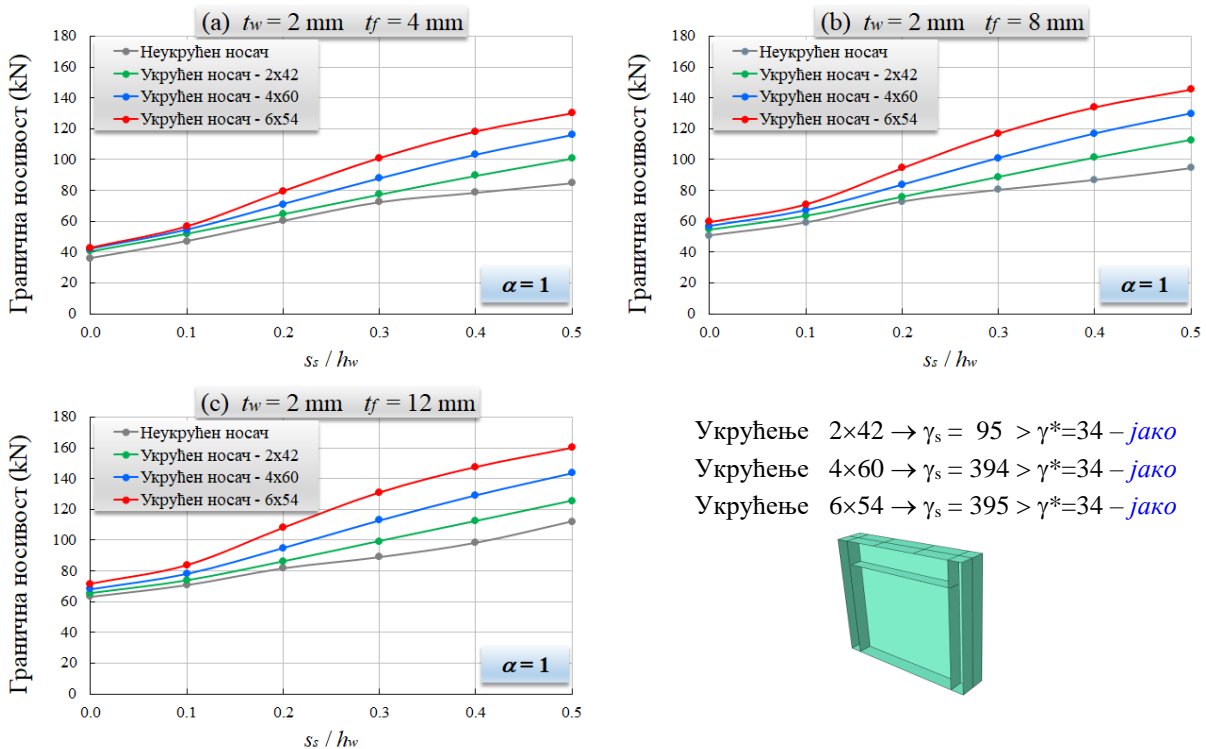
3.4.2.1 Дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења

На слици 36 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=1$, дебљину ребра $t_w = 4 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



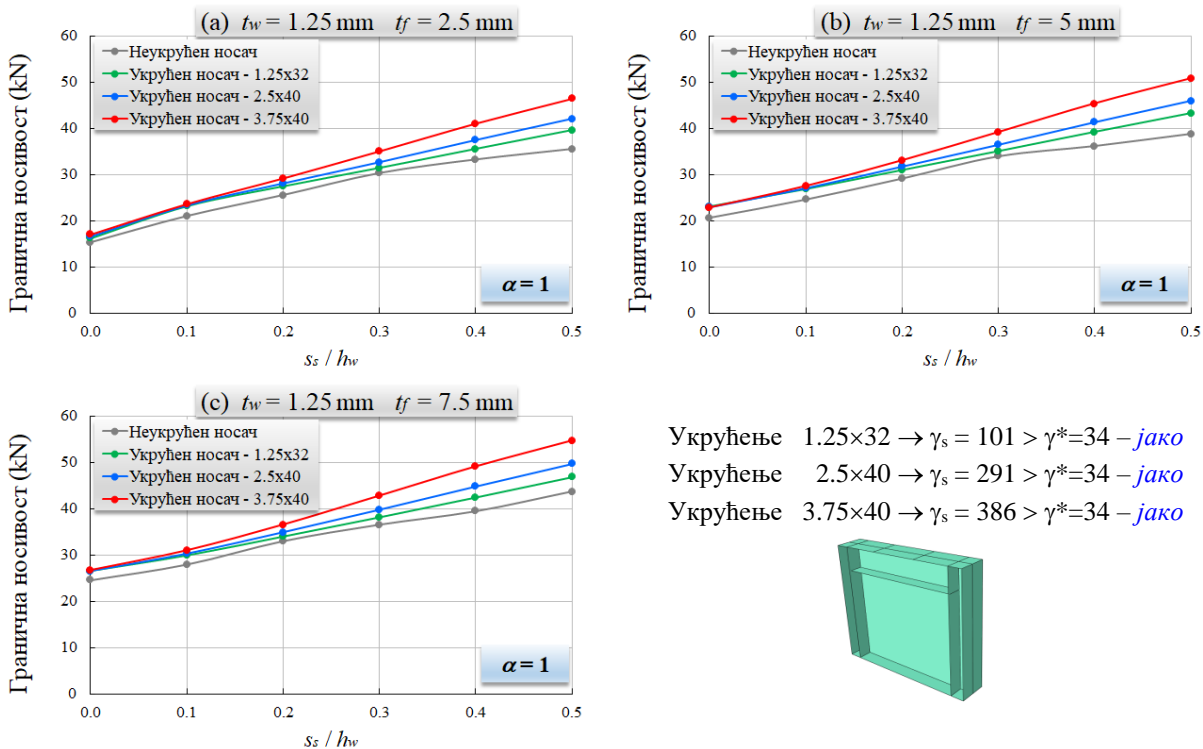
Слика 36 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 4 \text{ mm}$, (a) $t_f = 8 \text{ mm}$, (b) $t_f = 16 \text{ mm}$, (c) $t_f = 24 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 37 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=1$, дебљину ребра $t_w = 2 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



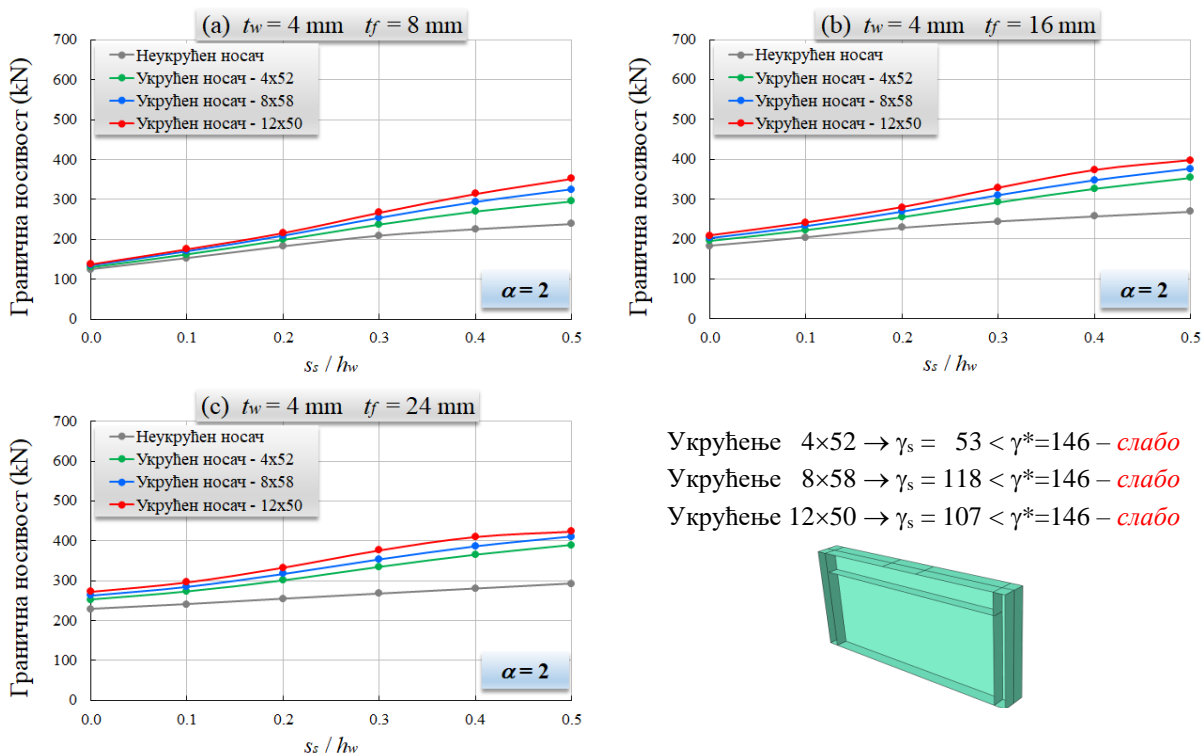
Слика 37 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 2 \text{ mm}$, (a) $t_f = 4 \text{ mm}$, (b) $t_f = 8 \text{ mm}$, (c) $t_f = 12 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 38 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=1$, дебљину ребра $t_w = 1.25 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



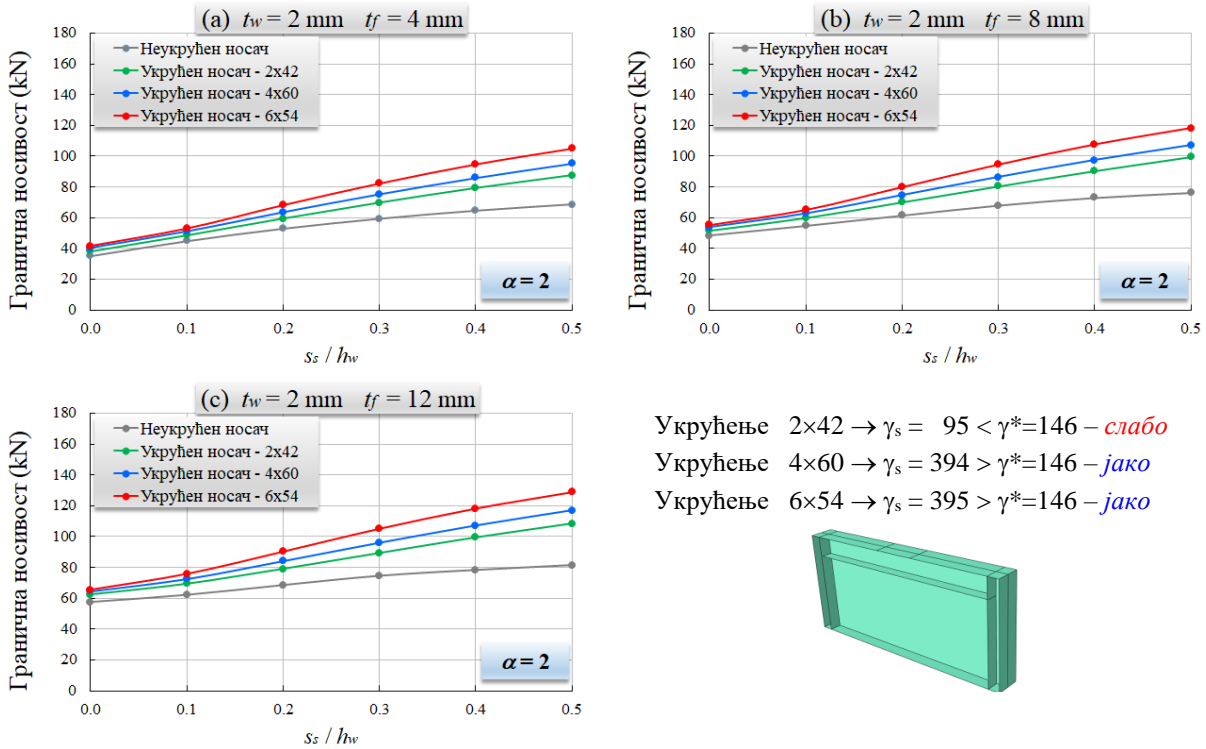
Слика 38 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 1$, $t_w = 1.25 \text{ mm}$, (a) $t_f = 2.5 \text{ mm}$, (b) $t_f = 5 \text{ mm}$, (c) $t_f = 7.5 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 39 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=2$, дебљину ребра $t_w = 4 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



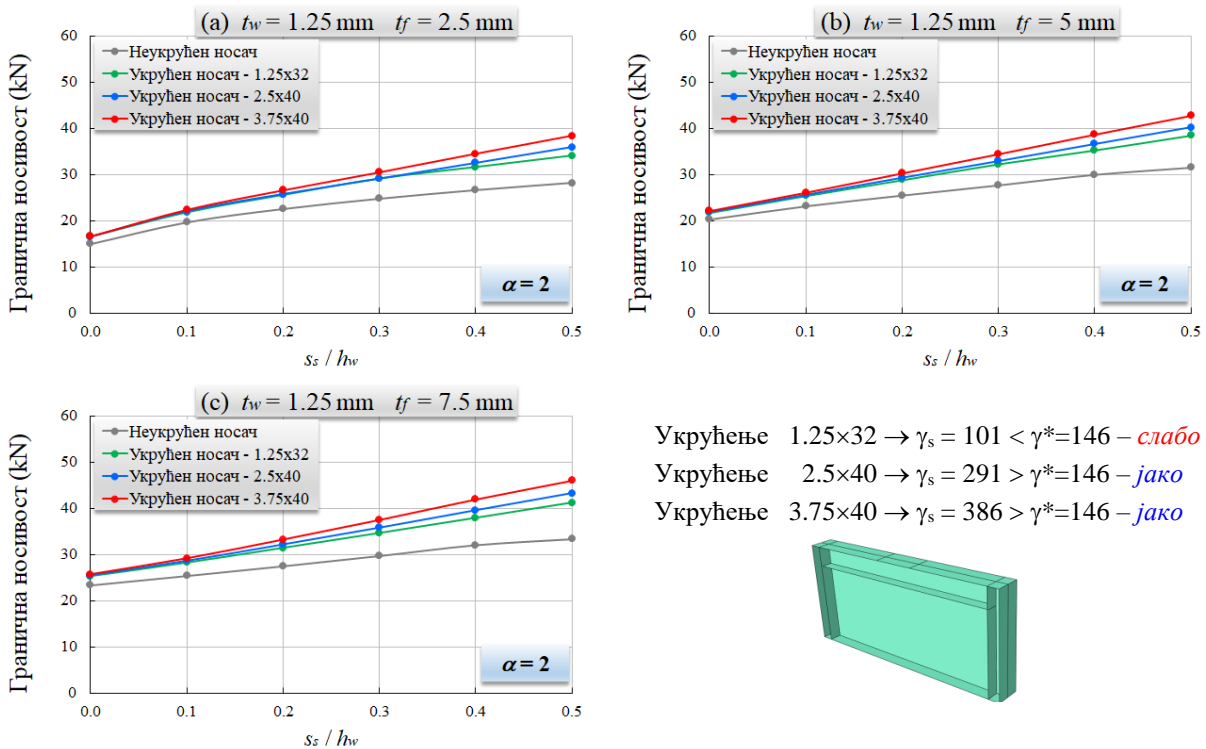
Слика 39 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 4 \text{ mm}$, (a) $t_f = 8 \text{ mm}$, (b) $t_f = 16 \text{ mm}$, (c) $t_f = 24 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 40 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=2$, дебљину ребра $t_w = 2 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



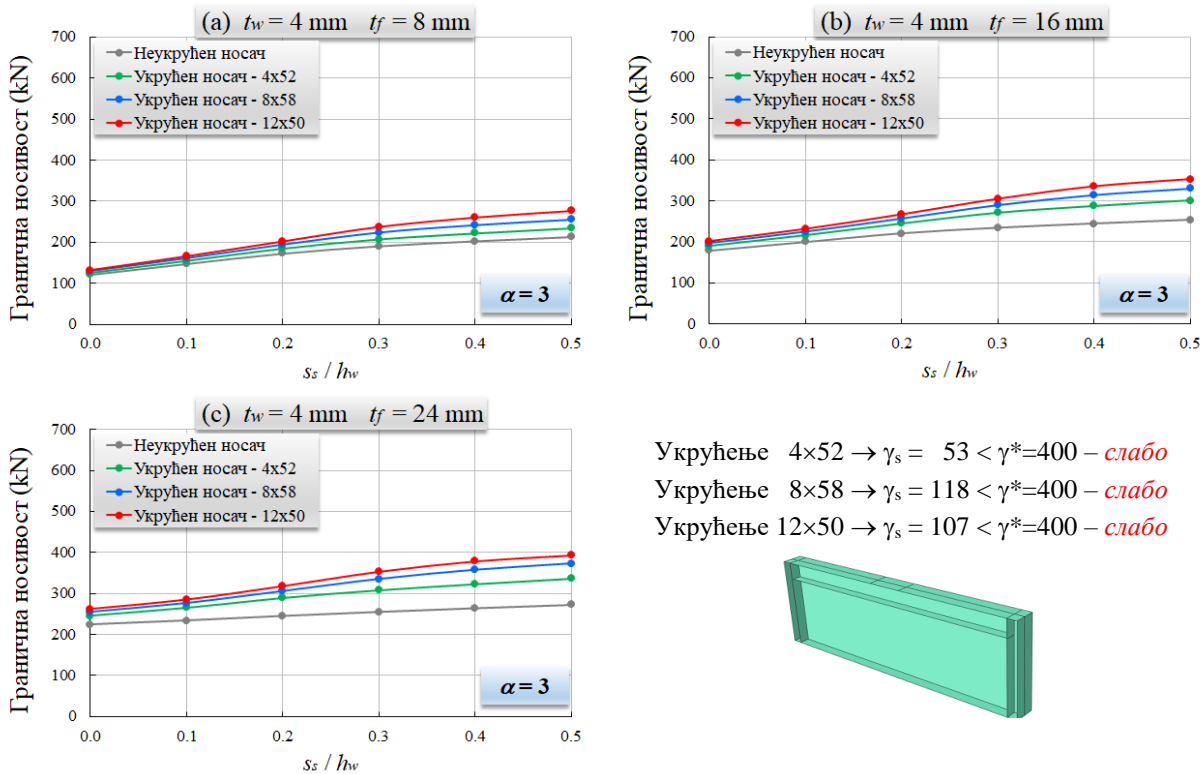
Слика 40 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 2 \text{ mm}$, (a) $t_f = 4 \text{ mm}$, (b) $t_f = 8 \text{ mm}$, (c) $t_f = 12 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 41 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=2$, дебљину ребра $t_w = 1.25 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



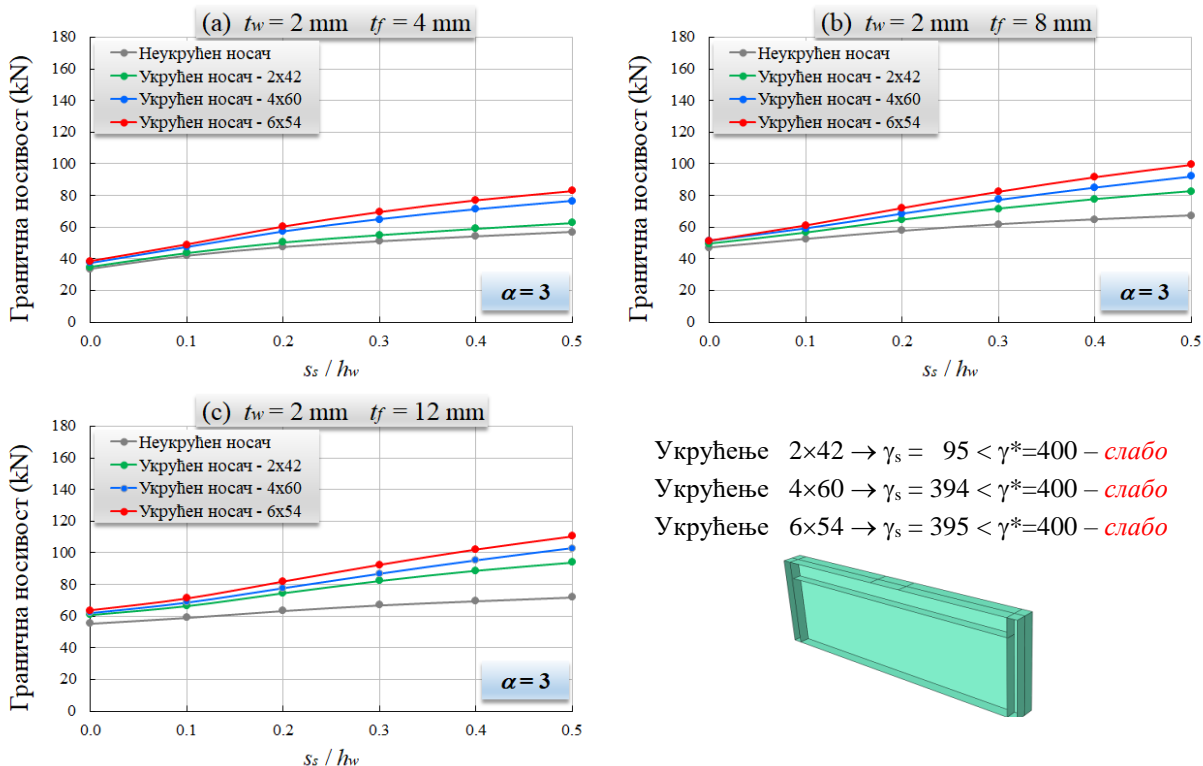
Слика 41 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 2$, $t_w = 1.25 \text{ mm}$, (a) $t_f = 2.5 \text{ mm}$, (b) $t_f = 5 \text{ mm}$, (c) $t_f = 7.5 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 42 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=3$, дебљину ребра $t_w = 4 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



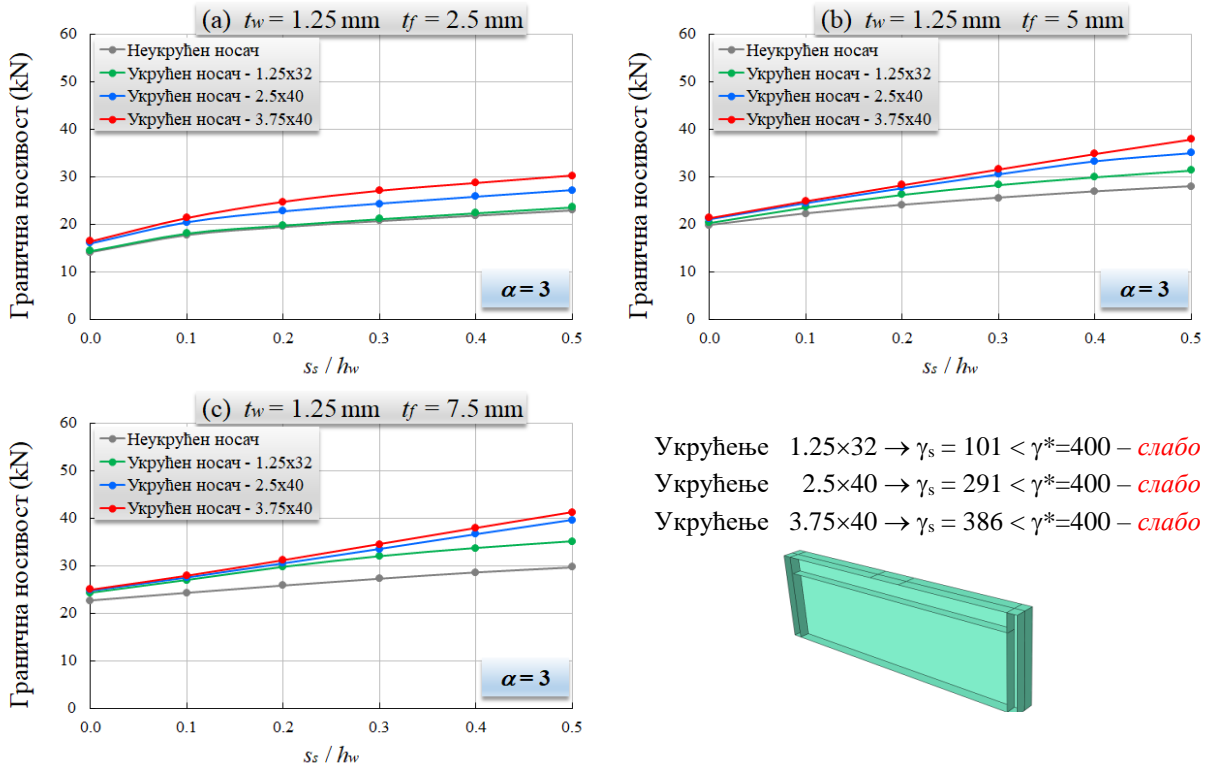
Слика 42 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 4 \text{ mm}$, (a) $t_f = 8 \text{ mm}$, (b) $t_f = 16 \text{ mm}$, (c) $t_f = 24 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 43 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=3$, дебљину ребра $t_w = 2 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



Слика 43 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 2 \text{ mm}$, (a) $t_f = 4 \text{ mm}$, (b) $t_f = 8 \text{ mm}$, (c) $t_f = 12 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

На слици 44 приказана је гранична носивост у функцији дужине оптерећења подужно неукрућених и укрућених носача за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha=3$, дебљину ребра $t_w = 1.25 \text{ mm}$ за све дебљине појаса и сва примијењена укрућења.



Слика 44 Гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача за $\alpha = 3$, $t_w = 1.25 \text{ mm}$, (a) $t_f = 2.5 \text{ mm}$, (b) $t_f = 5 \text{ mm}$, (c) $t_f = 7.5 \text{ mm}$ и сва разматрана подужна укрућења.

Као што је очекивано, примјеном подужних укрућења долази до повећања граничне носивости. До значајнијег повећања граничне носивости (израженије одвајање криве граничне носивости подужно укрућеног носача у односу на криву граничне носивости подужно неукрућеног носача) долази при већим дужинама доношења оптерећења. Повећања дебљине појаса као и повећење односа дужине и висине оптерећеног панела ребра такође доводе до повећања ефекта ојачања.

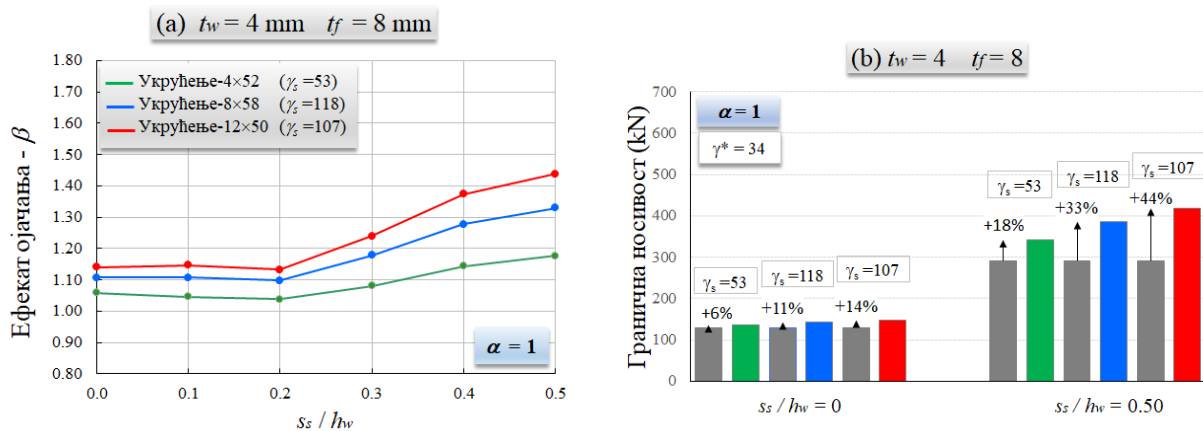
Коришћењем већих димензија укрућења долази до јасног одвајања криве граничне носивости подужно укрућеног носача од криве граничне носивости подужно неукрућеног носача. До повећања ефекта ојачања долази не само повећавањем ширине укрућења већ и повећавањем његове дебљине, што се не може уочити ако за прорачун крутости укрућења користимо препоруке из EN 1993-1-5.

Ако посматрамо на примјер дијаграм на слици 34, можемо видјети да укрућење $b_s \times t_s = 8 \times 58$ има крутост (срачунату на основу препорука EN 1993-1-5) $\gamma_s = 118 < \gamma^* = 400$, док укрућење $b_s \times t_s = 12 \times 50$ има крутост $\gamma_s = 107 < \gamma^* = 400$. Ово значи да би на основу препорука прво укрућење требало да оствари веће ефекте ојачања, самим тим и веће граничне силе. Међутим, као што се може видјети из приложених резултата, друго укрућење даје веће ефекте ојачања, односно веће граничне силе, што значи да се утицај подужног укрућења на граничну носивост не може потпуно обухватити коришћењем израза за прорачун релативне крутости укрућења који је дат у EN 1993-1-5.

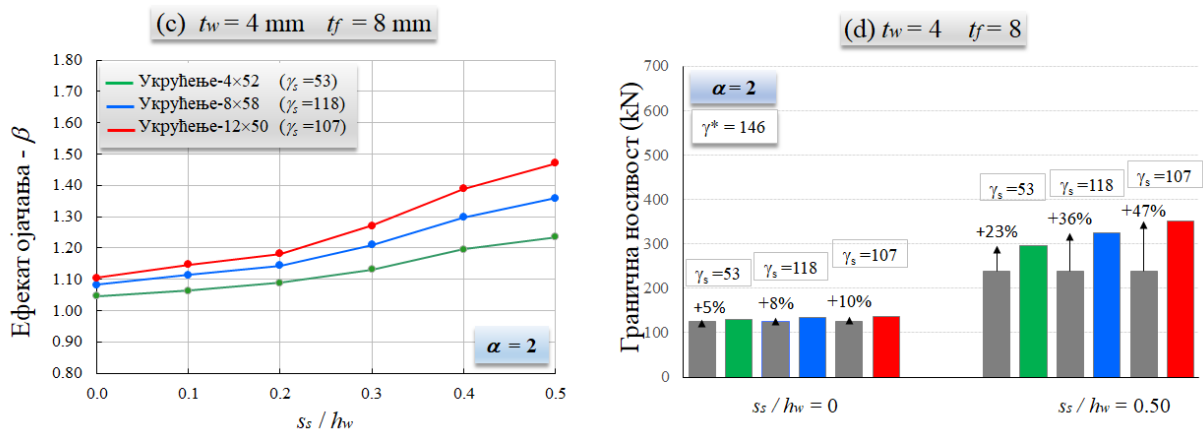
Предложени израз за прорачун граничне носивости који је дат након спроведене нумеричке анализе у овом раду (поглавље 4) осим крутости γ_s која је дефинисана у Еврокоду узима у обзир и торзиону крутост укрућења ϕ_s .

3.4.2.2 Дијаграми ефекта ојачања у функцији дужине оптерећења

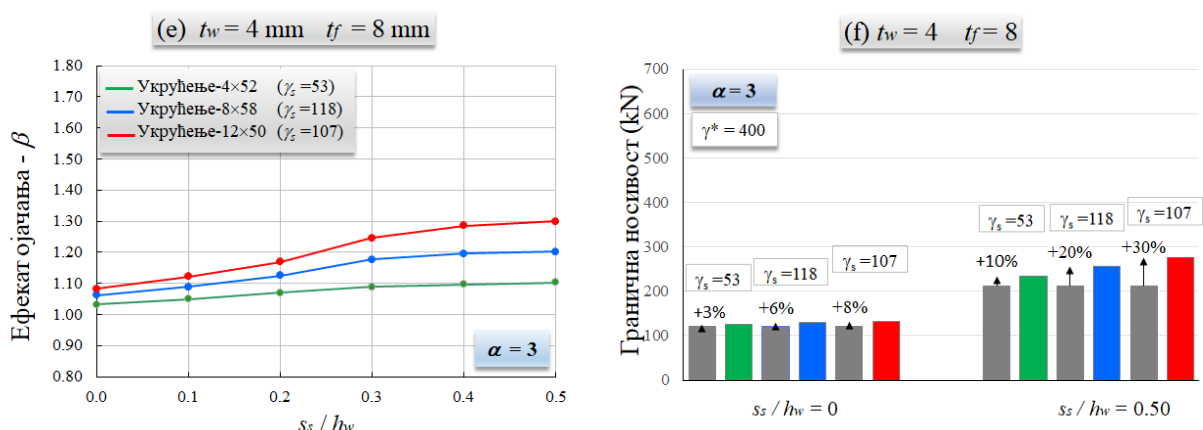
На слици 45 су представљени ефекти ојачања за различите крутости укрућења у функцији дужине наношења оптерећења за носаче са дебелином ребра $t_w = 4$, дебелину појаса $t_f = 2t_w$ за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, \alpha = 2, \alpha = 3$).



а) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=1$) б) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=1$)



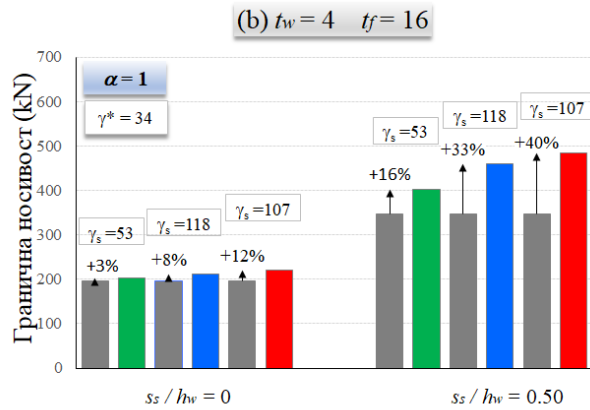
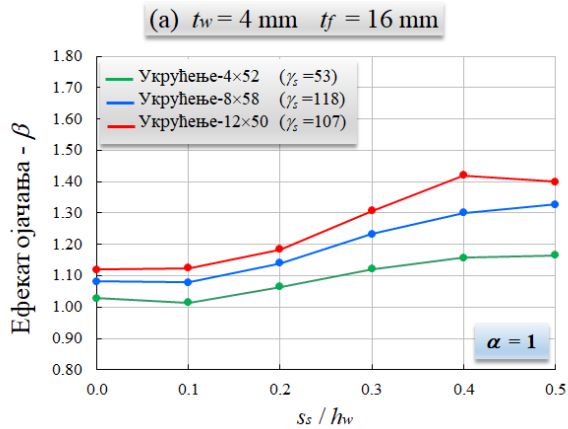
с) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=2$) д) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=2$)



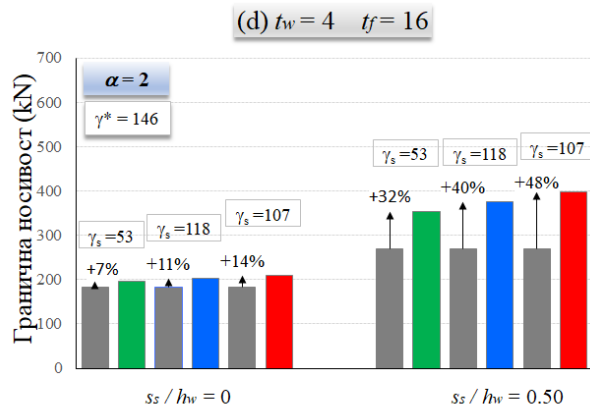
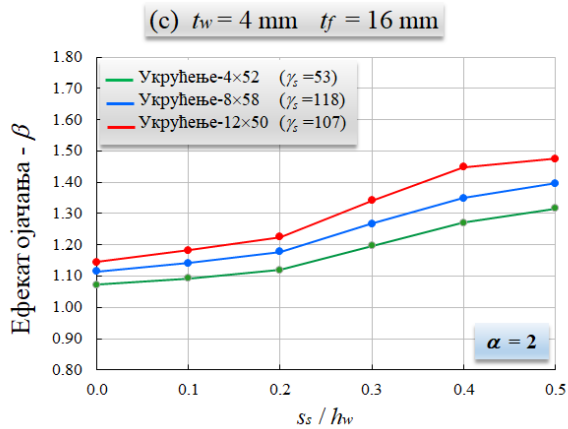
е) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=3$)

Слика 45 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4$, $t_f = 8$

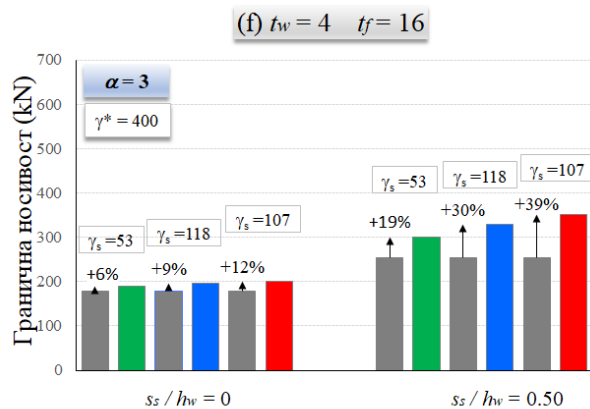
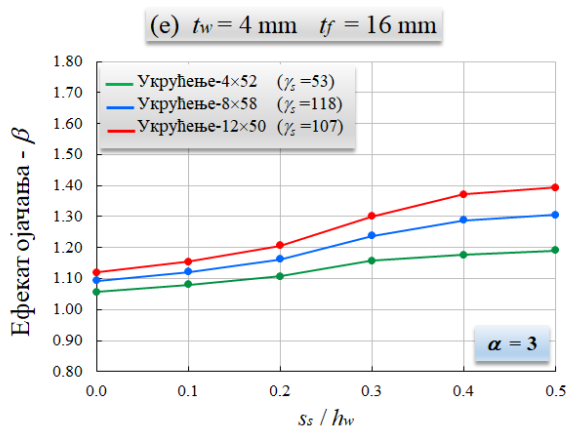
На слици 46 су представљени ефекти ојачања за различите крутости укрућења у функцији дужине наношења оптерећења за носаче са дебелином ребра $t_w = 4$, дебелину појаса $t_f = 4t_w$ за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, \alpha = 2, \alpha = 3$).



а) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=1$) б) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=1$)



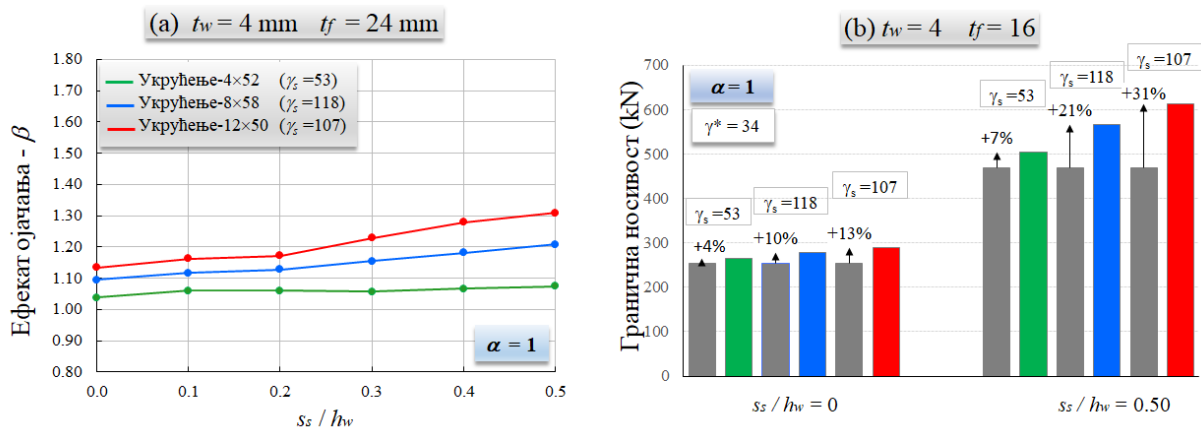
с) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=2$) д) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=2$)



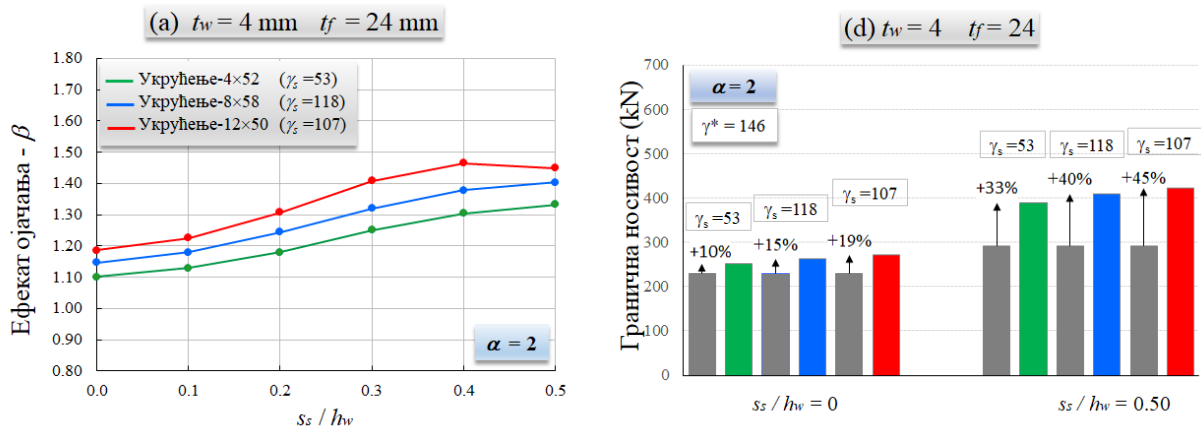
е) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=3$)

Слика 46 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4, t_f = 16$

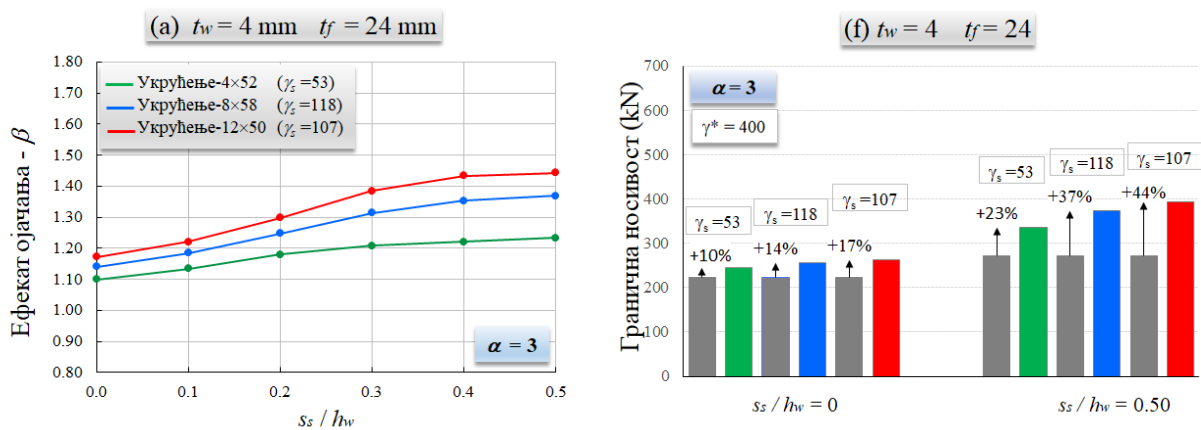
На слици 47 су представљени ефекти ојачања за различите крутости укрућења у функцији дужине нашоња оптерећења за носаче са дебелином ребра $t_w = 4$, дебелину појаса $t_f = 6t_w$ за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, \alpha = 2, \alpha = 3$).



а) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=1$) б) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=1$)



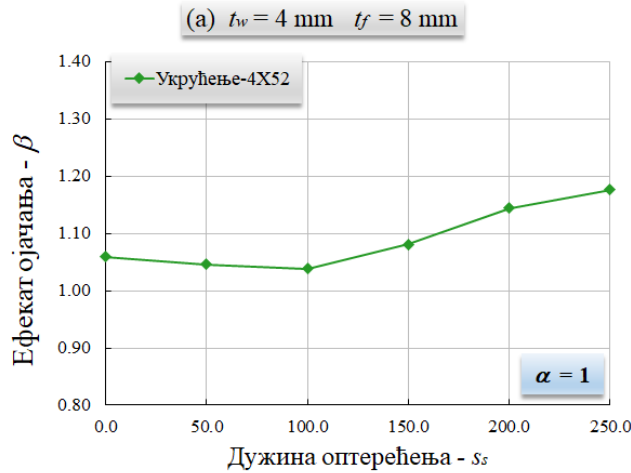
с) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=2$) д) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=2$)



е) ефекат ојачања за различите крутости укрућења ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање ефекта ојачања ($\alpha=3$)

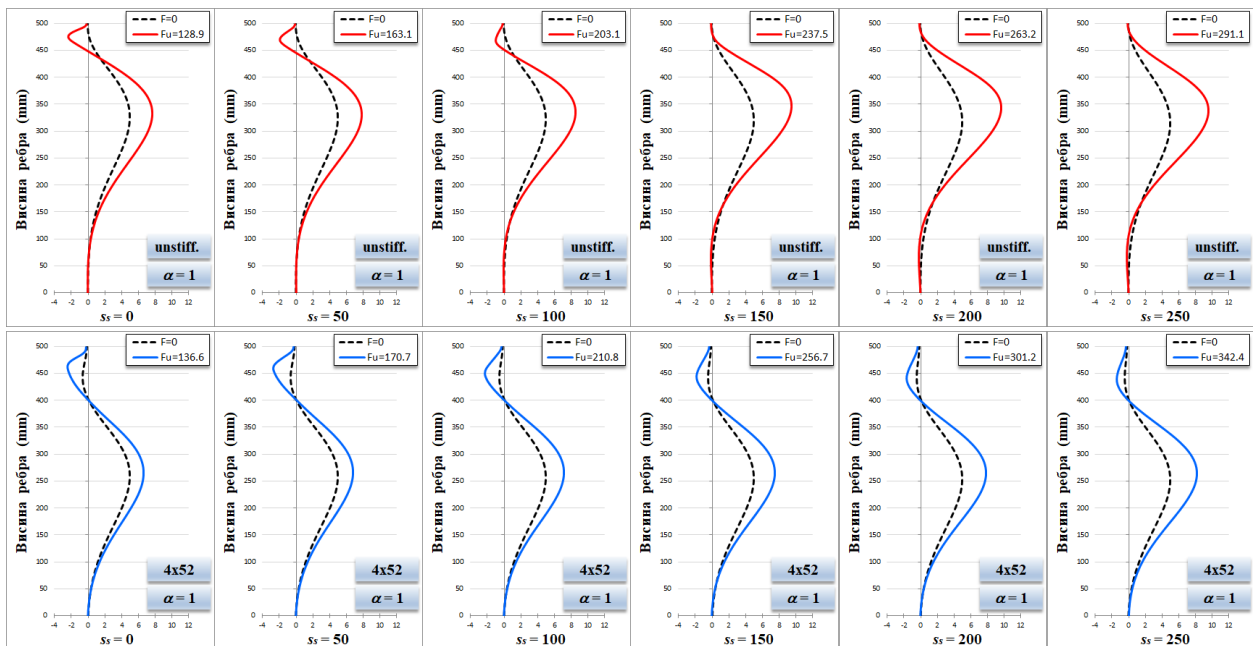
Слика 47 Дијаграм ефекта ојачања за различите крутости подужног укрућења $t_w = 4$, $t_f = 24$

Може се примијетити да за одређене односе параметара са повећањем дужине оптерећења у почетку долази до пада ефекта ојачања, а затим до промјене нагиба криве и до раста ефекта ојачања. Примјер оваквог понашања је приказан на слици 48, за носач распона $\alpha = 500 \text{ mm}$, $t_w = 4 \text{ mm}$, $t_f = 8 \text{ mm}$ и најслабије укрућење $t_s \times b_s = 4 \times 52$.



Слика 48 Ефекат ојачања за подужно укрућен носач $\alpha = 1$, $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s \times b_s=4 \times 52$

Као што је објашњено у претходним поглављима, ефекат ојачања представља однос граничне носивости подужно укрућеног и подужно неукрућеног носача. Уколико посматрамо почетне имперфекције и деформације средњег пресека ребра при достизању граничне носивости код неукрућеног и укрућеног носача можемо уочити да су почетне имперфекције подужно неукрућених носача за мање дужине оптерећења различитог знака у односу на граничне деформације (што проузрокује већу граничну силу неукрућеног носача, односно мањи ефекат ојачања). За веће дужине оптерећења, граничне деформације и почетне имперфекције су истог знака (што доводи до мање граничне силе неукрућеног носача, односно већег ефекта ојачања), слика 49.



Слика 49 Почетне имперфекције и деформације средњег пресека ребра при достизању граничног оптерећења подужно укрућеног и неукрућеног носача $\alpha = 1$, $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s \times b_s=4 \times 52$

Анализом дијаграма на сликама 36-47 могу се извући следећи закључци:

1. За релативно мале дужине локалног оптерећења ($s_s / h_w \leq 0.10$), остварен је веома мали ефекат ојачања. У случају најјачег подужног укрућења и $s_s / h_w \leq 0.10$, ефекат ојачања је био у распону од 10 - 20 %. Показало се да ово важи за све разматране односе дужине и висине оптерећеног панела ребра.
2. Значајније повећање ефекта ојачања добијено је за веће дужине локалног оптерећења ($s_s / h_w = 0.50$), дебљи оптерећени појас и релативно јако подужно укрућење. Утврђено је да је ефекат ојачања био између 30 – 60 % за најјаче подужно укрућење и $s_s / h_w = 0.50$).
3. Повећање односа дужине и висине оптерећеног панела ребра од $\alpha = 1$ до $\alpha = 2$ повољно је утицало на ефекат ојачања у већини случајева. Иако су у случају $\alpha = 2$ добијени ниже граничне носивости него за $\alpha = 1$, подужно укрућење је имало већи утицај на граничну носивост (тј. израчунат је већи ефекат ојачања). У случају повећања односа дужине и висине оптерећеног панела ребра од $\alpha = 1$ до $\alpha = 3$ није евидентно који параметри (дебљина појаса или виткост ребра) доводе до већих ефеката ојачања.

Добијени тренд за ефекат ојачања (у погледу дужине оптерећења и виткости ребра) упоређен је са нумеричким истраживањем [38]. То истраживање је једина студија доступна у литератури у којој су разматрани различити геометријски параметри, у комбинацији са различитим дужинама оптерећења и која има сличне односе карактеристичних параметара носача.

Иако су димензије носача коришћене у [38] (нпр. $h_w = 3600 \text{ mm}$, $t_w = 12 - 24 \text{ mm}$, $t_f = 35 \text{ mm}$, $t_s = 35 \text{ mm}$, $b_s = 350 \text{ mm}$) различите од димензија коришћених у овој дисертацији, неки карактеристични односи су слични, тако да је могуће извршити упоредну анализу добијених резултата.

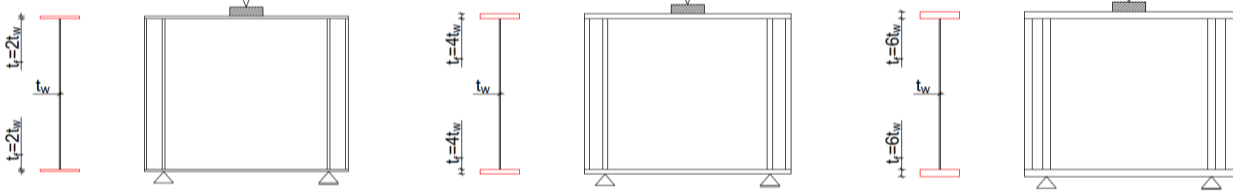
Упоредни резултати су дати у Табели 12 и може се примети сличан тренд у расту ефекта ојачања. Ефекат ојачања β се повећава са повећањем дужине оптерећења док се β смањује како се смањује виткост ребра. На основу овога се може закључити да ефекат ојачања не зависи од величине носача већ од односа карактеристичних параметара носача.

Табела 12 Ефекат ојачања β (Loaiza, Graciano [38] / нумеричка анализа из ове дисертације – упоредни резултати)

	h_w / t_w	t_f / t_w	α	b_1 / t_w	t_s / t_w	s_s / h_w			
						0.1	0.2	0.3	0.4
Loaiza, Graciano [38]	225	2.19	1	45	2.19	1.09	1.12	1.25	1.35
нумеричка анализа из ове дисертације	250	2	1	50	2	1.16	1.18	1.21	1.31
Loaiza, Graciano [38]	150	1.46	1	30	1.46	1.03	1.04	1.09	1.20
нумеричка анализа из ове дисертације	125	2	1	25	1	1.05	1.04	1.08	1.14

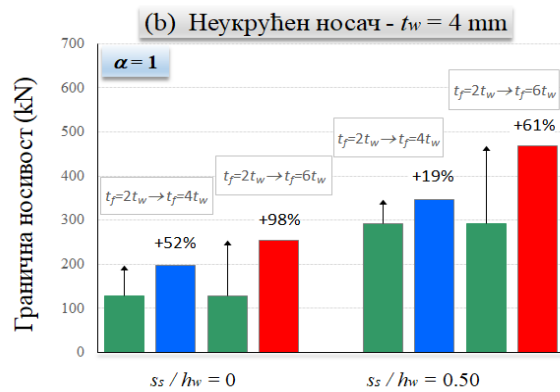
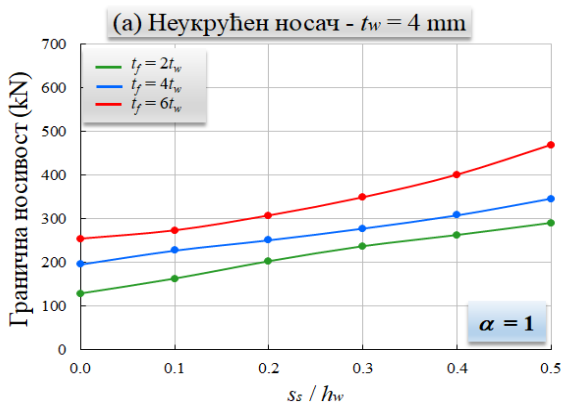
3.4.3 УТИЦАЈ ДЕБЉИНЕ ПОЈАСА

Дебљина оптерећеног појаса носача разматраних у овој анализи је изабрана тако да је однос $t_f = t_w = 2, 4$ и 6 за све разматране дебљине ребра и за све односе дужине и висине ребра.

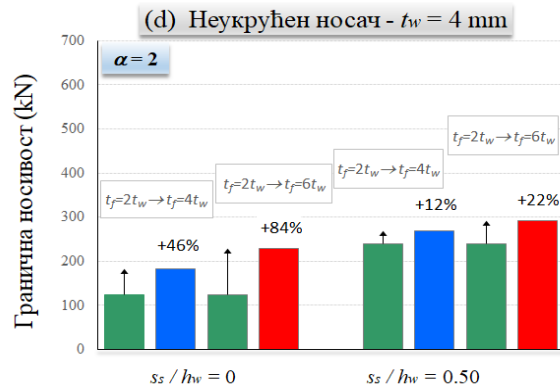
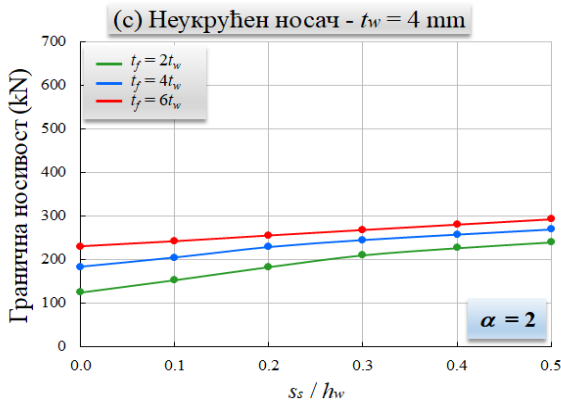


Слика 50 Вариране дебљине појаса

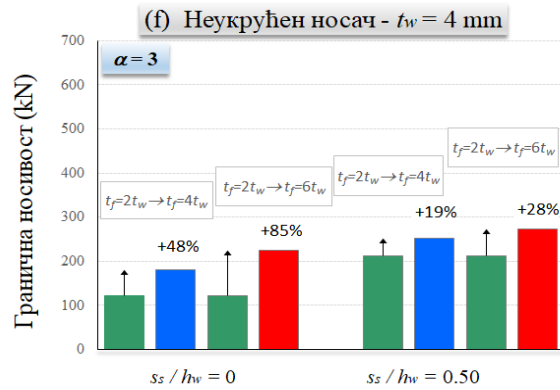
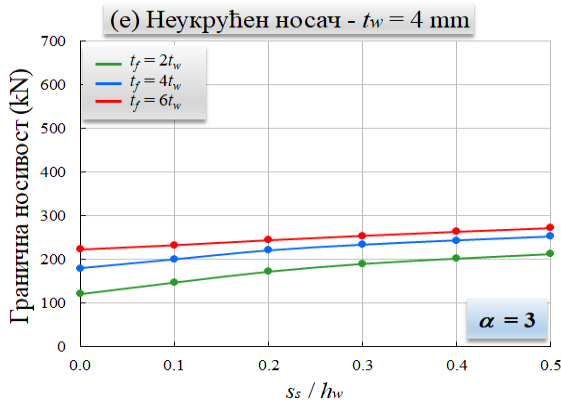
На слици 51 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно неукрућених носача за ребро мале виткости $t_w = 4$ за различите дебљине појаса у функцији дужине наносења оптерећења и процентуално повећање граничне носивости које се добија употребом дебљег ребра за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, 2$ и 3).



a) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=1$) b) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=1$)



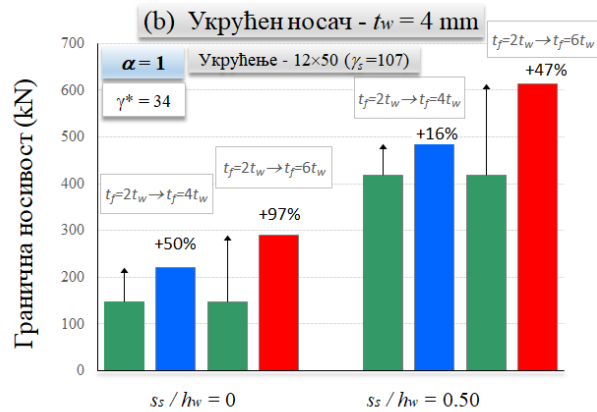
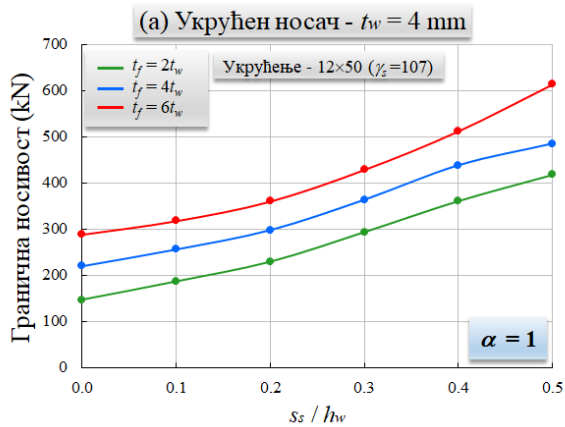
c) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=2$) d) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=2$)



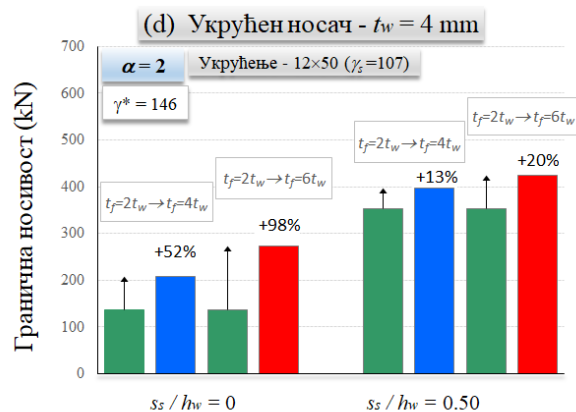
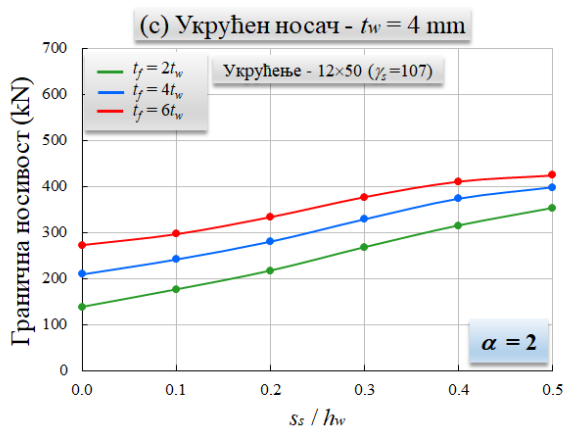
e) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=3$) f) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=3$)

Слика 51 Гранична носивост подужно неукрућених носача ($t_w = 4$) за различите дебљине појаса

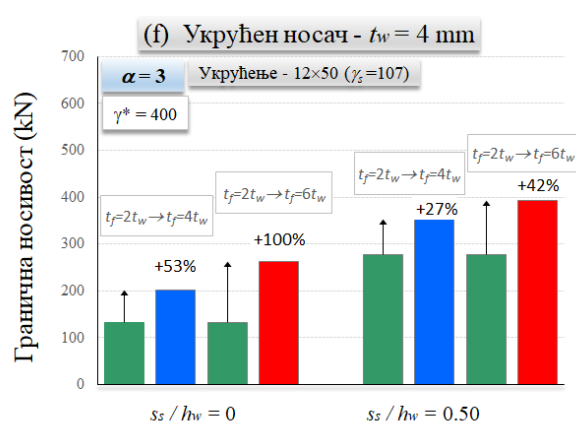
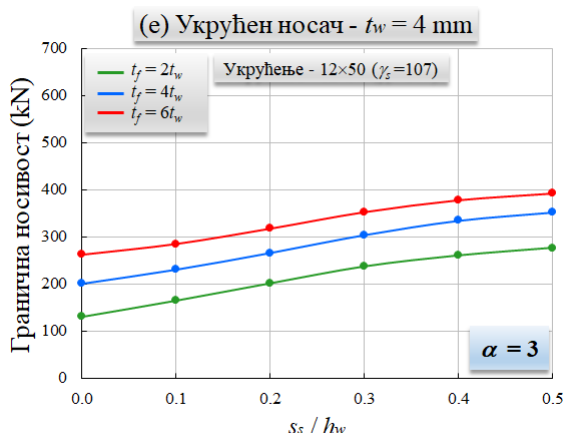
На слици 52 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно укрупњених носача (ребро мале виткости $t_w = 4$, најјаче укрупњење $t_s \times b_s = 12 \times 50$) за различите дебљине појаса у функцији дужине нашошења оптерећења и процентуално повећање граничне носивости које се добија употребом дебљег ребра за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, 2$ и 3).



а) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=1$) б) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=1$)



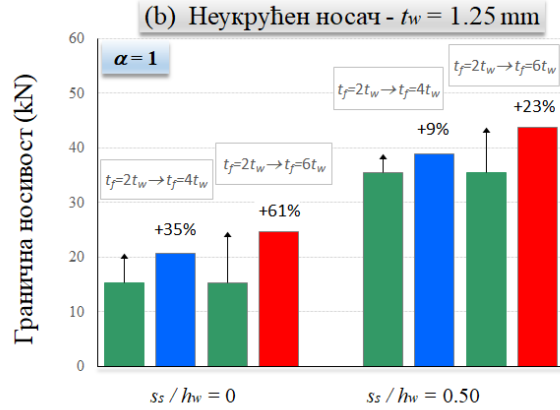
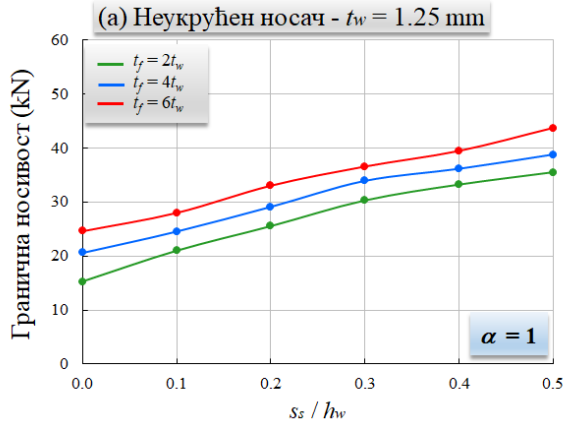
с) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=2$) д) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=2$)



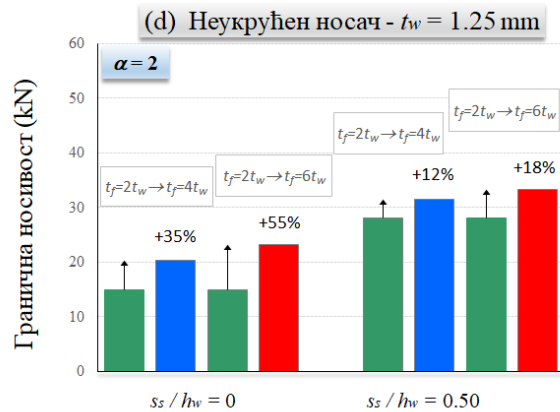
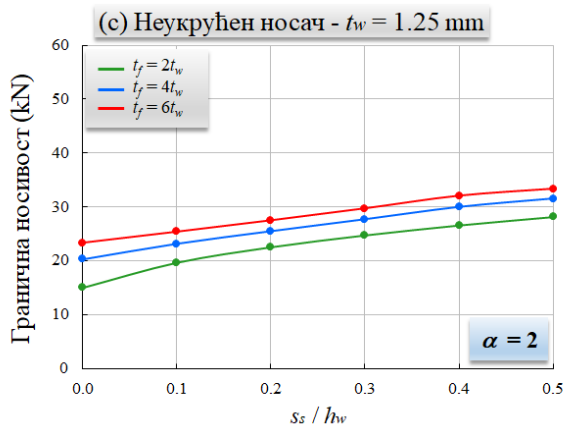
е) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=3$)

Слика. 52 Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 4$) за различите дебљине појаса.

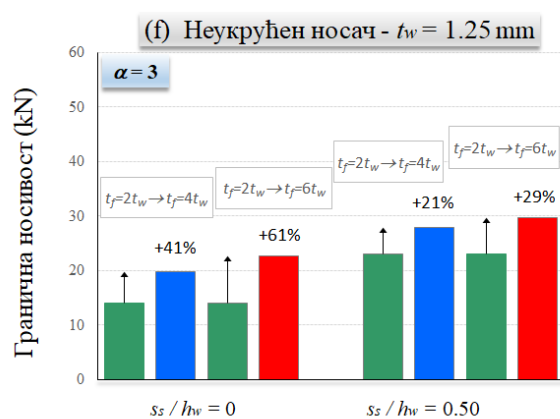
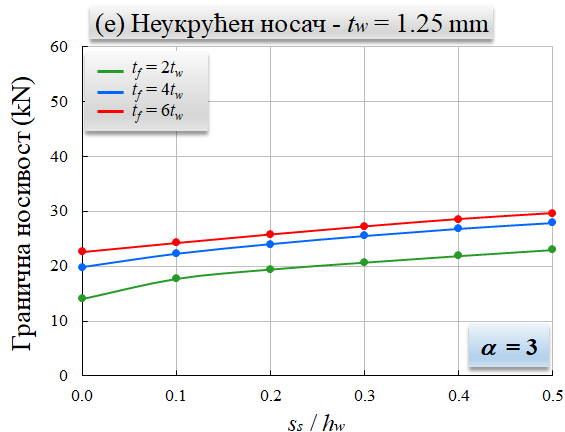
На слици 53 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно неукрућених носача за ребро велике виткости $t_w = 1.25$ за различите дебљине појаса у функцији дужине наношења оптерећења и процентуално повећање граничне носивости које се добија употребом дебљег ребра и за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, 2$ и 3).



а) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=1$) б) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=1$)



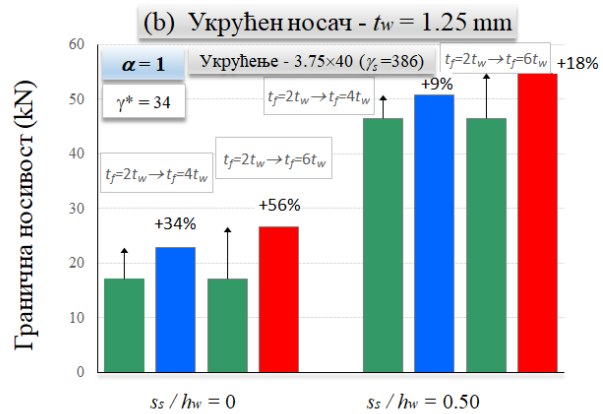
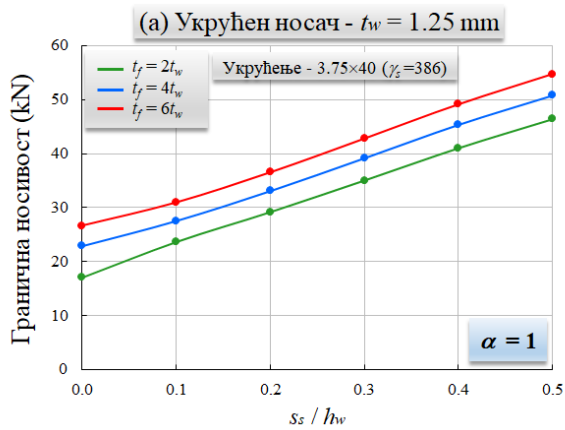
с) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=2$) д) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=2$)



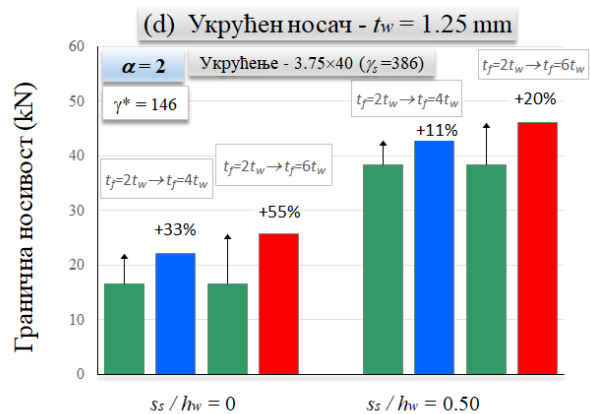
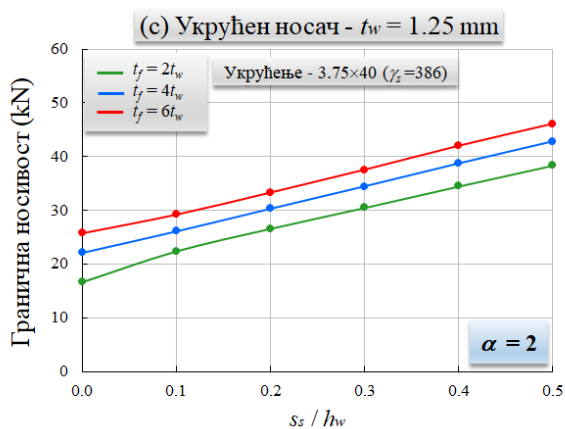
е) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=3$)

Слика. 53 Гранична носивост подужно неукрућених носача ($t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса

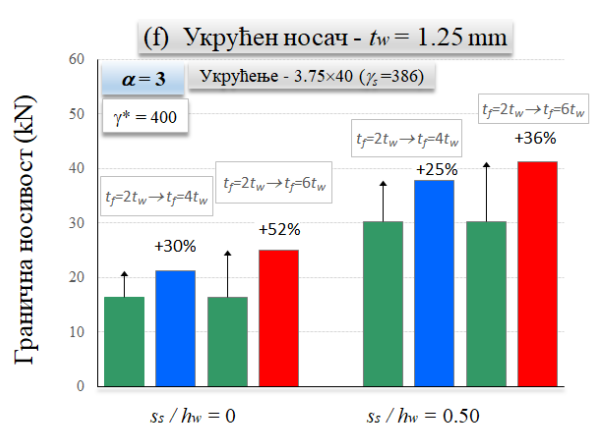
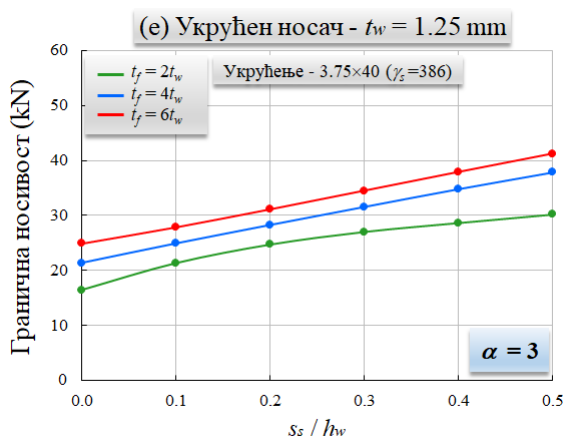
На слици 54 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно укрупњених носача (ребро велике виткости $t_w = 1.25$, најјаче укрупњење $t_s \times b_s = 3.75 \times 40$) за различите дебљине појаса у функцији дужине нашошења оптерећења и процентуално повећање граничне носивости које се добија употребом дебљег ребра за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра ($\alpha = 1, 2$ и 3).



а) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=1$) б) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=1$)



с) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=2$) д) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=2$)



е) гранична носивост за различите дебљине ребра ($\alpha=3$) ф) процентуално повећање граничне носивости ($\alpha=3$)

Слика. 54 Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса.

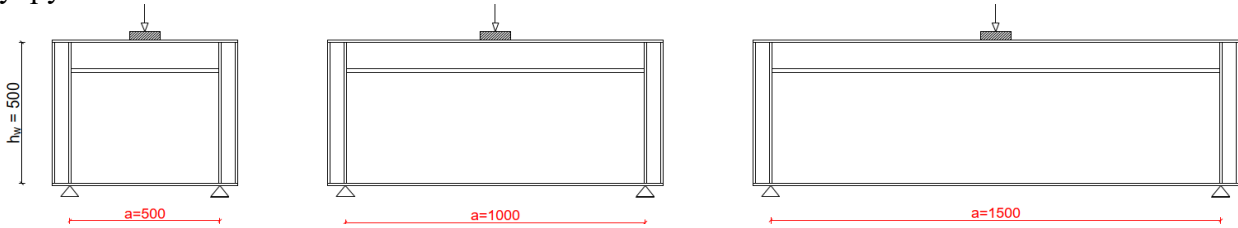
Ове дијаграми показују да се гранична носивост и подужно неукрућених и подужно укрућених лимених носача повећава са повећањем дебљине појаса. Утврђено је да утицај дебљине појаса зависи од виткости ребра. За два гранична случаја, малу виткост ребра ($t_w = 4 \text{ mm}$) и велику виткост ребра ($t_w = 1.25 \text{ mm}$), може се уочити следеће:

1. Код подужно неукрућених лимених носача мале виткости ребра ($t_w = 4 \text{ mm}$), слика 51, и за дужину оптерећеног панела ребра $a = 500 \text{ mm}$ ($\alpha = 1$), повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања граничног оптерећења за 19 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 52% ($s_s/h_w = 0$). Даље повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ дало је још веће повећање граничне носивости од 61% ($s_s/h_w = 0.50$) на 98% ($s_s/h_w = 0$). За дужину оптерећеног панела $a = 1000 \text{ mm}$ ($\alpha = 2$), повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања 12 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 46% ($s_s/h_w = 0$) а повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ дало је повећање од 22% ($s_s/h_w = 0.50$) на 84% ($s_s/h_w = 0$). Слична повећања су се добила за дужину оптерећеног панела ребра $a = 1500 \text{ mm}$ ($\alpha = 3$) повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања 19 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 48% ($s_s/h_w = 0$) а повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ дало је повећање од 28% ($s_s/h_w = 0.50$) на 85% ($s_s/h_w = 0$)
2. Код подужно укрућених лимених носача истих геометријских карактеристика, слика 52, и за најјаче разматрано подужно укрућење ($t_s \times b_s = 12 \times 50$) повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања граничног оптерећења за 16 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 50% ($s_s/h_w = 0$). За случај најдебљег појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ гранична носивост се повећава од 47% ($s_s/h_w = 0.50$) на 97% ($s_s/h_w = 0$). За дужину оптерећеног панела $a = 1000 \text{ mm}$ ($\alpha = 2$), повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања граничног оптерећења за 13 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 52% ($s_s/h_w = 0$), а повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ гранична носивост се повећава од 27% ($s_s/h_w = 0.50$) на 98% ($s_s/h_w = 0$). За дужину оптерећеног панела $a = 1500 \text{ mm}$ ($\alpha = 3$), повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања граничног оптерећења за 27 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 53% ($s_s/h_w = 0$), а повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ гранична носивост се повећава од 42% ($s_s/h_w = 0.50$) на 100% ($s_s/h_w = 0$).
3. Код подужно неукрућених лимених носача велике виткости ребра ($t_w = 1.25 \text{ mm}$), слика 53, и за распон $a = 500 \text{ mm}$ ($\alpha = 1$), повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до мањег повећања граничног оптерећења од 9 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 35% ($s_s/h_w = 0$). Даље повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ дало је повећање граничне носивости од 23% ($s_s/h_w = 0.50$) на 61% ($s_s/h_w = 0$). За $a = 1000 \text{ mm}$ ($\alpha = 2$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$, 12 % ($s_s/h_w = 0.50$), 35% ($s_s/h_w = 0$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$, 18 % ($s_s/h_w = 0.50$), 55% ($s_s/h_w = 0$). За $a = 1500 \text{ mm}$ ($\alpha = 3$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$, 21 % ($s_s/h_w = 0.50$), 41% ($s_s/h_w = 0$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$, 29 % ($s_s/h_w = 0.50$), 61% ($s_s/h_w = 0$).
4. Код подужно укрућених лимених носача велике виткости ребра ($t_w = 1.25 \text{ mm}$), слика 54, и за најјаче разматрано подужно укрућење ($t_s \times b_s = 3.75 \times 40$) повећање дебљине појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$ довело је до повећања граничног оптерећења за 9 % ($s_s/h_w = 0.50$) односно 34% ($s_s/h_w = 0$). За случај најдебљег појаса $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$ гранична носивост се повећава од 18% ($s_s/h_w = 0.50$) на 56% ($s_s/h_w = 0$). За $a = 1000 \text{ mm}$ ($\alpha = 2$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$, 11 % ($s_s/h_w = 0.50$), 33% ($s_s/h_w = 0$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$, 20 % ($s_s/h_w = 0.50$), 55% ($s_s/h_w = 0$). За $a = 1500 \text{ mm}$ ($\alpha = 3$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 4t_w$, 25 % ($s_s/h_w = 0.50$), 30% ($s_s/h_w = 0$), $t_f = 2t_w \rightarrow t_f = 6t_w$, 36 % ($s_s/h_w = 0.50$), 52% ($s_s/h_w = 0$).
5. Резултати за средњу виткост ребра ($t_w = 2 \text{ mm}$) се налазе између ових вредности за малу и велику виткост.

Горња анализа показује да повећање дебљине оптерећеног појаса доводи до веће граничне носивости. Утицај дебљине појаса на граничну носивост зависи од виткости ребра и дужине оптерећења. Већа повећања граничне носивости могу се постићи за мању виткост ребра. За мале примењене дужине оптерећења ($s_s/h_w = 0$), дебљина појаса утиче на граничну носивост више него за веће дужине оптерећења ($s_s/h_w = 0.50$). Дијаграми којима се описује утицај дебљине појаса за све носаче су дати у прилогу Б.

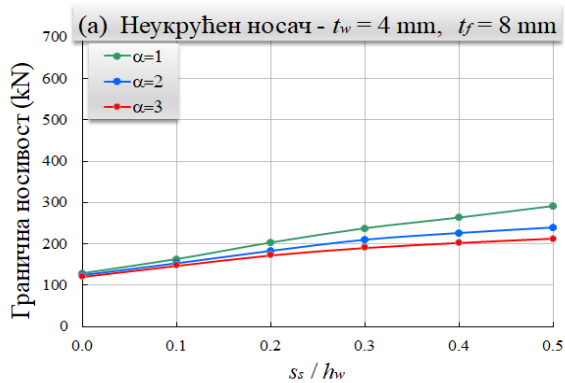
3.4.4 УТИЦАЈ ОДНОСА ДУЖИНЕ И ВИСИНЕ ОПТЕРЕЂЕНОГ ПАНЕЛА РЕБРА

У овом истраживању су разматрани носачи код којих је однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = a / h_w = 1, 2$ и 3 за све дебљине ребра и за сва разматрана подужна укрућења.

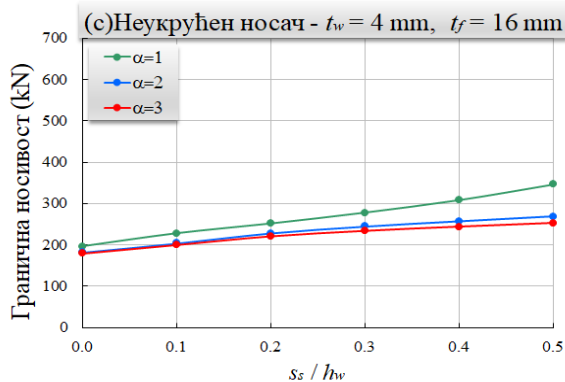


Слика 55 Варирани однос дужине и висине оптерећеног панела

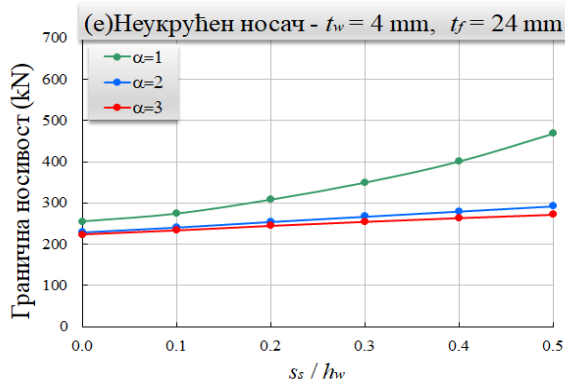
На слици 56 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно неукрућених носача за ребро $t_w = 4$ за различите односе дужине и висине оптерећеног панела у функцији дужине нашошења оптерећења и процентуално смањење граничне носивости које се добија употребом већег односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, за све дебљине појаса.



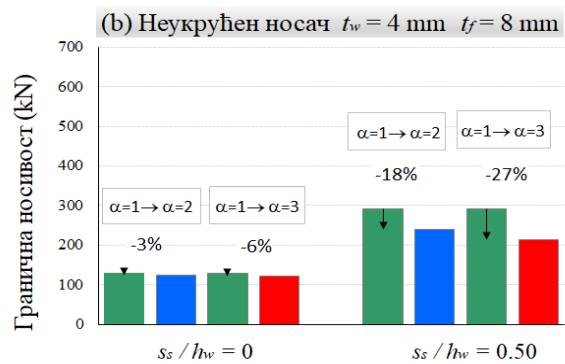
а) гранична носивост за различите односе α



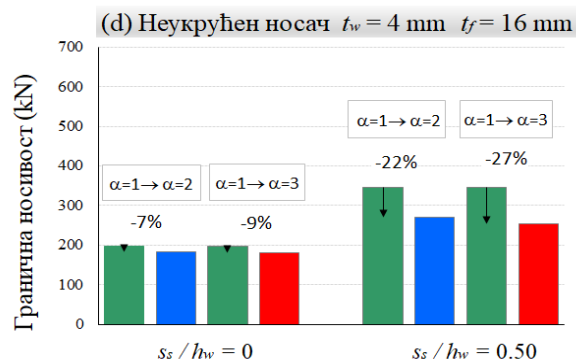
с) гранична носивост за различите односе α



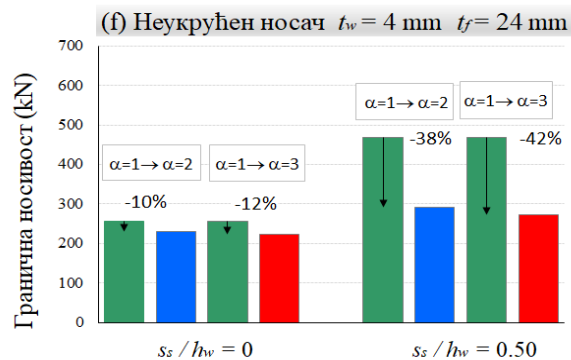
е) гранична носивост за различите односе α



б) процентуално повећање граничне носивости



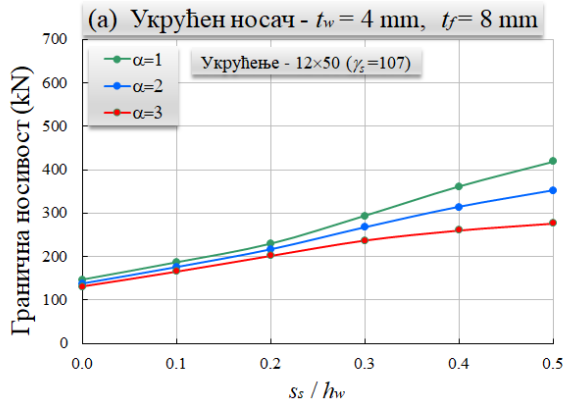
д) процентуално повећање граничне носивости



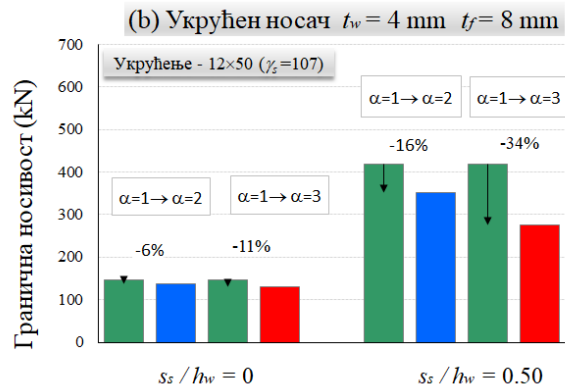
ф) процентуално повећање граничне носивости

Слика 56 Гранична носивост подужно неукрућених носача ($t_w = 4$, (а) $t_f = 8$, (б) $t_f = 16$, (с) $t_f = 24$) за различите односе ширине и висине ребра

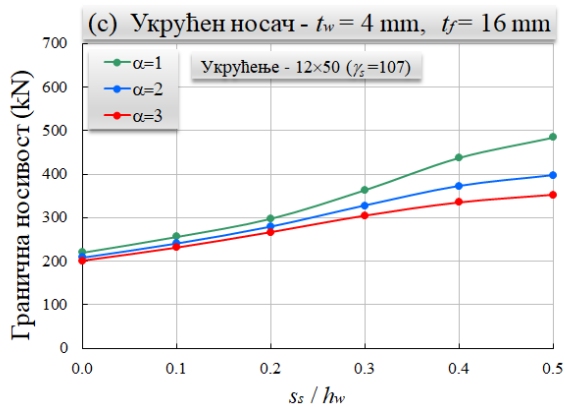
На слици 57 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно укрупњених носача (ребро $t_w = 4$, најјаче укрупњење $t_s \times b_s = 12 \times 50$) за различите односе дужине и висине оптерећеног панела у функцији дужине нашоњења оптерећења и процентуално смањење граничне носивости које се добија употребом већег односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, за све дебљине појаса.



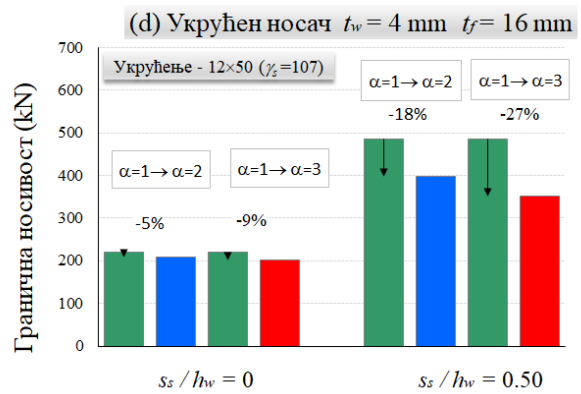
а) гранична носивост за различите односе α



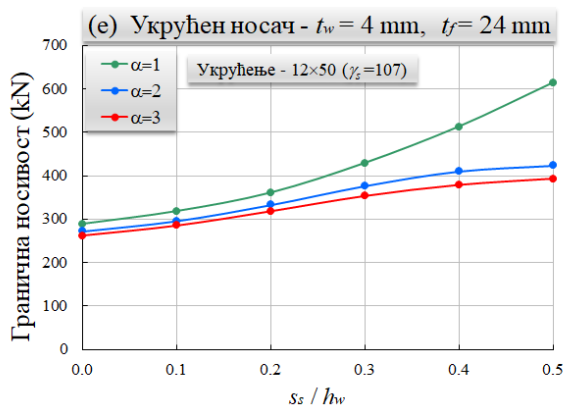
б) процентуално повећање граничне носивости



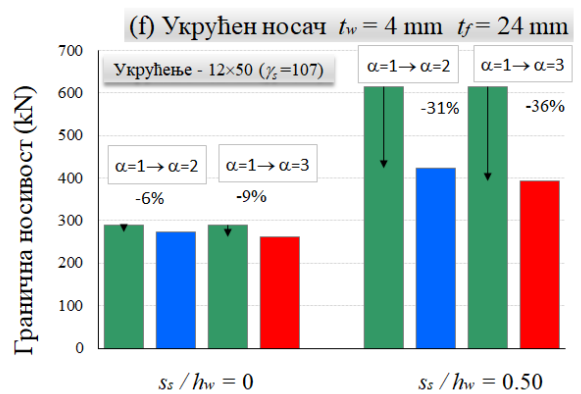
с) гранична носивост за различите односе α



д) процентуално повећање граничне носивости



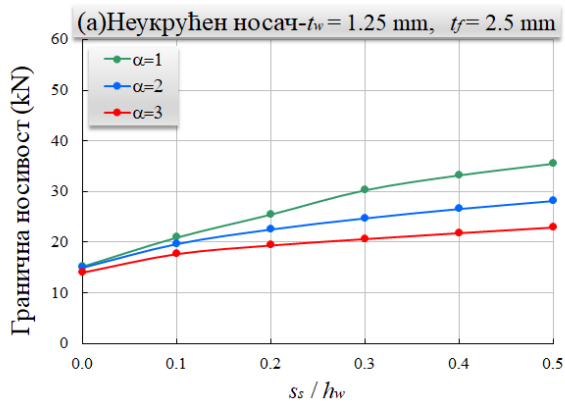
е) гранична носивост за различите односе α



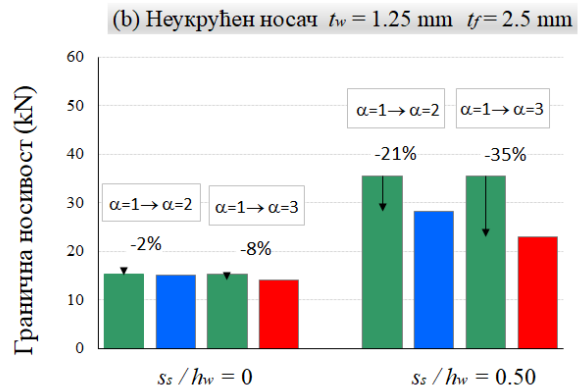
ф) процентуално повећање граничне носивости

Слика 57 Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 4$, (a) $t_f = 8$, (b) $t_f = 16$, (c) $t_f = 24$) за различите односе ширине и висине ребра

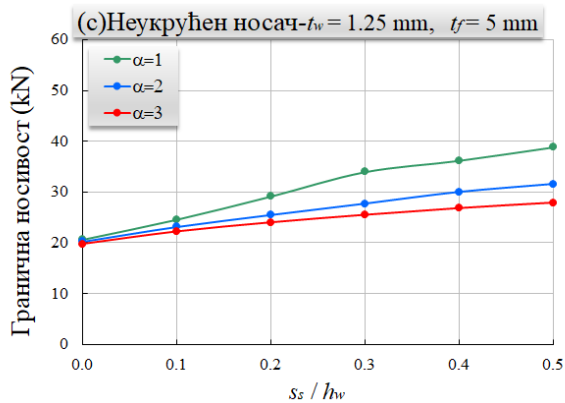
На слици 58 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно неукрућених носача за ребро $t_w = 1.25$ за различите односе дужине и висине оптерећеног панела у функцији дужине нашоњења оптерећења и процентуално смањење граничне носивости које се добија употребом већег односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, за све дебљине појаса.



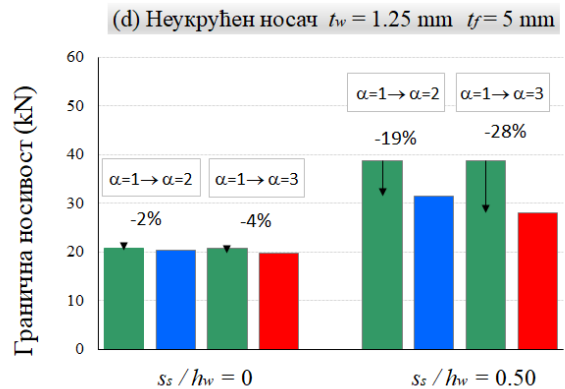
а) гранична носивост за различите односе α



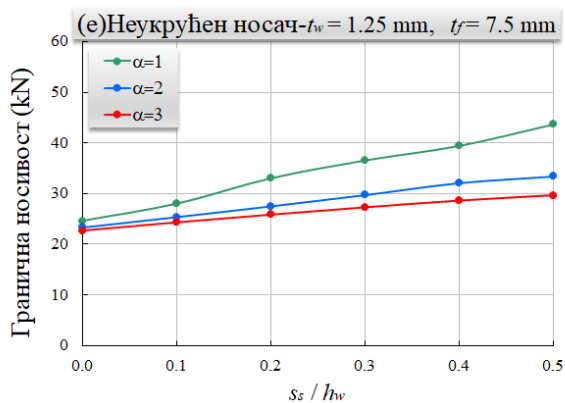
б) процентуално повећање граничне носивости



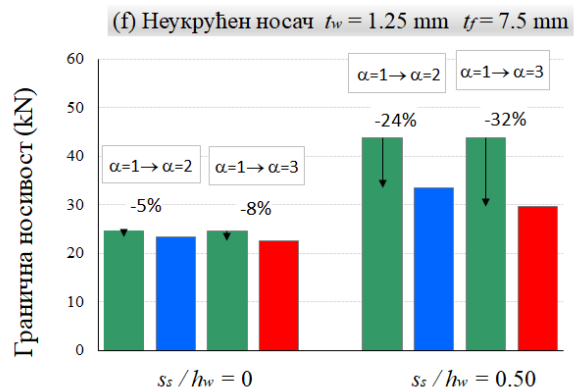
с) гранична носивост за различите односе α



д) процентуално повећање граничне носивости



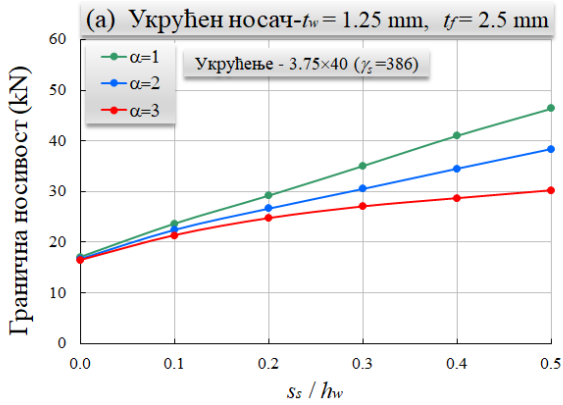
е) гранична носивост за различите односе α



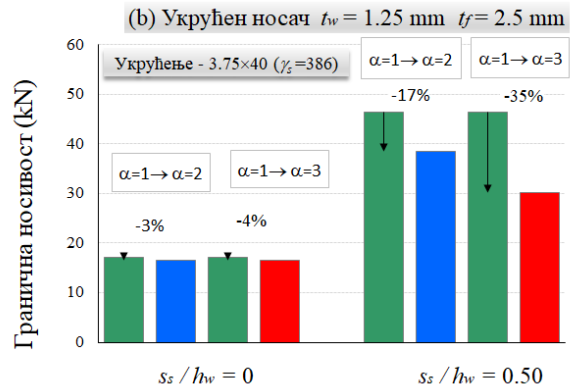
ф) процентуално повећање граничне носивости

Слика 58 Гранична носивост подужно неукрућених носача ($t_w = 1.25$, (а) $t_f = 2.5$, (б) $t_f = 5$, (с) $t_f = 7.5$) за различите односе ширине и висине ребра

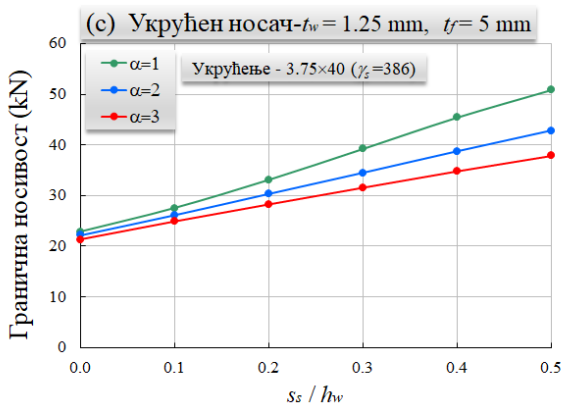
На слици 59 су приказани су дијаграми граничне носивости подужно укрупњених носача (ребро $t_w = 1.25$, најјаче укрупњење $t_s \times b_s = 3.75 \times 40$) за различите односе дужине и висине оптерећеног панела у функцији дужине наносења оптерећења и процентуално смањење граничне носивости које се добија употребом већег односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, за све дебљине појаса.



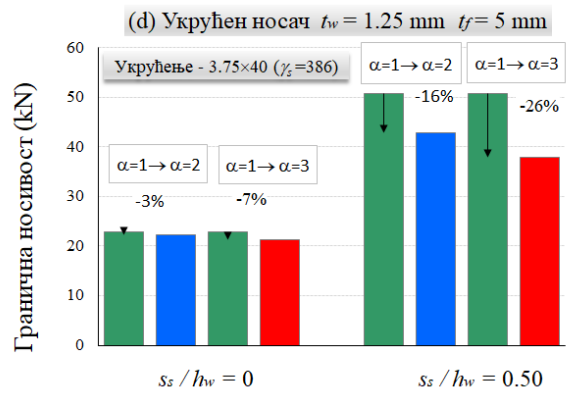
a) гранична носивост за различите односе α



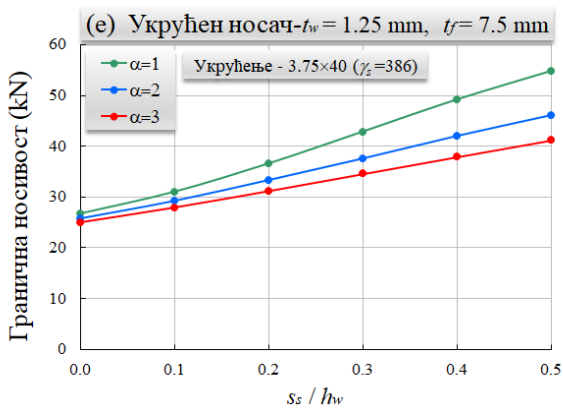
b) процентуално повећање граничне носивости



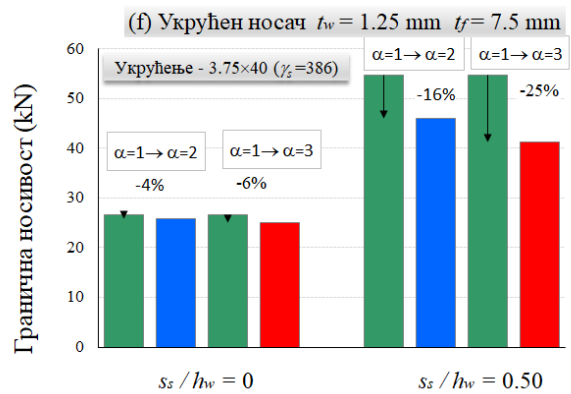
c) гранична носивост за различите односе α



d) процентуално повећање граничне носивости



e) гранична носивост за различите односе α



f) процентуално повећање граничне носивости

Слика 59 Гранична носивост подужно укрупњених носача ($t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 7.5$) за различите односе ширине и висине ребра

Као што је се може видјети у табелама 6-11, гранична носивост подужно неукрућених и укрућених лимених носача смањује се са повећањем односа ширине и висине ребра за све разматране случајеве. Дијаграми за подужно неукрућене и укрућене носаче дати су на сл. 56-57 за релативно малу ($t_w = 4 \text{ mm}$) односно на сликама 58-59 за велику виткост ребра ($t_w = 1.25 \text{ mm}$). Као што се види на сликама највећа гранична носивост је одређена за случај $\alpha = 1$ и смањује се како се однос ширине и дужине ребра повећава. Ово је у сагласности са претходним експерименталним и рачунарским студијама [29-31,38].

1. Повећањем односа дужине и висине оптерећеног панела ребра са $\alpha = 1$ на $\alpha = 2$ и за релативно мале дужине оптерећења (нпр. $s_s / h_w \leq 0.10$), максимални пад граничног оптерећења подужно неукрућених лимених носача био је 10% код носача мале виткости односно 5% код носача велике виткости. За веће дужине оптерећења (нпр. $s_s / h_w = 0.50$), гранична носивост подужно неукрућених носача додатно се смањила до 38%. код носача мале виткости односно 24%. код носача велике виткости. Максимални падови су добијени за разматрани оптерећени појас највеће дебљине ($t_f = 6t_w$).
2. Повећањем односа дужине и висине оптерећеног панела ребра са $\alpha = 1$ на $\alpha = 2$, добијено је максимално смањење граничне носивости подужно укрућених носача од 6% и 31% за $s_s / h_w \leq 0.10$ и $s_s / h_w = 0.50$ за носаче мале виткости, респективно, односно 4% и 17% за $s_s / h_w \leq 0.10$ и $s_s / h_w = 0.50$ за носаче велике виткости, респективно. Максимални падови су добијени за разматрани оптерећени појас највеће дебљине ($t_f = 6t_w$) за ребро мале виткости док су максимални падови граничне носивости укрућених носача добијени за разматрани најдебљи оптерећени појас ($t_f = 6t_w$) за $s_s / h_w \leq 0.10$, односно за разматрани најтањи оптерећени појас ($t_f = 2t_w$) за $s_s / h_w = 0.50$ за носаче велике виткости.
3. Даљим повећањем односа дужине и висине оптерећеног панела ребра са $\alpha = 1$ до $\alpha = 3$ наставља да се смањује гранична носивост. У овом случају, за релативно мале дужине оптерећења (нпр. $s_s / h_w \leq 0.10$), максимални пад граничне носивости подужно неукрућених носача био је 12% код носача мале виткости односно 8%. код носача велике виткости. За веће дужине оптерећења (нпр. $s_s / h_w = 0.50$), гранична носивост неукрућених носача додатно се смањила до 42% код носача мале виткости односно 35% код носача велике виткости. Максимални падови су добијени за разматрани оптерећени појас највеће дебљине ($t_f = 6t_w$) за ребро мале виткости док су максимални падови граничне носивости укрућених носача добијени за разматрани најтањи оптерећени појас ($t_f = 2t_w$).
4. Повећањем односа дужине и висине оптерећеног панела ребра са $\alpha = 1$ на $\alpha = 3$, добијено је максимално смањење граничне носивости подужно укрућених носача од 9% и 36% за $s_s / h_w \leq 0.10$ и $s_s / h_w = 0.50$ за носаче мале виткости, респективно, односно 6% и 35% за $s_s / h_w \leq 0.10$ и $s_s / h_w = 0.50$ за носаче велике виткости, респективно. Максимални падови су добијени за разматрани оптерећени појас највеће дебљине ($t_f = 6t_w$) за ребро мале виткости док су максимални падови граничне носивости укрућених носача добијени за разматрани најдебљи оптерећени појас ($t_f = 6t_w$) за $s_s / h_w \leq 0.10$, односно за разматрани најтањи оптерећени појас ($t_f = 2t_w$) за $s_s / h_w = 0.50$ за носаче велике виткости.

Однос дужине и висине оптерећеног панела ребра има мали утицај на граничну носивост за мање дужине оптерећења. Утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра је израженији за веће дужине оптерећења. Спроведена студија показује да утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра на граничну носивост зависи од крутости оптерећеног појаса, релативне крутости подужног укрућења и дужине оптерећења. Примјеђено је такође да је гранична носивост опала више повећавајући однос дужине и висине оптерећеног панела ребра са $\alpha = 1$ на $\alpha = 2$ него са $\alpha = 2$ на $\alpha = 3$. Утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра је знатно израженији код подужно неукрућених него код подужно укрућених носача. Дијаграми којима се описује утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра за све носаче су дати у прилогу В.

3.5 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ НА ОСНОВУ ЕВРОКОДА

3.5.1 Табеларни преглед резултата добијених примјеном EN 1993-1-5

У табели 13 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 1$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 13 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 1$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN 1993-1-5)

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	105.47	119.06	131.25	142.40	152.74	162.42
		4×52	53	135.07	152.47	168.08	182.36	195.60	208.00
		8×58	118	135.07	152.47	168.08	182.36	195.60	208.00
		12×50	107	135.07	152.47	168.08	182.36	195.60	208.00
	16	неукрућен носач	-	125.23	136.87	147.60	157.60	167.00	174.68
		4×52	53	160.37	175.28	189.02	201.82	213.86	223.69
		8×58	118	160.37	175.28	189.02	201.82	213.86	223.69
		12×50	107	160.37	175.28	189.02	201.82	213.86	223.69
	24	неукрућен носач	-	145.34	155.49	165.01	174.01	174.68	174.68
		4×52	53	186.13	199.12	211.31	222.83	223.69	223.69
		8×58	118	186.13	199.12	211.31	222.83	223.69	223.69
		12×50	107	186.13	199.12	211.31	222.83	223.69	223.69
2	4	неукрућен носач	-	24.88	28.46	31.63	34.52	37.18	39.66
		2×42	95	31.87	36.45	40.51	44.20	47.61	50.79
		4×60	394	31.87	36.45	40.51	44.20	47.61	50.79
		6×54	395	31.87	36.45	40.51	44.20	47.61	50.79
	8	неукрућен носач	-	27.89	31.12	34.05	36.74	39.25	41.61
		2×42	95	35.71	39.85	43.60	47.05	50.26	53.28
		4×60	394	35.71	39.85	43.60	47.05	50.26	53.28
		6×54	395	35.71	39.85	43.60	47.05	50.26	53.28
	12	неукрућен носач	-	31.33	34.24	36.92	39.42	41.77	43.67
		2×42	95	40.12	43.85	47.28	50.48	53.48	55.92
		4×60	394	40.12	43.85	47.28	50.48	53.48	55.92
		6×54	395	40.12	43.85	47.28	50.48	53.48	55.92
1.25	2.5	неукрућен носач	-	9.49	10.91	12.17	13.32	14.37	15.35
		1.25×32	101	12.15	13.98	15.59	17.05	18.40	19.65
		2.5×40	291	12.15	13.98	15.59	17.05	18.40	19.65
		3.75×40	386	12.15	13.98	15.59	17.05	18.40	19.65
	5	неукрућен носач	-	10.29	11.62	12.81	13.90	14.91	15.86
		1.25×32	101	13.18	14.88	16.40	17.80	19.09	20.30
		2.5×40	291	13.18	14.88	16.40	17.80	19.09	20.30
		3.75×40	386	13.18	14.88	16.40	17.80	19.09	20.30
	7.5	неукрућен носач	-	11.28	12.51	13.62	14.65	15.61	16.52
		1.25×32	101	14.45	16.02	17.44	18.76	19.99	21.15
		2.5×40	291	14.45	16.02	17.44	18.76	19.99	21.15
		3.75×40	386	14.45	16.02	17.44	18.76	19.99	21.15

У табели 14 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 1$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

Табела 14 Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 1$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5)

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	105.47	119.06	131.25	142.40	152.74	162.42
		4×52	53	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		8×58	118	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		12×50	107	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	16	неукрупњен носач	-	125.23	136.87	147.60	157.60	167.00	174.68
		4×52	53	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		8×58	118	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		12×50	107	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	24	неукрупњен носач	-	145.34	155.49	165.01	174.01	174.68	174.68
		4×52	53	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		8×58	118	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		12×50	107	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
2	4	неукрупњен носач	-	24.88	28.46	31.63	34.52	37.18	39.66
		2×42	95	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		4×60	394	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		6×54	395	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	8	неукрупњен носач	-	27.89	31.12	34.05	36.74	39.25	41.61
		2×42	95	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		4×60	394	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		6×54	395	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	12	неукрупњен носач	-	31.33	34.24	36.92	39.42	41.77	43.67
		2×42	95	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		4×60	394	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		6×54	395	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	9.49	10.91	12.17	13.32	14.37	15.35
		1.25×32	101	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		2.5×40	291	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		3.75×40	386	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	5	неукрупњен носач	-	10.29	11.62	12.81	13.90	14.91	15.86
		1.25×32	101	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		2.5×40	291	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		3.75×40	386	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
	7.5	неукрупњен носач	-	11.28	12.51	13.62	14.65	15.61	16.52
		1.25×32	101	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		2.5×40	291	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
		3.75×40	386	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28

У табели 15 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 2$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 15 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 2$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN-1993-1-5)

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	95.07	107.32	118.31	128.36	137.68	146.40
		4×52	53	111.51	125.88	138.77	150.55	161.48	171.72
		8×58	118	118.73	134.02	147.74	160.29	171.93	182.83
		12×50	107	117.68	132.84	146.44	158.88	170.42	181.22
	16	неукрућен носач	-	112.88	123.38	133.04	142.06	150.53	158.55
		4×52	53	132.40	144.71	156.05	166.62	176.56	185.96
		8×58	118	140.97	154.07	166.14	177.40	187.98	198.00
		12×50	107	139.72	152.71	164.68	175.83	186.32	196.25
	24	неукрућен носач	-	131.01	140.15	148.73	156.85	164.56	171.93
		4×52	53	153.66	164.39	174.45	183.97	193.01	201.66
		8×58	118	163.61	175.02	185.74	195.87	205.50	214.70
		12×50	107	162.16	173.48	184.10	194.14	203.69	212.81
2	4	неукрућен носач	-	22.43	25.65	28.51	31.11	33.51	35.75
		2×42	95	27.50	31.45	34.95	38.14	41.08	43.82
		4×60	394	28.56	32.66	36.30	39.61	42.66	45.51
		6×54	395	28.56	32.66	36.30	39.61	42.66	45.51
	8	неукрућен носач	-	25.14	28.05	30.69	33.12	35.38	37.50
		2×42	95	30.81	34.38	37.62	40.59	43.37	45.97
		4×60	394	32.00	35.71	39.07	42.16	45.04	47.75
		6×54	395	32.00	35.71	39.07	42.16	45.04	47.75
	12	неукрућен носач	-	28.24	30.86	33.28	35.53	37.65	39.65
		2×42	95	34.62	37.83	40.79	43.55	46.15	48.60
		4×60	394	35.95	39.29	42.37	45.23	47.93	50.48
		6×54	395	35.95	39.29	42.37	45.23	47.93	50.48
1.25	2.5	неукрућен носач	-	8.55	9.84	10.97	12.00	12.95	13.83
		1.25×32	101	10.53	12.11	13.51	14.78	15.95	17.03
		2.5×40	291	10.89	12.52	13.97	15.28	16.49	17.61
		3.75×40	386	10.89	12.52	13.97	15.28	16.49	17.61
	5	неукрућен носач	-	9.28	10.47	11.55	12.53	13.44	14.29
		1.25×32	101	11.42	12.90	14.22	15.43	16.55	17.60
		2.5×40	291	11.81	13.33	14.70	15.95	17.11	18.20
		3.75×40	386	11.81	13.33	14.70	15.95	17.11	18.20
	7.5	неукрућен носач	-	10.17	11.27	12.28	13.21	14.07	14.89
		1.25×32	101	12.53	13.88	15.12	16.26	17.33	18.33
		2.5×40	291	12.95	14.35	15.63	16.81	17.92	18.96
		3.75×40	386	12.95	14.35	15.63	16.81	17.92	18.96

У табели 16 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 2$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

Табела 16 Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 2$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5)

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	95.07	107.32	118.31	128.36	137.68	146.40
		4×52	53	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
		8×58	118	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
		12×50	107	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
	16	неукрупњен носач	-	112.88	123.38	133.04	142.06	150.53	158.55
		4×52	53	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
		8×58	118	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
		12×50	107	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
	24	неукрупњен носач	-	131.01	140.15	148.73	156.85	164.56	171.93
		4×52	53	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
		8×58	118	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
		12×50	107	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
2	4	неукрупњен носач	-	22.43	25.65	28.51	31.11	33.51	35.75
		2×42	95	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		4×60	394	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		6×54	395	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
	8	неукрупњен носач	-	25.14	28.05	30.69	33.12	35.38	37.50
		2×42	95	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		4×60	394	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		6×54	395	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
	12	неукрупњен носач	-	28.24	30.86	33.28	35.53	37.65	39.65
		2×42	95	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		4×60	394	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		6×54	395	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	8.55	9.84	10.97	12.00	12.95	13.83
		1.25×32	101	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		2.5×40	291	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		3.75×40	386	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
	5	неукрупњен носач	-	9.28	10.47	11.55	12.53	13.44	14.29
		1.25×32	101	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		2.5×40	291	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		3.75×40	386	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
	7.5	неукрупњен носач	-	10.17	11.27	12.28	13.21	14.07	14.89
		1.25×32	101	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
		2.5×40	291	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
		3.75×40	386	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27

У табели 17 су приказане граничне носивости подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених носача (F_{stiff}) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 3$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост су дате у kN.

Табела 17 Гранична носивост подужно неукрућених ($F_{unstiff}$) и подужно укрућених (F_{stiff}) танкозидних челичних носача за $\alpha = 3$. (Јединице за $F_{unstiff}$ и F_{stiff} су у kN.) (EN 1993-1-5)

t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрућен носач	-	93.02	105.00	115.75	125.59	134.70	143.24
		4×52	53	101.02	114.03	125.71	136.39	146.29	155.56
		8×58	118	104.71	118.20	130.30	141.37	151.63	161.24
		12×50	107	104.17	117.59	129.63	140.64	150.85	160.41
	16	неукрућен носач	-	110.44	120.71	130.17	138.99	147.28	155.12
		4×52	53	119.94	131.09	141.37	150.94	159.94	168.47
		8×58	118	124.32	135.88	146.53	156.45	165.79	174.62
		12×50	107	123.68	135.18	145.77	155.65	164.93	173.72
	24	неукрућен носач	-	128.18	137.13	145.52	153.46	161.01	168.21
		4×52	53	139.20	148.92	158.04	166.66	174.85	182.68
		8×58	118	144.29	154.36	163.81	172.75	181.24	189.36
		12×50	107	143.54	153.56	162.96	171.85	180.30	188.38
2	4	неукрућен носач	-	21.95	25.10	27.90	30.44	32.79	34.97
		2×42	95	24.44	27.95	31.07	33.90	36.51	38.95
		4×60	394	26.76	30.61	34.02	37.12	39.98	42.65
		6×54	395	26.77	30.61	34.03	37.13	39.99	42.66
	8	неукрућен носач	-	24.59	27.44	30.03	32.40	34.61	36.69
		2×42	95	27.39	30.56	33.43	36.08	38.54	40.86
		4×60	394	29.99	33.47	36.62	39.51	42.21	44.75
		6×54	395	30.00	33.48	36.62	39.52	42.22	44.76
	12	неукрућен носач	-	27.63	30.19	32.56	34.76	36.83	38.79
		2×42	95	30.77	33.62	36.26	38.71	41.02	43.20
		4×60	394	33.69	36.82	39.71	42.39	44.92	47.31
		6×54	395	33.70	36.83	39.71	42.40	44.93	47.32
1.25	2.5	неукрућен носач	-	8.37	9.62	10.74	11.74	12.67	13.53
		1.25×32	101	9.34	10.75	11.99	13.11	14.15	15.11
		2.5×40	291	9.97	11.47	12.79	13.99	15.09	16.12
		3.75×40	386	10.19	11.72	13.07	14.30	15.43	16.48
	5	неукрућен носач	-	9.08	10.25	11.30	12.26	13.15	13.98
		1.25×32	101	10.13	11.44	12.61	13.69	14.68	15.61
		2.5×40	291	10.81	12.21	13.46	14.60	15.66	16.66
		3.75×40	386	11.05	12.48	13.76	14.93	16.01	17.03
	7.5	неукрућен носач	-	9.95	11.03	12.01	12.92	13.77	14.57
		1.25×32	101	11.11	12.32	13.41	14.43	15.37	16.26
		2.5×40	291	11.86	13.14	14.31	15.39	16.40	17.35
		3.75×40	386	12.12	13.43	14.63	15.73	16.76	17.74

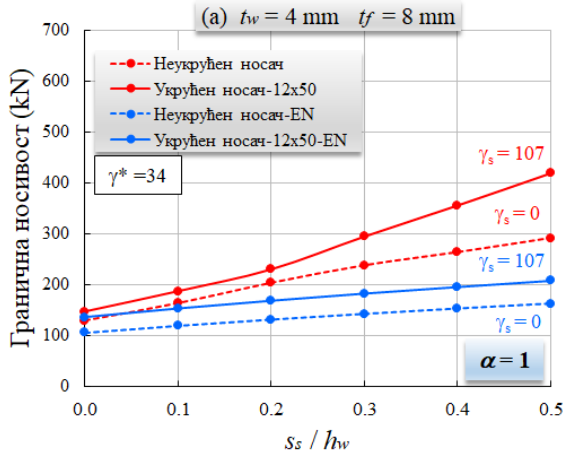
У табели 18 су приказани ефекти ојачања подужно укрупњених ($\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$) и гранична носивост подужно неукрупњених носача ($F_{unstiff}$) добијене примјеном израза из EN 1993-1-5, за однос дужине и висине оптерећеног панела $\alpha = 3$ и за различите дужине оптерећења s_s . Јединице за граничну носивост неукрупњених носача су дате у kN.

Табела 18 Гранична носивост подужно неукрупњених танкозидних челичних носача ($F_{unstiff}$) и одговарајући ефекат ојачања $\beta = F_{stiff}/F_{unstiff}$ за $\alpha = 3$. (Јединице за $F_{unstiff}$ су у kN.) (EN 1993-1-5)

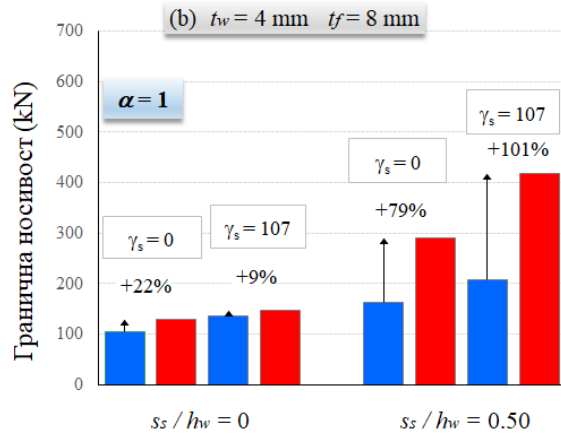
t_w (mm)	t_f (mm)	$t_s \times b_s$ (mm)	γ_s -	s_s/h_w					
				0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
4	8	неукрупњен носач	-	93.02	105.00	115.75	125.59	134.70	143.24
		4×52	53	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
		8×58	118	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
		12×50	107	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	16	неукрупњен носач	-	110.44	120.71	130.17	138.99	147.28	155.12
		4×52	53	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
		8×58	118	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
		12×50	107	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	24	неукрупњен носач	-	128.18	137.13	145.52	153.46	161.01	168.21
		4×52	53	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
		8×58	118	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
		12×50	107	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
2	4	неукрупњен носач	-	21.95	25.10	27.90	30.44	32.79	34.97
		2×42	95	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
		4×60	394	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
		6×54	395	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
	8	неукрупњен носач	-	24.59	27.44	30.03	32.40	34.61	36.69
		2×42	95	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
		4×60	394	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
		6×54	395	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
	12	неукрупњен носач	-	27.63	30.19	32.56	34.76	36.83	38.51
		2×42	95	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
		4×60	394	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
		6×54	395	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
1.25	2.5	неукрупњен носач	-	8.37	9.62	10.74	11.74	12.67	13.53
		1.25×32	101	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
		2.5×40	291	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
		3.75×40	386	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
	5	неукрупњен носач	-	9.08	10.25	11.30	12.26	13.15	13.98
		1.25×32	101	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
		2.5×40	291	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
		3.75×40	386	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
	7.5	неукрупњен носач	-	9.95	11.03	12.01	12.92	13.77	14.57
		1.25×32	101	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
		2.5×40	291	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
		3.75×40	386	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22

3.5.2 Упоредни дијаграми граничне носивости EN 1993-1-5 / нумеричка анализа

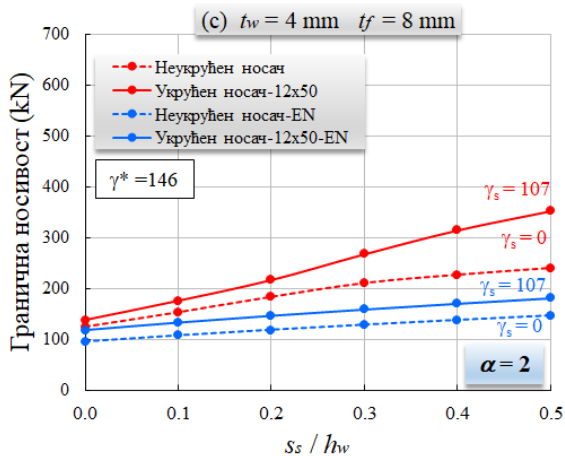
На слици 60 су дати упоредни дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења добијени нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5. Дијаграми су дати за неукрућене и укрућене носаче мале виткости ребра ($t_w = 4 \text{ mm}$), најмање дебљине појаса ($t_f = 2t_w$) и најдебље укрућење ($t_s = 3t_w$), за сва три распона ($\alpha = 1, 2, 3$).



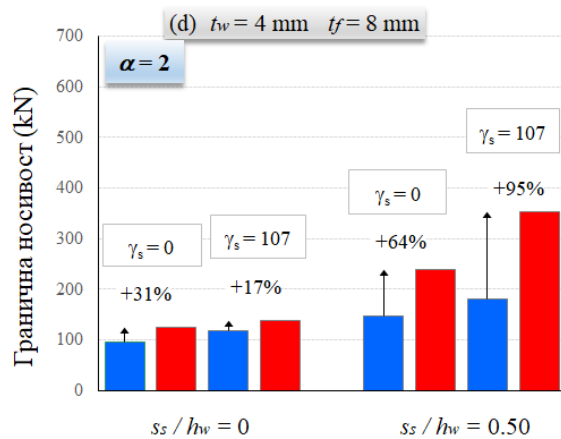
а) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



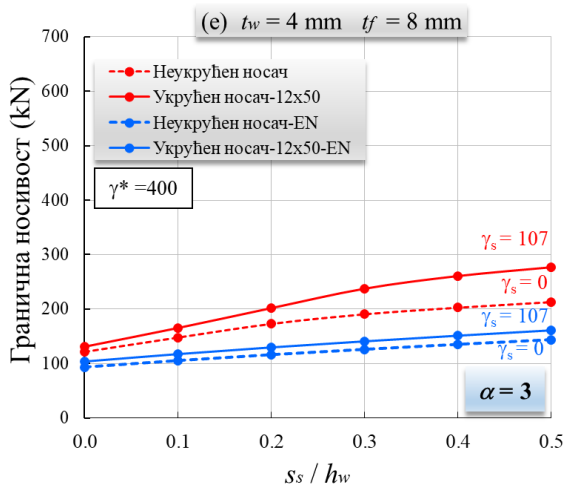
б) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



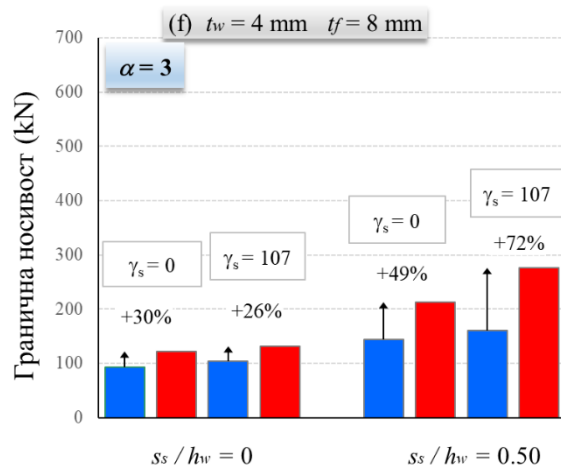
в) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



г) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



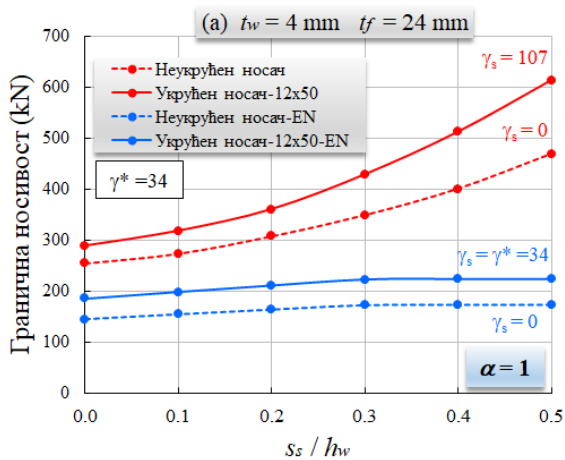
д) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



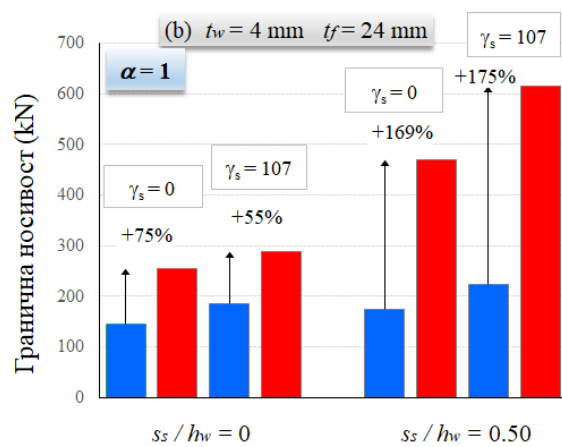
е) процентуално однос: нумеричка анализа / EN

Слика 60 Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN - $t_w=4$, $t_f=8$, $t_s=12$, $\alpha=1,2,3$

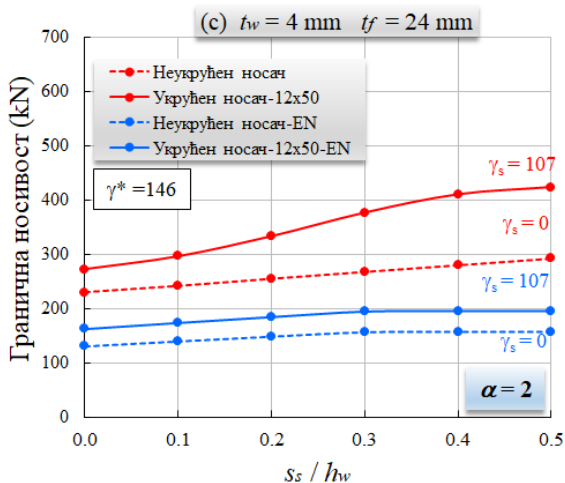
На слици 61 су дати упоредни дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења добијени нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5. Дијаграми су дати за неукрућене и укрућене носаче мале виткости ребра ($t_w = 4 \text{ mm}$), највеће дебљине појаса ($t_f = 6t_w$) и најдебље укрућење ($t_s = 3t_w$), за сва три распона ($\alpha = 1, 2, 3$).



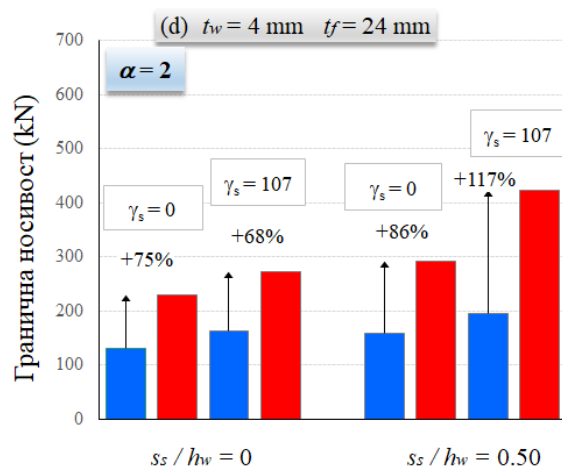
a) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



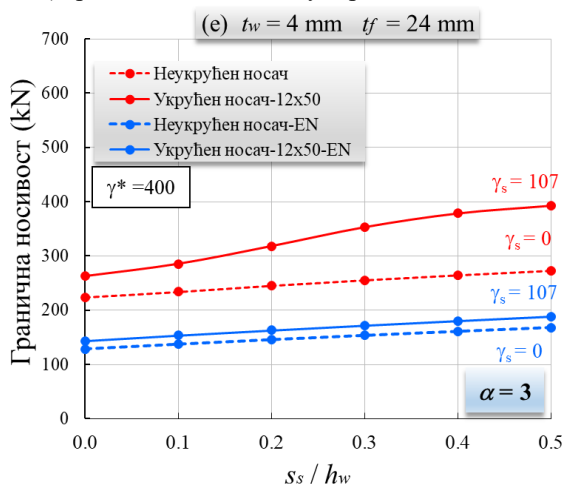
b) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



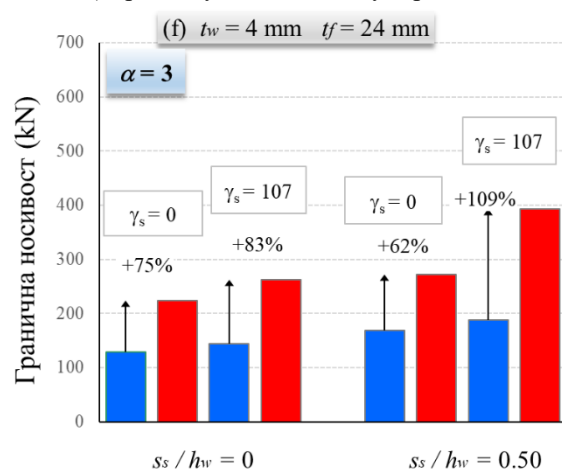
c) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



d) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



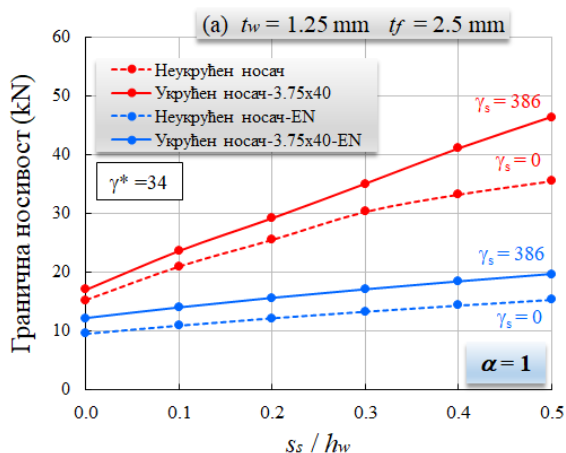
e) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



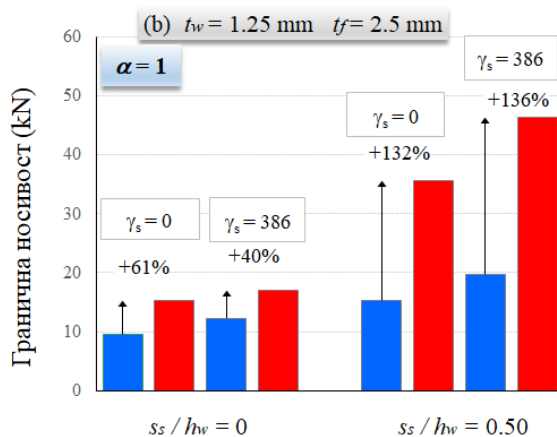
f) процентуално однос: нумеричка анализа / EN

Слика 61 Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=4$, $t_f=24$, $t_s=12$, $\alpha=1,2,3$

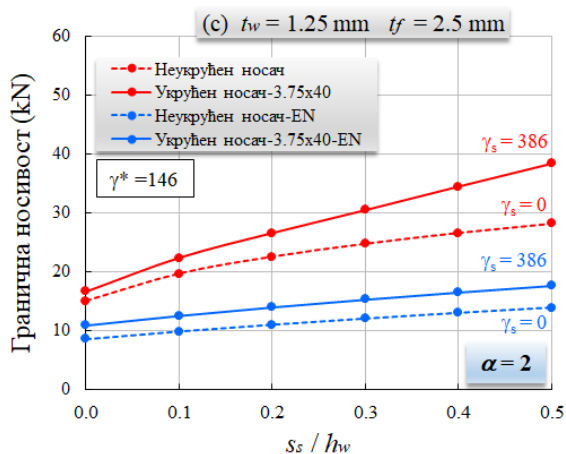
На слици 62 су дати упоредни дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења добијени нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5. Дијаграми су дати за неукрућене и укрућене носаче велике виткости ребра ($t_w = 1.25$ mm), најмање дебљине појаса ($t_f = 2t_w$) и најдебље укрућење ($t_s = 3t_w$), за сва три распона ($\alpha = 1, 2, 3$).



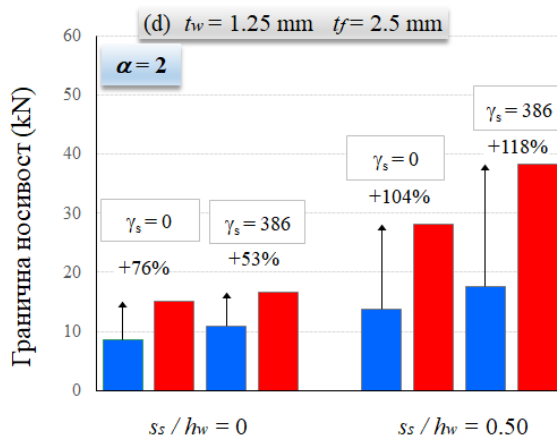
а) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



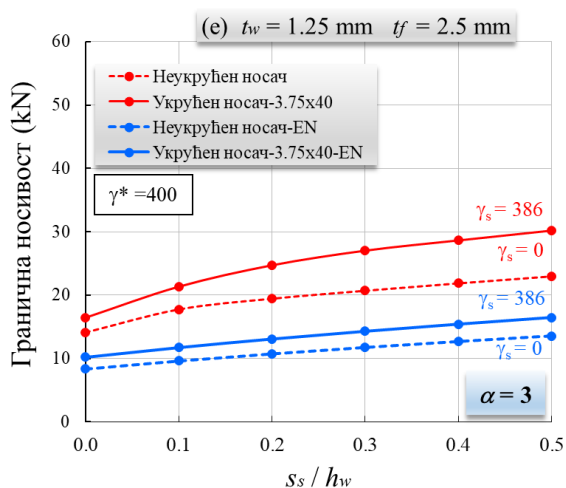
б) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



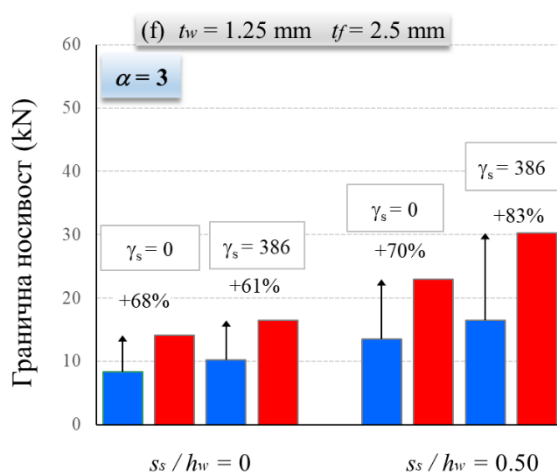
с) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



д) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



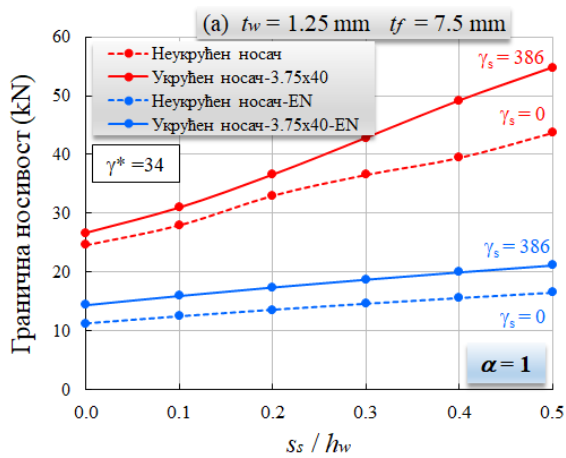
е) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



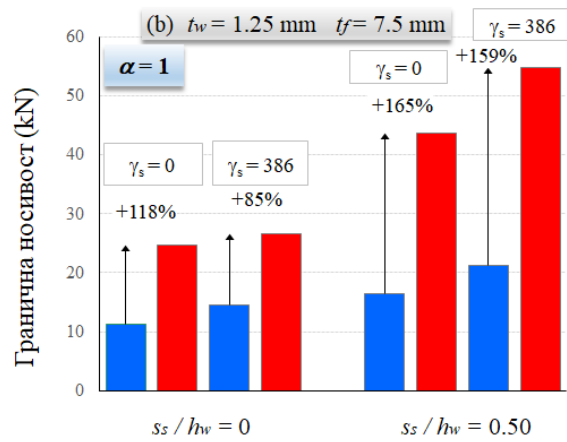
ф) процентуално однос: нумеричка анализа / EN

Слика 62 Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=1.25$, $t_f=2.5$, $t_s=3.75$, $\alpha=1,2,3$

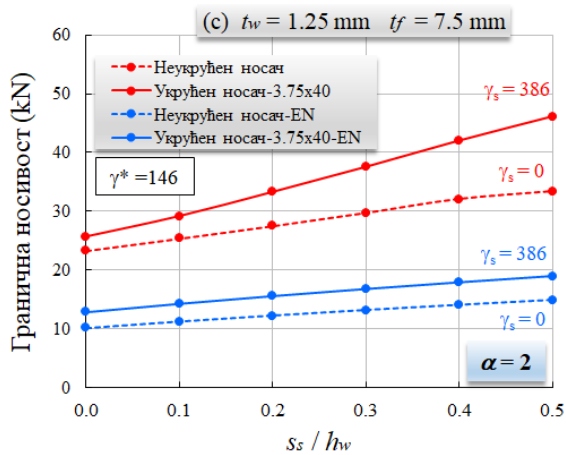
На слици 63 су дати упоредни дијаграми граничне носивости у функцији дужине оптерећења добијени нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5. Дијаграми су дати за неукрућене и укрућене носаче велике виткости ребра ($t_w = 1.25$ mm), највеће дебљине појаса ($t_f = 6t_w$) и најдебље укрућење ($t_s = 3t_w$), за сва три распона ($\alpha = 1, 2, 3$).



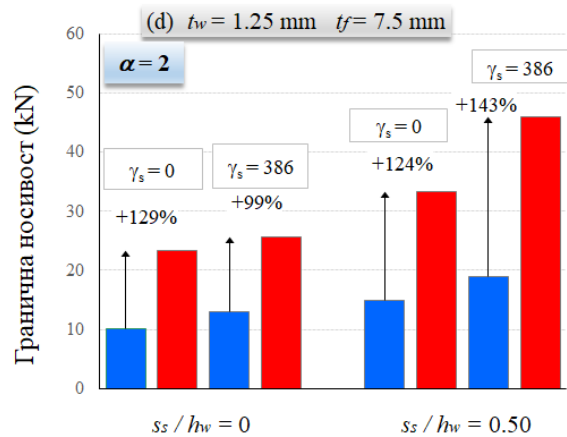
а) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



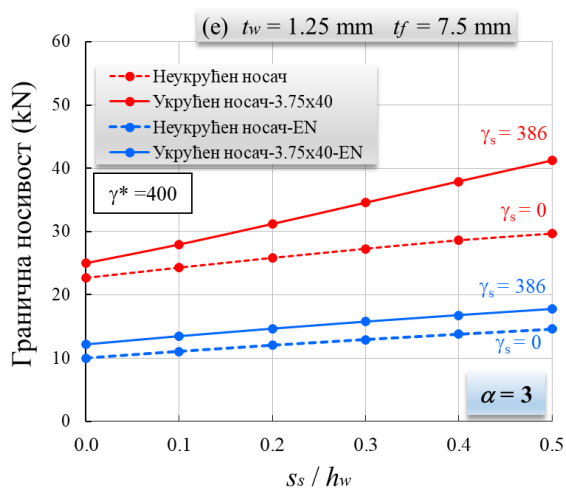
б) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



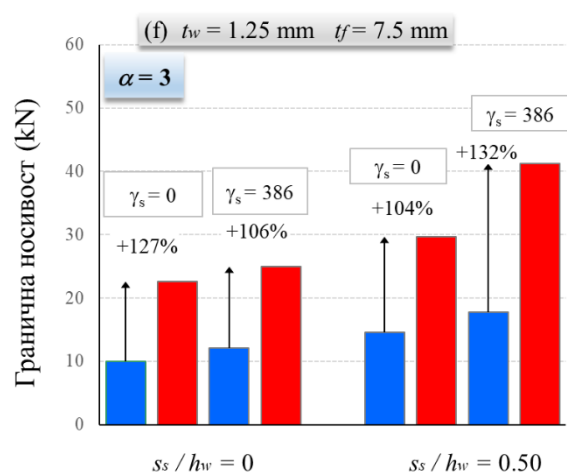
в) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



г) процентуално однос: нумеричка анализа / EN



д) гранична носивост: нумеричка анализа / EN



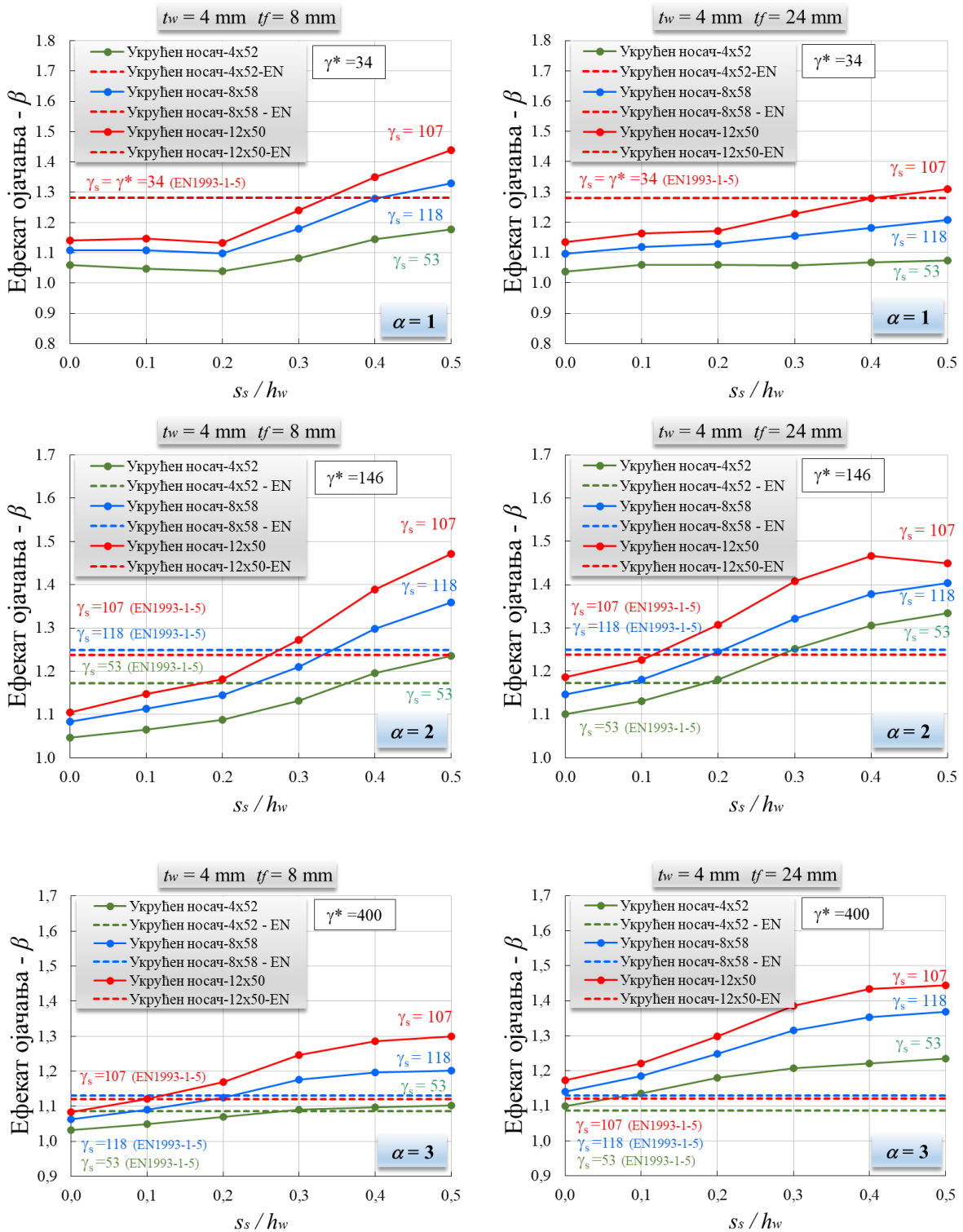
е) процентуално однос: нумеричка анализа / EN

Слика 63 Упоредни дијаграми граничне носивости носача добијене нумеричком анализом и прорачуном на основу EN 1993-1-5 – $t_w=1.25$, $t_f=7.5$, $t_s=3.75$, $\alpha=1,2,3$

3.5.3 Упоредни дијаграми ефекта ојачања EN 1993-1-5 / нумеричка анализа

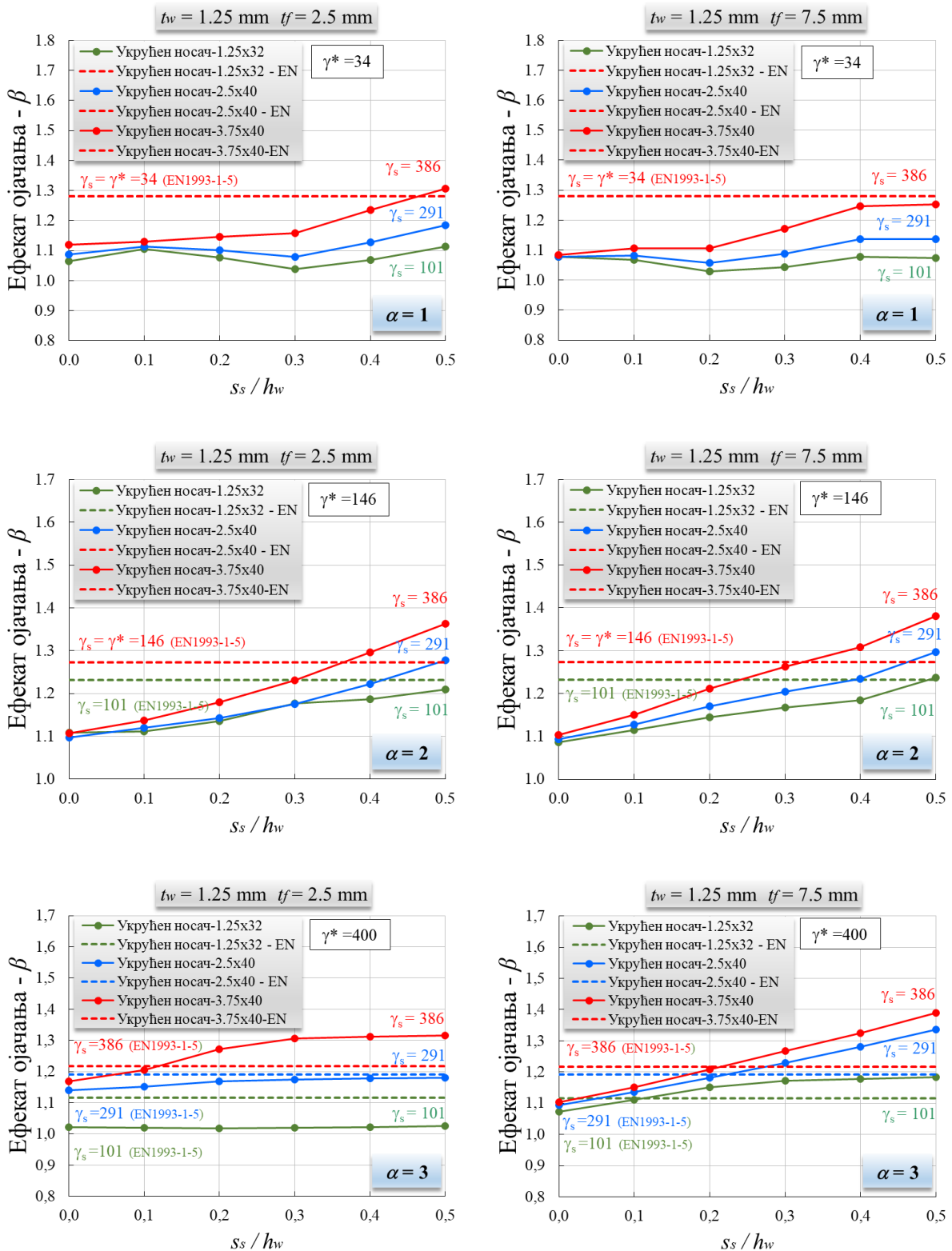
За горе одабране носаче (као граничне случајеве) на следећим дијаграмима су графички представљени ефекти ојачања у функцији дужине оптерећења који су добијени нумеричком анализом и на основу EN 1993-1-5.

- ребро велике виткости $t_w = 4 \text{ mm}$



Слика 64 Упоредни дијаграми ефекта ојачања носача добијених нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=4, t_f=8$ (24)

- ребро мале виткости $t_w = 1.25 \text{ mm}$



Слика 65 Упоредни дијаграми ефекта ојачања носача добијених нумеричком анализом и прорачуном на основу EN – $t_w=1.25$, $t_f=2.5$ (7.5)

Гранична носивост свих носача коришћених у овој параметарској анализи срачуната је на основу важећег европског стандарда EN 1993-1-5. Извод из овог стандарда са алгоритмом прорачуна граничне носивости подужно неукрућених и укрућених носача је дат у поглављу 2.4.

У табелама 13-18 су дате вриједности израчунатих граничних носивости на основу EN 1993-1-5 као и одговарајући ефекти ојачања. На сликама 60-61 је дат графички приказ ефекта ојачања у функцији дужине оптерећења за горе одабране носаче са граничним вриједностима појединих параметара.

Поређењем резултата добијених нумеричком анализом и коришћењем EN 1993-1-5 могу се извући следећи закључци:

1. Нумеричком анализом је запажено да ефекат ојачања зависи од дужине нашошења оптерећења, виткости ребра, односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, крутости подужног укрућења и крутости оптерећеног појаса.
2. Посматрајући слике 34-42 из нумеричке анализе, за носаче са малом виткости ребра ($t_w = 4$ mm), највећи ефекат ојачања се добија за крутост укрућења $\gamma_s = 107$, а не за $\gamma_s = 118$. Ово важи за све односе дужине и висине оптерећеног панела ребра и разматране дужине оптерећења.
3. Из нумеричке анализе се такође може видјети да је занемарљиво повећање релативне крутости на савијање $\gamma_s = 394 \rightarrow \gamma_s = 395$ за средњу виткост ребра ($t_w = 2$) дало је много веће ефекте ојачања од очекиваних (Табеле 6-11), посебно за веће дужине оптерећења ($s_s / h_w = 0.50$). Иако је релативна крутост на савијање γ_s за ова два укрућења скоро иста, већа дебљина укрућења је утицала на повећање ефекта ојачања.
4. Ефекат ојачања добијен на основу EN 1993-1-5 је константан за све дужине оптерећења, што је у супротности са резултатима спроведене нумеричке анализе.
5. Ефекат ојачања добијен на основу EN 1993-1-5 не зависи од односа дужине и висине оптерећеног панела ребра.
6. Ефекат ојачања добијен на основу EN 1993-1-5 не зависи од крутости појаса.
7. Ефекат ојачања добијен на основу EN 1993-1-5 се повећава све док $\gamma_s = \gamma^*$ и након тога престаје да се повећава.
8. Ефекат ојачања наставља да расте чак и за $\gamma_s \gg \gamma^*$ (слика 64, слика 65), што се не очекује на основу предвиђања EN 1993-1-5. Усвојена крутост подужног укрућења γ' (слика 64, слика 65) је далеко изнад γ^* међутим ефекат ојачања наставља да се повећава.8

Крутост на савијање подужног укрућења у изразу (2.4.9) је повезана са померањима изван равни ребра на позицији укрућења. У појединим случајевима, повећање те крутости подужног укрућења (повећање ширине укрућења b_s) не мора нужно довести до већих граничних носивости.

Из ове нумеричке анализе се чини да за малу (и средњу) виткост ребра, осим те крутости и крутост подужног укрућења у равни укрућења (или торзиона крутост) игра важну улогу (повећањем дебљине подужног укрућења се повећава гранична носивост).

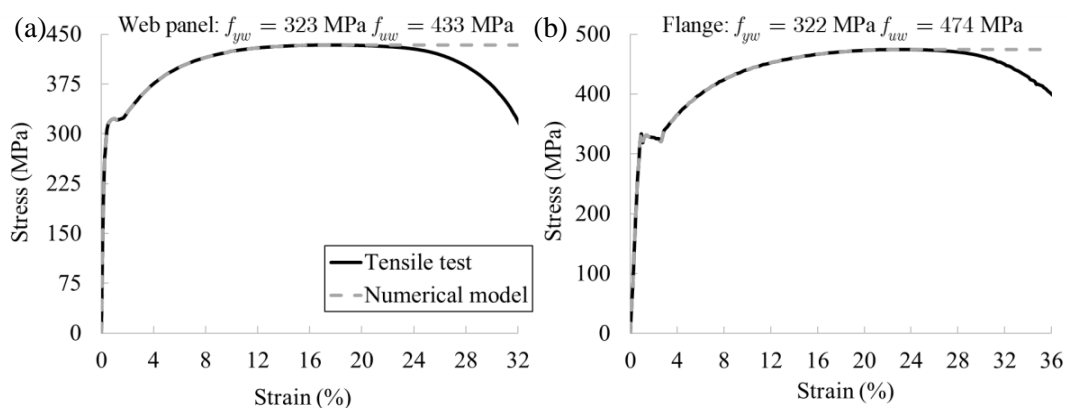
Тачна идентификација утицаја ове крутости на граничну носивост је несумњиво од велике важности и захтијева додатна истраживања. Анализом резултата ове нумеричке анализе у поглављу 5.1 дат је предлог формуле која увођењем торзионе крутости укрућења у прорачун граничне носивости на приближан начин обухвата овај утицај.

3.6 ГРАНИЧНА НОСИВОСТ – МОДЕЛ МАТЕРИЈАЛА

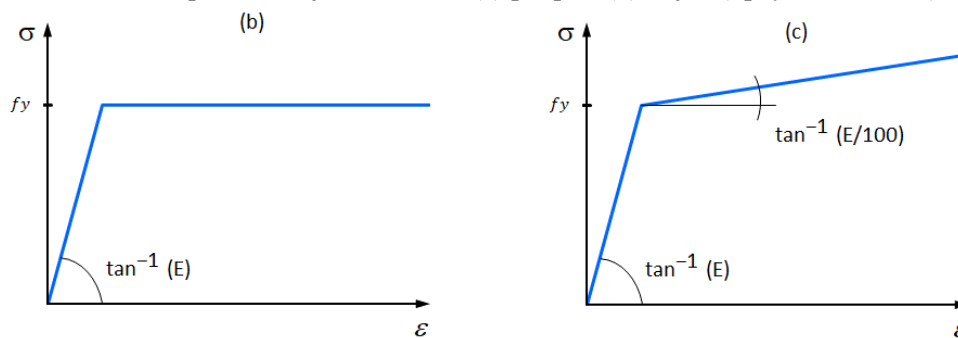
Карактеристике материјала коришћене у нумеричком моделу су добијене као просечне вриједности података одређених у стандардним тестовима затезања у експерименту [29].

У циљу провјере валидности материјалног модела коришћеног у нумеричким анализама извршена је упоредна анализа добијених резултата са резултатима из нумеричких модела у којима су коришћени апроксимативни материјални модели предложени у EN 1993-1-5 Annex C. Резултати су провјерени и са моделом материјала предложеним у стандарду BSK 07 [80].

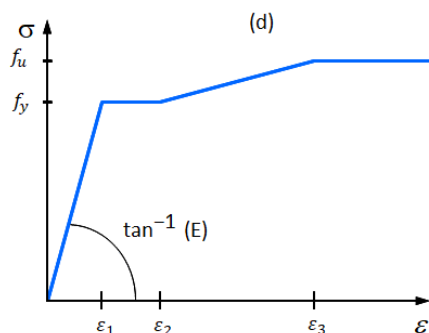
На слици 66 су дати упоређени материјални модели: (a) и (b) нелинеарна крива напон-дилатација идеализована мултилинеарном кривом која је коришћена у нумеричким моделима, (c) билинеарна σ - ε крива без ојачања (на основу препорука EN 1993-1-5), (d) билинеарна σ - ε крива са ојачањем (на основу препорука EN 1993-1-5) и (e) мултилинерани материјални модел на основу стандарда BSK 07.



M1 - σ - ε крива добијена тестом: (a) ребро, (b) појас (преузето из [30])



(c) M2 - билинерана σ - ε крива без ојачања (d) M3 - билинеарна σ - ε крива са ојачањем



(e) M4 - мултилинерани материјални модел на основу стандарда BSK 07

Слика 66 Модел материјала - σ - ε крива

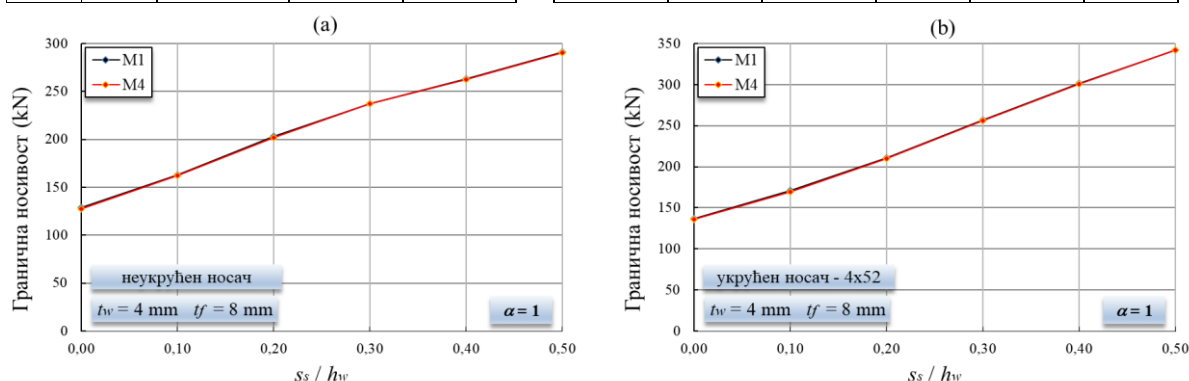
Као што је поменуто у 3.2, карактеристике материјала коришћене у нумеричком моделу су добијене као просечне вриједности података одређених у стандардним тестовима затезања у експерименту [29]. Добијена граница течења ребра је $f_{yw}=323$ МПа, а појаса $f_{yf}=322$ МПа. Ове вриједности су коришћене и прилоком формирања апроксимативних материјалних модела.

У табели 19 су приказане граничне носивости као и процентуалне разлике између граничних носивости добијених употребом различитих модела материјала. Гранична носивост је одређена за двије групе носача (неукрућен и укрућен носач) - $t_w=4$, $t_f=8$, $\alpha=1$.

$F_n(M1)$ представља граничну носивост добијену употребом модела материјала M1 (σ - ϵ крива добијене тестом), а $F_n(M2)$, $F_n(M3)$ и $F_n(M4)$ представљају граничне носивости добијен употребом апроксимативних модела материјала M2, M3 и M4, респективно. Разлике између граничне носивости $F_n(M1)$ и граничних носивости $F_n(M2)$, $F_n(M3)$ и $F_n(M4)$, изражене у процентима су $\Delta M2$, $\Delta M3$ и $\Delta M4$, респективно.

Табела 19 Гранична носивост за различите материјалне моделе

t_w	t_f	$t_s \times b_s$	s_s/h_w	$F_n(M1)$	$F_n(M2)$	$\Delta M2$	$F_n(M3)$	$\Delta M3$	$F_n(M4)$	$\Delta M4$
mm	mm	mm		kN	kN	%	kN	%	kN	%
4	8	неукрућен	0	128.94	119.66	-7.2	130.84	1.5	127.70	-1.0
			0.1	163.14	156.39	-4.1	167.24	2.5	162.43	-0.4
			0.2	203.05	200.33	-1.3	208.38	2.6	201.57	-0.7
			0.3	237.50	237.02	-0.2	240.25	1.2	237.02	-0.2
			0.4	263.25	262.82	-0.2	265.74	0.9	262.82	-0.2
			0.5	291.11	290.65	-0.2	293.70	0.9	290.65	-0.2
			4	8	4 X 52	0	136.56	130.36	-4.5	139.68
			0.1	170.70	167.16	-2.1	174.61	2.3	169.81	-0.5
			0.2	210.84	209.61	-0.6	215.89	2.4	209.91	-0.4
			0.3	256.70	256.03	-0.3	261.04	1.7	256.05	-0.3
			0.4	301.22	300.60	-0.2	305.07	1.3	300.61	-0.2
			0.5	342.44	341.82	-0.2	346.25	1.1	341.83	-0.2



Слика 67 Гранична носивост за модел материјала M1, M4 – (a) неукрућен носач, (b) укрућен носач

Може се закључити да не постоје велика одступања у резултатима граничне носивости коришћењем различитих материјалних модела. Највеће одступање се добије уколико се користи билинеарна крива без ојачања, нешто мања одступања употребом билеарне криве са ојачањем док се најмања одступања добијају употребом мултилинеарне криве на основу стандарда BSK 07 [80]. На слици 67 је приказан дијаграм граничне носивости у функцији дужине оптерећења за материјалне моделе M1(σ - ϵ крива добијена тестом) и M4(BSK 07) за подужно неукрућен и подужно укрућен носач.

ИЗРАЗ ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ГРАНИЧНЕ НОСИВОСТИ

На основу спроведене параметарске анализе и добијених нумеричких резултата (Поглавље 3) у овом поглављу је дефинисан математички израз за одређивање граничне носивости подужно неукрућених и подужно укрућених носача. Предложени израз је валидан за односе параметара који су дефинисани у Поглављу 3.

Гранична носивост подужно неукрућених лимених носача услед дејства локалног оптерећења може се одредити користећи следећи израз:

$$F_{rf} = 0.75 \cdot f(\alpha) \cdot f\left(\frac{h_w}{t_w}\right) \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{E f_{yw}} \cdot \sqrt{\frac{t_f}{t_w}} \cdot f^{unstiff}(s_s) \quad (4.1)$$

гдје $f(\alpha)$, $f\left(\frac{h_w}{t_w}\right)$ и $f^{unstiff}(s_s)$ представљају утицај односа дужине и висине оптерећеног панела, виткости ребра и дужине наношења оптерећења. Ове функције су дефинисане на следећи начин :

$$f(\alpha) = 1 - 0.1 \cdot \alpha; \quad f\left(\frac{h_w}{t_w}\right) = 0.8 + 0.0008 \cdot \frac{h_w}{t_w} \leq 1; \quad f^{unstiff}(s_s) = 1 + 4.5 \cdot \frac{s_s}{h_w} \cdot \frac{t_w}{t_f} \quad (4.2)$$

Гранична носивост подужно укрућених лимених носача услед дејства локалног оптерећења може се одредити користећи следећи израз:

$$F_{rf}^{stiff} = F_{rf}^{unstiff} \cdot f(b_1) \cdot f^{stiff}(s_s) \quad (4.3)$$

гдје $f(b_1)$ и $f^{stiff}(s_s)$ представљају утицај положаја подужног укрућења и утицај дужине локалног оптерећења. Ове функције су дефинисане на следећи начин :

$$f(b_1) = 1.28 - 0.7 \cdot \frac{b_1}{h_w}; \quad 0.1 < \frac{b_1}{h_w} < 0.4 \quad (4.4)$$

$$f^{stiff}(s_s) = (0.9 + 0.005 \cdot \sqrt{\gamma_s \cdot \varphi_s}) + (0.2 + 0.003 \cdot \sqrt{\gamma_s \cdot \varphi_s}) \frac{s_s}{h_w} \quad (4.5)$$

Једначина (4.4) је првобитно предложена од аутора Марковића и Хајдина [5] на основу експерименталних резултата и имплементирана је у стандард за пројектовање BS 5400-3 [64]. Она представља *ефекат ојачања* (корекциони фактор или фактор увећања) – односно укупан допринос подужног укрућења.

У предлогу формуле, који је дат у овом раду, ефекат ојачања је разложен на два дијела: утицај положаја подужног укрућења и утицај дужине локалног оптерећења. Изрази за ове утицаје су дати у једначинама (4.4) и (4.5). Према томе, израз за граничну носивост подужно укрућених лимених носача (3) може се написати као:

$$F_{rf}^{stiff} = F_{rf}^{unstiff} \cdot f(s) \quad f(s) = f(b_1) \cdot f^{stiff}(s_s) \quad (4.6)$$

Функције $f^{unstiff}(s_s)$ и $f^{stiff}(s_s)$ су линеарне у функцији дужине оптерећења s_s . Коришћењем израза (4.1–4.5) и замјеном у израз (4.6), закључује се да је укупни утицај дужине оптерећења производ функција $f^{unstiff}(s_s)$ и $f^{stiff}(s_s)$, односно да је утицај дужине оптерећења на граничну носивост квадратна функција. Утицај $f^{unstiff}(s_s)$ и $f^{stiff}(s_s)$ на F_{rf}^{stiff} је мали за мање дужине оптерећења, док је за веће дужине оптерећења њихов утицај израженији.

Предложена формула на добар начин описује резултате граничне носивости подужно укрупњених лимених носача оптерећених локалним оптерећењем добијене експериментално [29], [31] нумерички [30], [38] као и резултате добијене у овој параметарској анализи (Поглавље 3).

У изразу (4.5) γ_s и φ_s су релативна крутост на савијање и релативна торзиона крутост подужног укрупњења дате као:

$$\gamma_s = \frac{E \cdot I_{st}}{h_w \cdot D} \quad \varphi_s = \frac{G \cdot K_s}{h_w \cdot D} \quad (4.7)$$

гдје су D , G и K_s крутост на савијање јединичне ширине ребра, модуо клизања и торзиона константа за плочаста подужна укрупњења. Ове величине су дефинисане изразима:

$$D = \frac{E t_w^3}{12(1 - \nu^2)} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad K_s = \frac{b_s t_s^3}{3} \quad (4.8)$$

Статистичка анализа резултата

Квалитет предложеног израза је провјерен статистичком анализом у којој је израчуната средња вриједност (m), средње квадратно одступање (s), и коефицијент варијације (v):

$$m_i = \frac{F_{rf}}{F_R} \quad m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m)^2}{n}} \quad v = \frac{s}{m}$$

Резултати статистичке анализе су дати у табели 20 за: нумеричку анализу (анализа из ове дисертације), експерименталне резултате [29], [31] и нумеричку анализу [38].

Табела 20 Статистички подаци – гранична носивост одређена на основу предложеног израза

		m	s	v
Носачи без подужних укрупњења	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.76	0.06	7 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.8	0.06	7 %
	Нумеричка анализа [38]	0.76	0.04	6 %
Носачи са подужним укрупњењима	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.76	0.06	8 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.78	0.05	6 %
	Нумеричка анализа [38]	0.75	0.07	9 %
Сви носачи	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.76	0.06	8 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.79	0.05	7 %
	Нумеричка анализа [38]	0.75	0.06	8 %

Табела 21 Статистички подаци – гранична носивост одређена на основу EN 1993-1-5

		m	s	v
Носачи без подужних укрућења	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.53	0.08	16 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.67	0.04	6 %
	Нумеричка анализа [38]	0.55	0.07	13 %
Носачи са подужним укрућењима	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.55	0.10	18 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.68	0.09	13 %
	Нумеричка анализа [38]	0.56	0.13	23 %
Сви носачи	Нумеричка анализа из ове дисертације	0.54	0.10	17 %
	Експериментални резултати [29], [31]	0.68	0.07	10 %
	Нумеричка анализа [38]	0.56	0.11	20 %

Примјеном предложеног израза и поређењем резултата са нумеричком анализом добија се средња вриједност од 0.76 и коефицијент варијације 8% док се поређењем резултата израчунатих на основу EN 1993-1-5 и резултата нумеричке анализе добија се средња вриједност од 0.54 и коефицијент варијације 17%.

Резултати добијени изразом у поређењем са резултатима експеримента [29], [31] дају средњу вриједност од 0.79 и коефицијент варијације 7% , док резултати добијени на основу EN 1993-1-5 у поређењем са резултатима експеримента [29], [31] дају средњу вриједност од 0.68 и коефицијент варијације 10%.

На крају резултати су упоређени и са нумеричким истраживањем [31]. За те резултате предложени израз даје средњу вриједност од 0.75 и коефицијент варијације 8% док EN 1993-1-5 даје средњу вриједност од 0.56 и коефицијент варијације 20%. Може се закључити да предложени израз на задовољавајући начин прати резултате спроведене нумеричке анализе и референтних истраживања, са знатно већом средњом вриједношћу и мањим коефицијентом варијације у односу на EN 1993-1-5. Средња вриједност и коефицијент варијације, за резултате на основу дефинисаног израза у овом истраживању за све посматране случајеве имају уједначене вредности, што није случај за резултате на основу EN 1993-1-5.

ЗАКЉУЧЦИ И ПРЕПОРУКЕ ЗА ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

У овој студији је нумерички анализиран утицај подужних укрућења на граничну носивост лимених носача услед дејства локалног попречног оптерећења које дјелује на одређеној дужини појаса носача. Утицај је разматран кроз анализу граничне носивости и ефекта ојачања, који представља однос граничне носивости подужно укрућених и неукрућених носача. Варирани параметри у спроведеној параметарској анализи су: дужина оптерећења, дужина оптерећеног панела ребра, дебљина ребра, дебљина оптерећеног појаса и димензије (крутост) подужног укрућења.

5.1 ЗАКЉУЧЦИ

Главни закључак је да гранична носивост подужно укрућених носача не зависи на исти начин од дужине оптерећења као гранична носивост неукрућених носача. Ово значи да ефекат ојачања зависи од дужине оптерећења. Додатно, могу се извести следећи закључци:

Гранична носивост

Гранична носивост подужно неукрућених и подужно укрућених носача зависи од дужине оптерећења, односа дужине и висине оптерећеног панела ребра, крутости оптерећеног појаса, релативне крутости подужног укрућења и виткости ребра. Гранична носивост се повећава са повећањем дебљине ребра, дебљине појаса, крутости подужних укрућења и дужине оптерећења, док се смањује како се повећава однос дужине и висине оптерећеног панела.

Утицај односа дужине и висине на граничну носивост оптерећеног панела је израженији за веће дужине оптерећења. Однос дужине и висине оптерећеног панела ребра има мали утицај на граничну носивост за мање дужине оптерећења. Утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра је израженији за веће дужине оптерећења. Спроведена студија показује да утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра на граничну носивост зависи од крутости оптерећеног појаса, релативне крутости подужног укрућења и дужине оптерећења. Утицај односа дужине и висине оптерећеног панела ребра је знатно израженији код подужно неукрућених него код подужно укрућених носача

Утицај дебљине појаса на граничну носивост зависи од виткости ребра и дужине оптерећења. Гранична носивост и подужно неукрућених и подужно укрућених лимених носача расте како се повећава дебљина појаса. Утицај дебљине појаса се смањује са повећањем виткости ребра.

Ефекат ојачања

Ова анализа показује да ефекат ојачања зависи од дужине оптерећења, виткости ребра, односа дужине и висине оптерећеног панела, крутости оптерећеног појаса и крутости подужног укрућења

Утврђено ја да мале дужине оптерећења дају мали ефекат ојачања и да долази до значајног пораста овог ефекта са повећањем дужине оптерећења. Осим тога, већи ефекат ојачања дају дебљи оптерећени појас и 'јача' подужна укрућења. У случају најјачег подужног укрућења и $s_s/h_w \leq 0.10$, ефекат ојачања је био у распону од 8 - 19 % док је за $s_s/h_w = 0.50$ ефекат ојачања био између 25 – 58 % док је у случају најслабијег подужног укрућења и $s_s/h_w \leq 0.10$, ефекат ојачања је био у распону од 3 - 13 % док је за $s_s/h_w = 0.50$ ефекат ојачања био између 3 – 33 % .

Крутост подужног укрућења

У овом истраживањима су анализирана само равна подужна укрућења. Ефекат ојачања, а тиме и гранична носивост подужно укрућених носача, повећава се и за крутости подужног укрућења γ_s веће од граничне вредности дефинисане у EN 1993-1-5.

Примјеном подужних укрућења долази до повећања граничне носивости. До значајнијег повећања граничне носивости (израженије одвајање криве граничне носивости подужно укрућеног носача у односу на криву граничне носивости подужно неукрућеног носача) долази при већим дужинама наношења оптерећења. Повећања дебљине појаса као и повећење односа дужине и висине оптерећеног панела ребра такође доводе до повећања ефекта ојачања.

До повећања ефекта ојачања долази не само повећавањем ширине укрућења већ и повећавањем његове дебљине, што се не може уочити ако за прорачун крутости укрућења користимо препоруке из EN 1993-1-5. Ова анализа показује да би се могле добити веће граничне носивости за веће дебљине укрућења чак и за ниже γ_s .

Израз за прорачун граничне носивости

Анализом резултата добијених овим истраживањем, дат је израз за прорачун граничне носивости подужно неукрућених и укрућених носача оптерећених локалним оптерећењем (поглавље 3.7) која се у општем облику може представити као

$$F_{rf}^{unstif} = 0.75 \cdot f(\alpha) \cdot f\left(\frac{h_w}{t_w}\right) \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{E \cdot f_{yw}} \cdot \sqrt{\frac{t_f}{t_w}} \cdot f^{unstif}(s_s)$$

$$F_{rf}^{stif} = F_{rf}^{unstif} \cdot f(b_1) \cdot f^{stif}(s_s)$$

гдје $f(\alpha)$, $f(h_w/t_w)$, $f^{unstif}(s_s)$, $f(b_1)$ и $f^{stif}(s_s)$ представљају утицај односа дужине и висине оптерећеног панела, виткости ребра, дужине локалног оптерећења код неукрућених носача, положаја подужног укрућења и дужине локалног оптерећења код укрућених носача. У израз за утицај укрућења су укључена релативна крутост на савијање као и релативна торзиона крутост укрућења. Предложени израз на задовољавајући начин прати резултате добијене не само овом нумеричком анализом него и резултате добијене експерименталним и нумеричким анализама у доступној литератури.

С обзиром да важећи европски стандард EN 1993-1-5 не узима у обзир утицај већег броја параметара у поступку одређивања граничне носивости, примјеном тог прорачуна се добијају конзервативнија решења, Примјеном предложеног израза и поређењем резултата са нумеричком анализом добија се средња вриједност од 0.76 и коефицијент варијације 8% док се поређењем резултата израчунатих на основу EN 1993-1-5 и резултата нумеричке анализе добија се средња вриједност од 0.54 и коефицијент варијације 17%.

Ово истраживање може бити веома корисно у инжењерској пракси.

До побољшања Еврокода или одређивања комплетних алтернативних поступака за одређивање граничне вредности носача оптерећених локалним оптерећењем, резултати добијени у овом истраживању могу се користити као помоћ у пројектовању.

Резултати који су дати у табелама 6-11 са употребом предложеног израза могу се користити као оријентационе вриједности у решавању конкретних проблема.

- Уколико је унапријед дефинисано укрућење носача, примјеном израза се може израчунати оријентациона вриједност граничне носивости носача.
- Уколико није унапријед дефинисано укрућење, а потребно је ојачање носача могу се користити различите комбинације параметара које директно утичу на граничну носивост и ефекат ојачања.

Гранична носивост добијена на тај начин може се користити као оријентациона вриједност, а за тачније решење непходно је анализирати носач методом коначних елемената.

5.2 ДОПРИНОС ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Допринос ове докторске дисертације се огледа у следећем :

Нумеричка база података. Проширена је нумеричка база података обимном параметарском анализом у којој је систематски варирана дужина локалног оптерећења, са подацима за 648 носача, за граничну носивости подужно неукрућених и подужно укрућених лимених носача оптерећених локалним оптерећењем. Ови подаци могу бити коришћени, било ради побољшања поступка датог у Еврокоду, било ради редифинисања алтернативних поступака за одређивање граничне носивости локално оптерећених лимених носача, посебно при узимању у обзир утицаја дужине расподељеног оптерећења

Ефекат ојачања. Први пут је потврђено је да ефекат ојачања код примене подужних укрућења у односу на подужно неукрућене носаче зависи од дужине локалног оптерећења у веома широким границама промене параметара, што је пре овог истраживања било утврђено само на малом узорку.

Критички осврт на Еврокод EN 1993-1-5. Извршена је упоредна анализа резултата добијених у овом истраживању са важећим европским стандардом EN 1993-1-5 и дат је критички осврт на недостатке важећег прописа и потребу за његовим побољшањем.

Израз за граничну носивост. Дат је математички израз за прорачун граничне носивости подужно неукрућених и подужно укрућених лимених носача који на задовољавајући начин прати резултате спроведене нумеричке анализе и изражава ефекат ојачања. Овај израз може да буде основ за алтернативни начин одређивања граничне носивости за разматрани проблем локалног попречног оптерећења, у односу на Еврокод EN 1993-1-5 с обзиром на недостатке овог прописа.

Могућност практичне примене. До побољшања поступка које даје Еврокод или одређивања комплетних алтернативних поступака за одређивање граничне вредности носача оптерећених локалним оптерећењем, резултати добијени у овом истраживању могу се користити као помоћ у пројектовању.

5.3 ПРЕПОРУКЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

База података. Неопходно је проширити базу података на начин да обухвати већи број карактеристичних односа параметара који се налазе између или ван граничних вриједности коришћених у овој анализи (a/h_w , h_w/t_w , t_f/t_w , t_s/t_w).

Подужна укрућења. Такође, у будућим истраживањима треба анализирати носаче са другачијим бројем, положајем, типом и димензијама подужних укрућења. Дефинисати граничне вриједности релативне крутости на савијање и релативне торзионе крутости подужних укрућења

Израз за граничну носивост. Полазећи од датог израза за граничну носивост као основе доћи до комплетног израза за одређивање граничне носивости као алтернативе поступку датом у Еврокоду. При томе је неопходно допунити базу података са варирањем других параметара који нису разматрани у овој анализи.

Еврокод EN 1993-1-5. Рад на побољшању поступка који је дат у Еврокоду, при чему је неопходно побољшање свих елемената у прорачуну граничне носивости локално оптерећених I – носача.

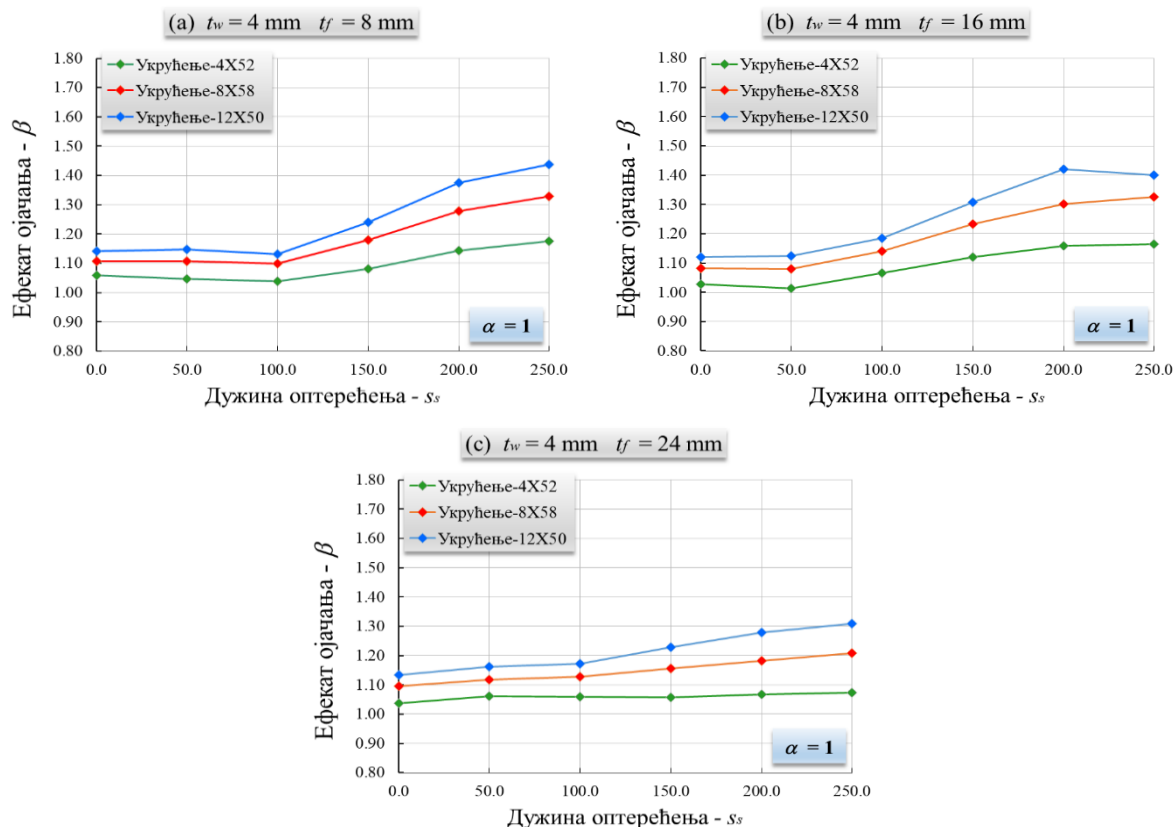
ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 1993-1-5:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-5, Plated Structural Elements, CEN, 2006.
- [2] C.D. Tetougueni, E. Maiorana, P. Zampieri, C. Pellegrino, Plate girders behaviour under in-plane loading: A review. *Engineering Failure Analysis* 95 (2019) 332–358.
- [3] A. Bergfelt, Patch Loading on a Slender Web. Influence of Horizontal and Vertical Web Stiffeners on the Load Carrying Capacity, vol. 1, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication S79, Göteborg, 1979.
- [4] T.M. Roberts, N. Markovic, Stocky plate girders subjected to edge loading, *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2 (75)*, 539-550, 1983.
- [5] A. Bergfelt, Girder web stiffening for patch loading, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Publication S83:1, Göteborg, 1983.
- [6] K. Janus, I. Karnikova, M. Skaloud, Experimental investigation into the ultimate load behaviour of longitudinally stiffened steel webs under partial edge loading, *Acta Tech. CSAV (Czech Sci. Adv. Views) (2)* (1988) 158–195.
- [7] Abaqus Simulia V. 6.14-5, Dassault Systemes, 2016.
- [8] E. Riks, An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, *Int. J. Solid Struct.* 15 (1979) 529–551.
- [9] O. Lagerqvist, Patch loading Resistance of steel girders subjected to concentrated forces, Doctoral Thesis, Lulea, Sweden, 1994.
- [10] P. Granath, Behavior of Slender Plate Girders Subjected to Patch Loading, *J. Construct. Steel Res.* Vol 42, 1-19, 1997.
- [11] C.A. Graciano, Patch loading-Resistance of Longitudinally Stiffened Steel Girder Webs, Doctoral Thesis, Lulea, Sweden, 2002.
- [12] J. Gozzi, Patch Loading Resistance of Plated Girders-Ultimate and serviceability limit state, Doctoral Thesis, Lulea, Sweden, 2007.
- [13] R. Chacon, E. Mirambell, E. Real, Influence of designer-assumed initial conditions on the numerical modelling of steel plate girders subjected to patch loading, *ThinWalled Struct.* 47 (2009) 391–402.
- [14] R. Chacon, M. Serrat, E. Real, The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading, *Thin-Walled Struct.* 53 (2012) 15–25.
- [15] B. Ćorić, Teorijska i eksperimentalna analiza lokalnog i bočnog izvijanja čeličnog I nosača deformabilnog poprečnog preseka. Dokt. dis., Građevinski fakultet, Beograd, mart, 1982, s174.
- [16] D. Lucić, Prilog analizi stabilnosti tankozidnih nosača. Doktorska disertacija, Beograd, 1999, s. 151.
- [17] N. Marković, Prilog analizi plastičnog ponašanja tankozidnih nosača, Magistarski rad, Beograd, 1988.
- [18] N. Marković, Izbočavanje limenih nosača pod dejstvom lokalnog opterećenja, Doktorska disertacija, Beograd, 2003.
- [19] B. Šćepanović, Ekscentrično lokalno opterećeni I - nosači - eksperimentalno - teorijska analiza, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2003. 120s.
- [20] A. Ćeranić, Elasto plastično ponašanje i granična nosivost limenih nosača opterećenih lokalizovanim opterećenjem, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2016, str.79.
- [21] S. Kovacevic, Stability and ultimate capacity of thin-walled steel plate girders subjected to patch loading, Doctoral Dissertation, Belgrade, 2021, 146 p.
- [22] B. Šćepanović, Analiza ekscentrično lokalno opterećenih čeličnih I – nosača (Estudio de vigas metálicas en I sometidas a cargas transversales excentricas respecto del plano del alma), Doktorska disertacija, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica, 2010, 260s.
- [23] S. Aleksić, Granična nosivost tankozidnih I – nosača pod dejstvom lokalnog opterećenja u ravni rebra, Magistarski rad, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica, 2005. 99s.
- [24] S. Aleksić, Stabilnost tankozidnih I-nosača pod dejstvom lokalnog opterećenja u ravni rebra, doktorska disertacija, Univerzitet Crne Gore, Građevinski fakultet, Podgorica, 2010, 140s.
- [25] M. Rogač, Teorijska i eksperimentalna istraživanja problema stabilnosti lokalno opterećenih tankozidnih I-nosača, Doktorska disertacija, Podgorica, 2015.
- [26] N., Marković, N. Hajdin A Contribution to the Analysis of the Behaviour of Plate Girders Subjected to Patch Loading, *J. Construct. Steel Research*, Vol 21, No1-3, 1992, 163-173.
- [27] N. Hajdin, N. Markovic, Failure mechanism for longitudinally stiffened I girders subjected to patch loading, *Arch. Appl. Mech.* 82 (2012) 1377–1391.
- [28] S. Aleksic, M. Rogac, D. Lucic, Analysis of locally loaded steel plate girders. Model for patch load resistance, *Jornal of Constructional Steel Research* 89, 153-164, 2013.

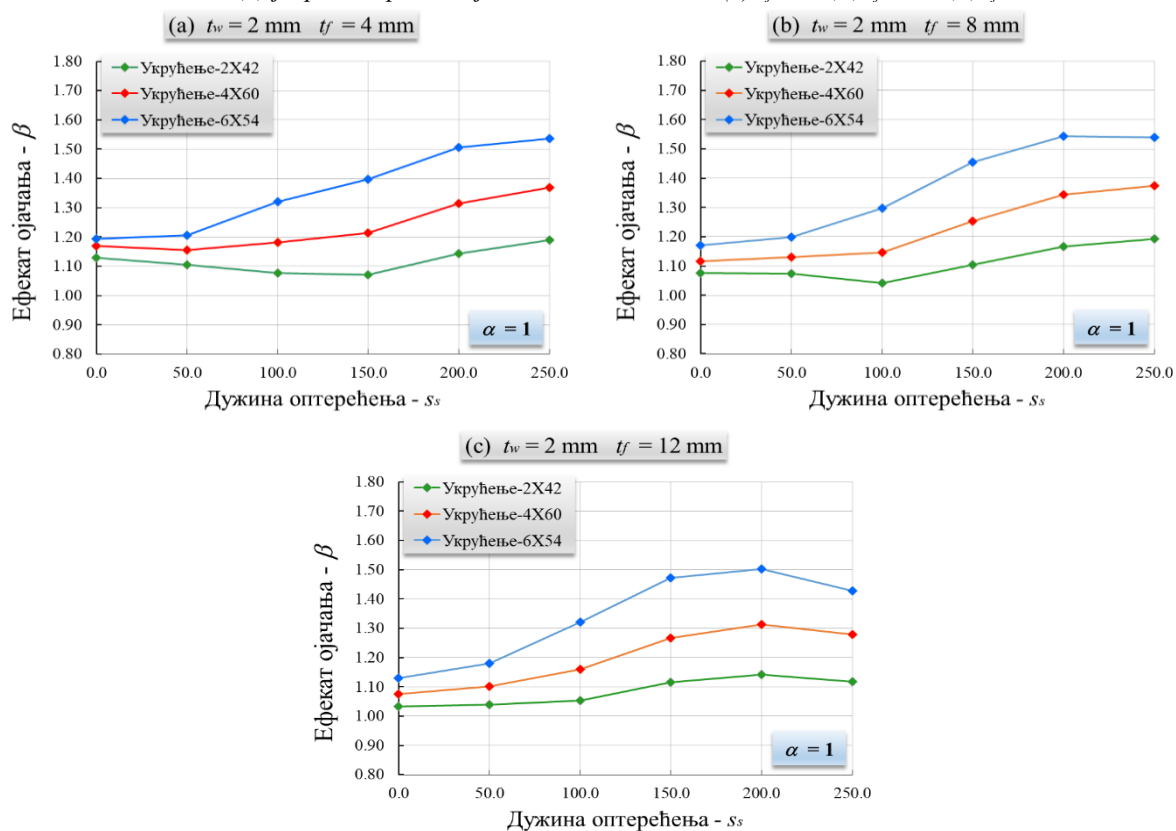
- [29] N. Markovic, S. Kovacevic, Influence of patch load length on plate girders. Part I: experimental research, *J. Constr. Steel Res.* 157 (2019) 207–228.
- [30] S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac, R. Salatic, Influence of patch load length on plate girders. Part II: numerical research, *J. Constr. Steel Res.* 158 (2019) 213–229.
- [31] S. Kovacevic, N. Markovic, Experimental study on the influence of patch load length on steel plate girders, *Thin-Walled Struct.* 151 (2020), 106733, 21 p.
- [32] S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac, R. Salatic, Unfavorable geometric imperfections in steel plate girders subjected to localized loads, *Thin-Walled Structures* 161 (2021) 107412, 16p.
- [33] S. Walbridge, J. Lebet, Patch loading tests of bridge girders with longitudinal web stiffeners, Publication No. 447. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 2001
- [34] C.A. Graciano, Ultimate resistance of longitudinally stiffened webs subjected to patch loading, *Thin Walled Structures* 41, 529-541, 2003.
- [35] L. Davaine, Formulation de la résistance au lancement d'une âme métallique de pont raidie longitudinalement (Résistance dite de "Patch Loading"), These de docteur en Genie Civil, INSA (L'Institut National des Sciences Appliquees de Rennes, France, 2005, 270.
- [36] M. Seitz, Tragverhalten laengsverteilter Blechtraeger unter quergerichteter Krafteinleitung, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universitaet Stuttgart, Stuttgart, 2005 (Doctoral thesis).
- [37] B. Kovesdi, Patch loading resistance of slender plate girders with longitudinal stiffeners, *J. Constr. Steel Res.* 140 (2018) 237–246.
- [38] N. Loaiza, C. Graciano, E. Casanova, Design recommendations for patch loading resistance of longitudinally stiffened I-girders, *Eng. Struct.* 171 (2018) 747–758.
- [39] N. Loaiza, C. Graciano, R. Chacon, Web crippling strength of longitudinally stiffened steel plate girder webs subjected to concentrated loading, *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction* 55 (2018) 191–201.
- [40] N. Loaiza, Effect of Longitudinal Stiffening on the Ultimate Resistance of Plate Girders Subjected to Patch Loading, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2019 (Doctoral thesis).
- [41] N. Loaiza, C. Graciano, E. Casanova, Web slenderness for longitudinally stiffened I-girders subjected to patch loading, *J. Constr. Steel Res.* 162 (2019) 105737.
- [42] C.A. Graciano, D.G.Zapata-Medina, Effect of longitudinal stiffening on bridge girder webs at incremental launching stage, *Ingenieria E Investigacion Vol 35*, 24-30, 2015.
- [43] F.E. Demari, G.P. Mezzomo, Z.M.C. Pravia, Numerical study of slender I-girders with one longitudinal stiffener under patch loading, *J. Constr. Steel Res.* 167 (2020) 105964.
- [44] Th. von Karman, E.E. Sechler, L.H. Donnell, The strength of thin plates in compression; *Transactions of ASME, Vol. 54/5 – 53-7*, 1932.
- [45] G. Winter, Strength of Thin Steel Compression Flanges, *Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol 112*, pp 527-554. 1947.
- [46] K. Girkmann, Stability of the webs of plate girders taking account of concentrated loads, *International Association of Bridge and Structural Engineering, Final Report*, 1936, 610-614.
- [47] L. Zetlin, Elastic instability of flat plates subjected to partial edge loads, *Proc. ASCE*, 81 (795), 1955, 1-24.
- [48] R.M. White, W.Cottingham, Stability of plates under partial edge loadings. *Proc. ASCE, J.EM* 5, 85, oct.1962, 67-86.
- [49] K.C. Rockey, D.K. Bagchi, Buckling of plate girder webs under partial edge loadings, *Int. J. Mech.Sci.*, 12, 1970, 61-76
- [50] M.Z. Khan, K.C. Johns, B. Hayman, Buckling of plates with partially loaded edges. *J. Struc. Div. ASCE*, 103, ST3,1977, 547-58.
- [51] O.Mijušković, B. Coric, Analitički postupak određivanja kritičnog opterećenja ploča različitih rubnih uvjeta, *Građevinar* 64 (2012) 3, 185-194.
- [52] M. Rogač, O. Mijušković, D. Lučić, S. Aleksić, Analysis of flange impact on critical patch load of thin-walled I-girders. *Građevinar.* 66, 2014, 4, 311-321.
- [53] M. Clarin, Plate Buckling Resistance - Patch Loading of Longitudinally Stiffened Webs and Local Buckling, Doctoral Thesis 2007:31, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering - Steel Structures, Luleå, Sweden, August 2007. p179.
- [54] B. Kövesdi, Patch loading resistance of slender plate girders with longitudinal stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research* 140 (2018) 237–246.
- [55] J. Herrera, R. Chacón Critical buckling load on transversally and longitudinally stiffened steel plate girders subjected to patch loading. *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, 11 — 13 September 2019, Prague, Czech Republic, 2019, 8p.
- [56] M. Herzog, Die Krüppellast sehr dünner Vollwandträgerstege nach Versuchen. *Der Stahlbau*, 1/1974, 26-28.

- [57] M.Škaloud, M. Drdácý, Vpočet sten ocelových nosniku podle únosnosti část 3. steny namáhané osamelým bremenem. Staveb. Čas., 23, č.3, VEDA, Bratislava 1975, 140-160.
- [58] A. Bergfelt, The behaviour and design of slender webs under patch edge loading. Int.Conf.on Steel Plated Structures, Imperial Coll. London, U.K.,1976, P.J.Dowling et al, Crosby Lockwood Staples, 486-502.
- [59] P. Dubas, , E. Gehri, Behaviour of webs under concentrated loads acting between widely spaced vertical stiffeners. Raport 5.13 to ECCS Group 8:3, Meeting in Zürich, 1978, 11
- [60] M. Drdácý, Steel webs with flanges subjected to partial edge loading. Chalmers Tekniska Hogskola, Stal-och Trabyggnad, Int. Skr. s 82:14, Goteborg, 1982, 21.
- [61] I. Spinassas, J. Raoul, M. Virlogeux, Parametric study on plate girders subjected to patch loading. IUTAM Simp. Contact Loading, Prel. Rep, Vol. 2., Prague,1990, 192-203.
- [62] T.M. Roberts, K.C. Rockey, A mechanism solution for predicting the collapse load of slender plate girders when subjected to in-plane patch loading. Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, 67, Mar. 1979, 155-175.
- [63] B. Johansson, O. Lagerqvist, Resistance of Plate Edges to Concentrated Forces. J.Construct. Steel Research, 32, 1995, 69-105.
- [64] BS 5400-3, Steel, concrete and composite bridges – Part 3: Code of practice for design of steel bridges, 2000.
- [65] I.Kutmanova, M. Skaloud, Ultimate Limit State of Slender Steel Webs Subject do (i) Constant and (ii) Repeated Partial Edge Loading. J. Construct. Steel Research, 21, 1992, 147 - 162.
- [66] R. Luo, B. Edlund Ultimate Strength of Girders with Trapezoidally Corrugated Webs Under Patch Loading. Thin-Walled Structures 24 (1996) 135-156
- [67] K. Rockey, A. Bergfelt, L. Larsson, Behaviour of longitudinally reinforced plate girders when subjected to in plane patch loading, vol 19, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Publication S78, Göteborg, 1978.
- [68] J. Oxfort, Versuche zum Beul- und Krüppelverhalten von unversteiften Trägerstegblechen unter zentrischen und exzentrischen Einzellasten auf dem Obergurt, Stahlbau 52 (1983) 309–312.
- [69] S. Shimizu, S. Yoshida, H. Okuhara, An experimental study on patch-loaded web plates, in: Proceedings of the ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures, Ghent University, 1987.
- [70] Y. Galea, B. Godart, I. Radouant, J. Raoul, Test of Buckling of Panels Subject to in- Plane Patch loading, in: Proceedings of the ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structure, Ghent University, 1987.
- [71] P. Dubas, H. Tschamper, Stabilité des âmes soumises à une charge concentrée et à une flexion globale, Constr. Met. 2 (1990) 25–39.
- [72] M. Dogaki, M. Murata, Y. Nishijima, T. Okumura, H. Yonezawa, Ultimate strength of plate girders with longitudinal stiffener under patch loading 33, Technology Reports of Kansai University, 1991, pp. 121–132.
- [73] R. Salkar, Strength and behavior of webs, with and without stiffeners under local compressive in-plane and eccentric loads (Volumes I and II), University of Maine, USA, 1992 (Doctoral thesis).
- [74] A. Carretero, J. Lebet, Introduction des forces concentre'es dans les poutres elance'es, Constr. Met. 1 (1998) 5–18.
- [75] U. Kuhlmann, M. Seitz, Longitudinally stiffened girder webs subjected to patch loading, in: Proceedings of Steel Bridge-An International Symposium on Steel Bridge, Millau, France June, 2004, 011/1-011/14.
- [76] E. Maiorana, C. Pellegrino, C. Modena, Imperfections in steel girder webs with and without perforations under patch loading, J. Constr. Steel Res. 65 (2009) 1121–1129.
- [77] N. Loaiza, C. Graciano, R. Chacon, Analisis de autovalores de vigas esbeltas conrigidizaci on multiple sujetas a cargas concentradas, Memorias del Congreso Internacional deM'etodos Numericos en Ingenieria y Ciencias Aplicadas (CIMENICS) July 2016, pp. 219–227, (Caracas, Venezuela).
- [78] N. Loaiza, C. Graciano, R. Chacon, E. Casanova, Influence of bearing length on the patch loading resistance of multiple longitudinally stiffened webs, 8th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2017) September 2017, pp. 4199–4204 , (Copenhagen, Denmark).
- [79] O. Mezghanni, J. Averseng, A. Boucha'ir, H. Smaoui, Behavior of beam web panel under opposite patch loading, J. Constr. Steel Res. 83 (2013) 51–61.
- [80] BSK07, (2007), Boverkets handbok om stålkonstruktioner BSK 07, ISSN: 1400-1012

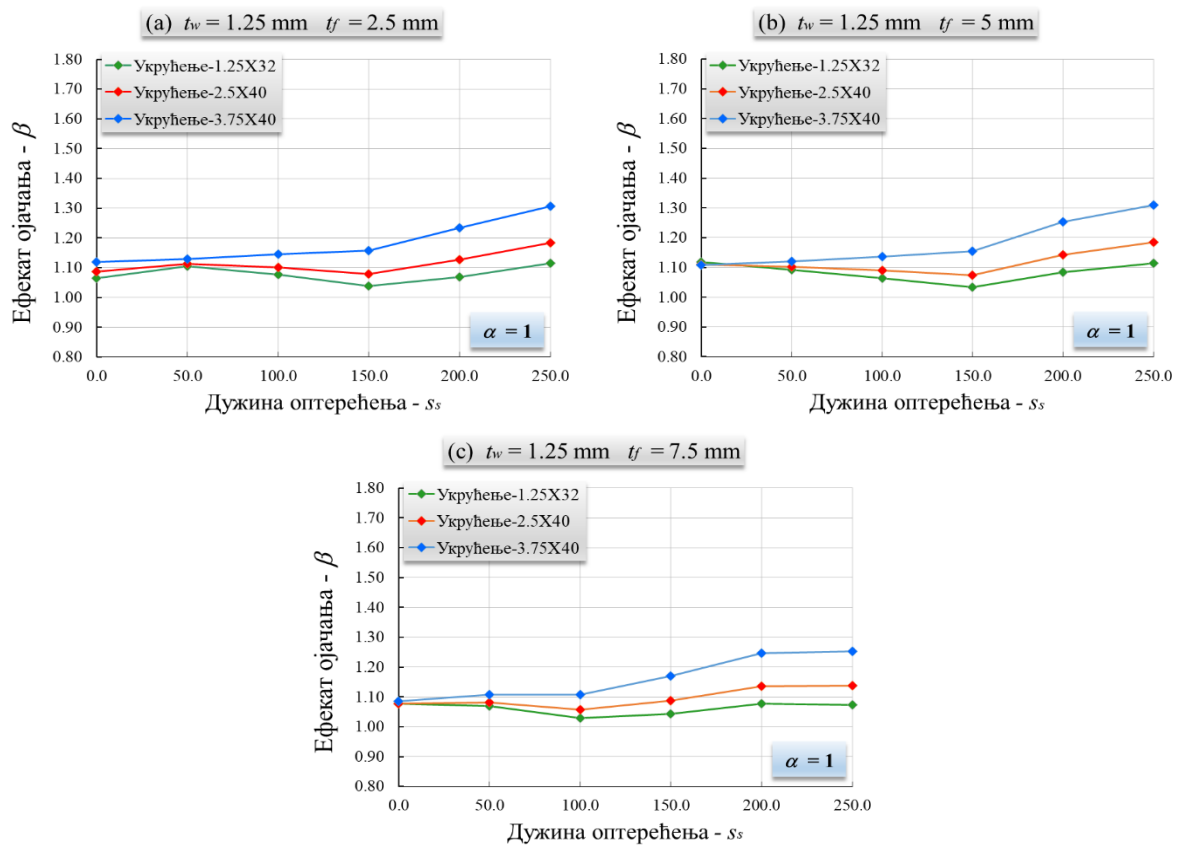
ПРИЛОГ А - Дијаграми ефекта ојачања за све укрућене носаче



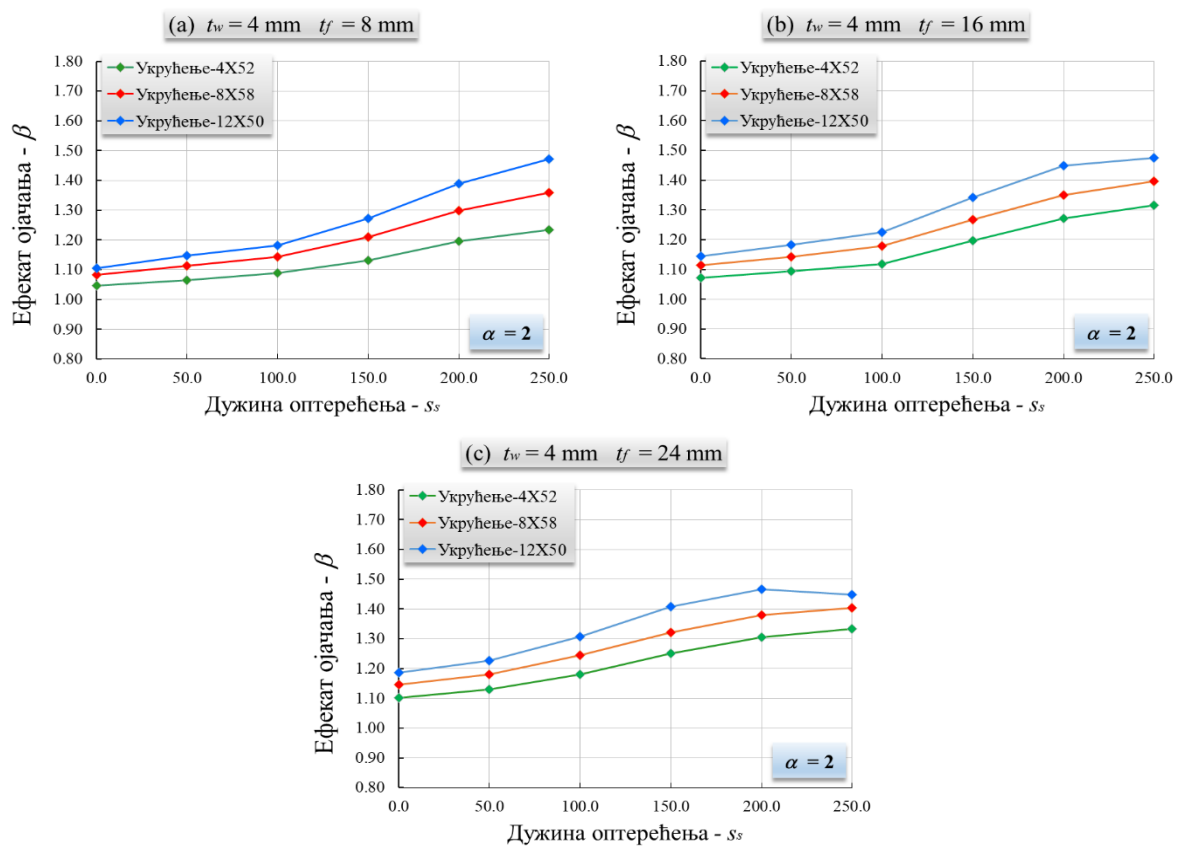
Слика А1 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 4$, (a) $t_f = 8$, (b) $t_f = 16$, (c) $t_f = 24$



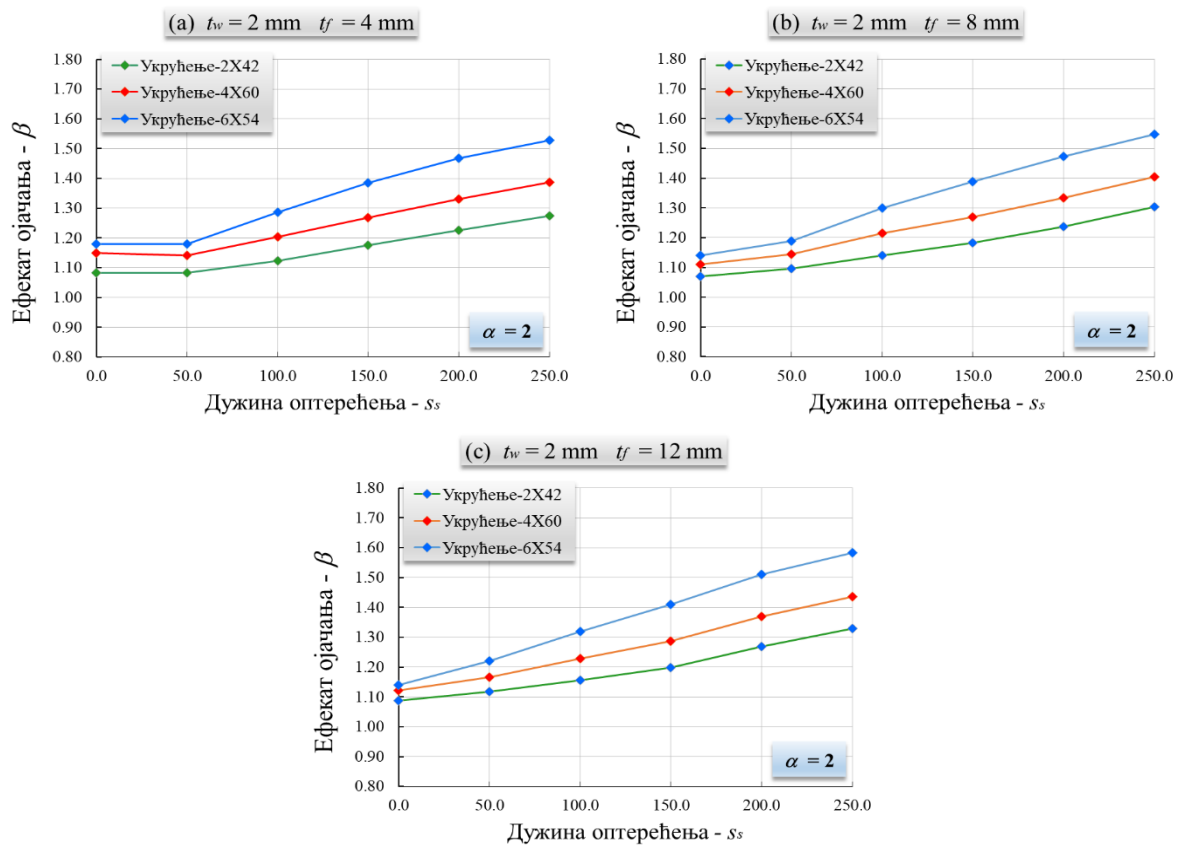
Слика А2 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$



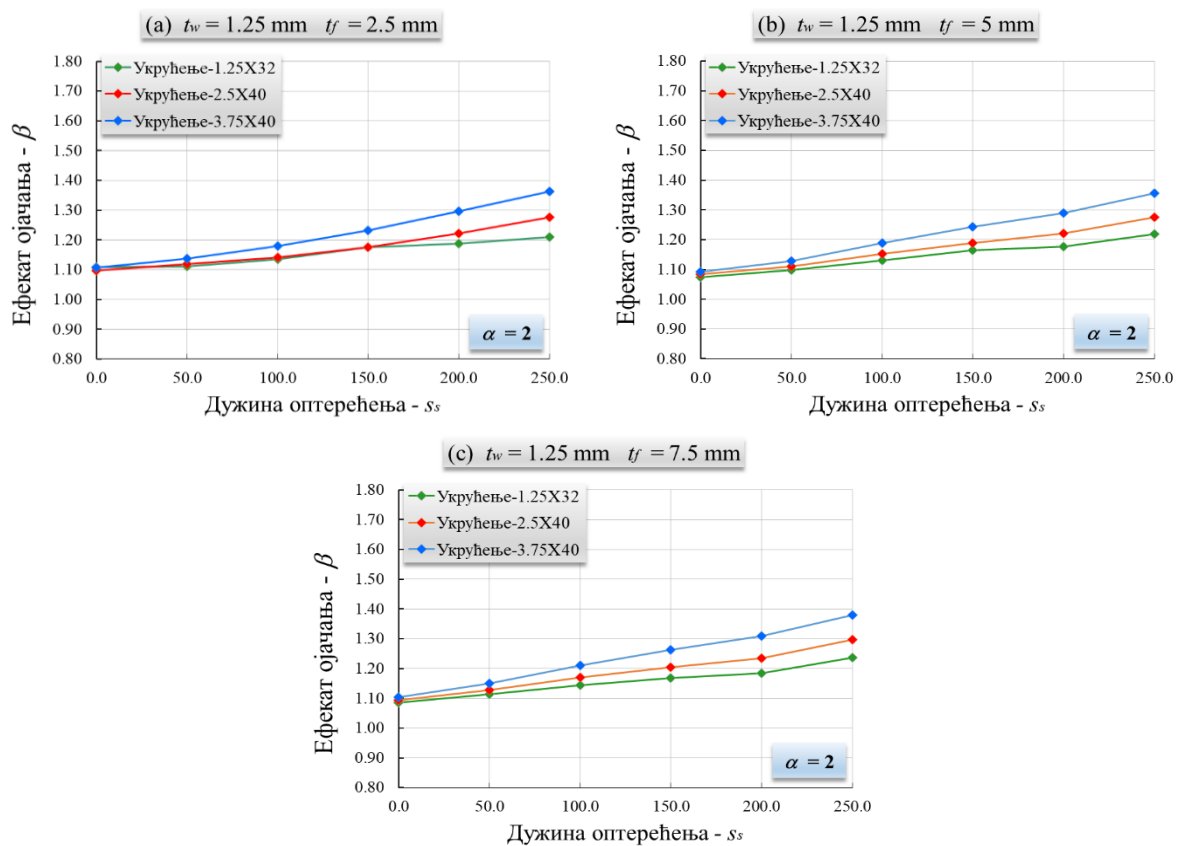
Слика А3 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 1$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$



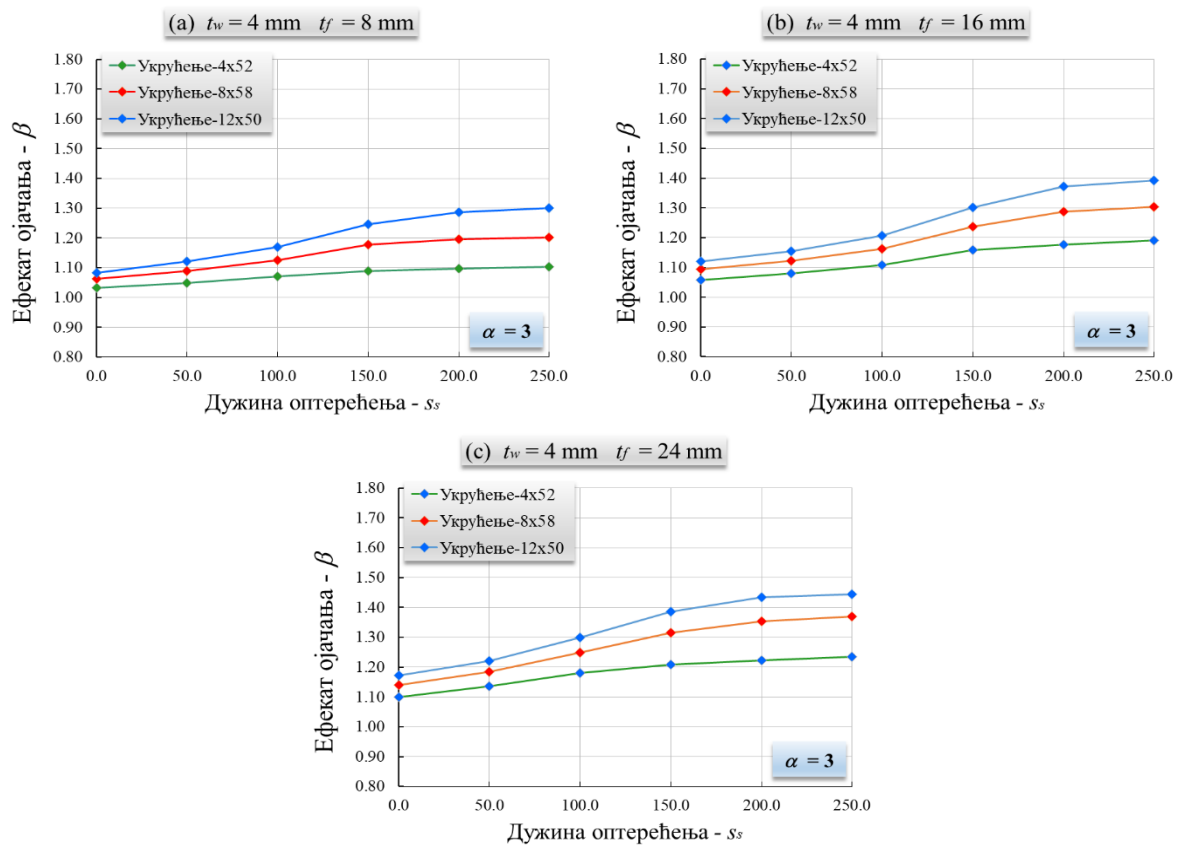
Слика А4 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 4$, (a) $t_f = 8$, (b) $t_f = 16$, (c) $t_f = 24$



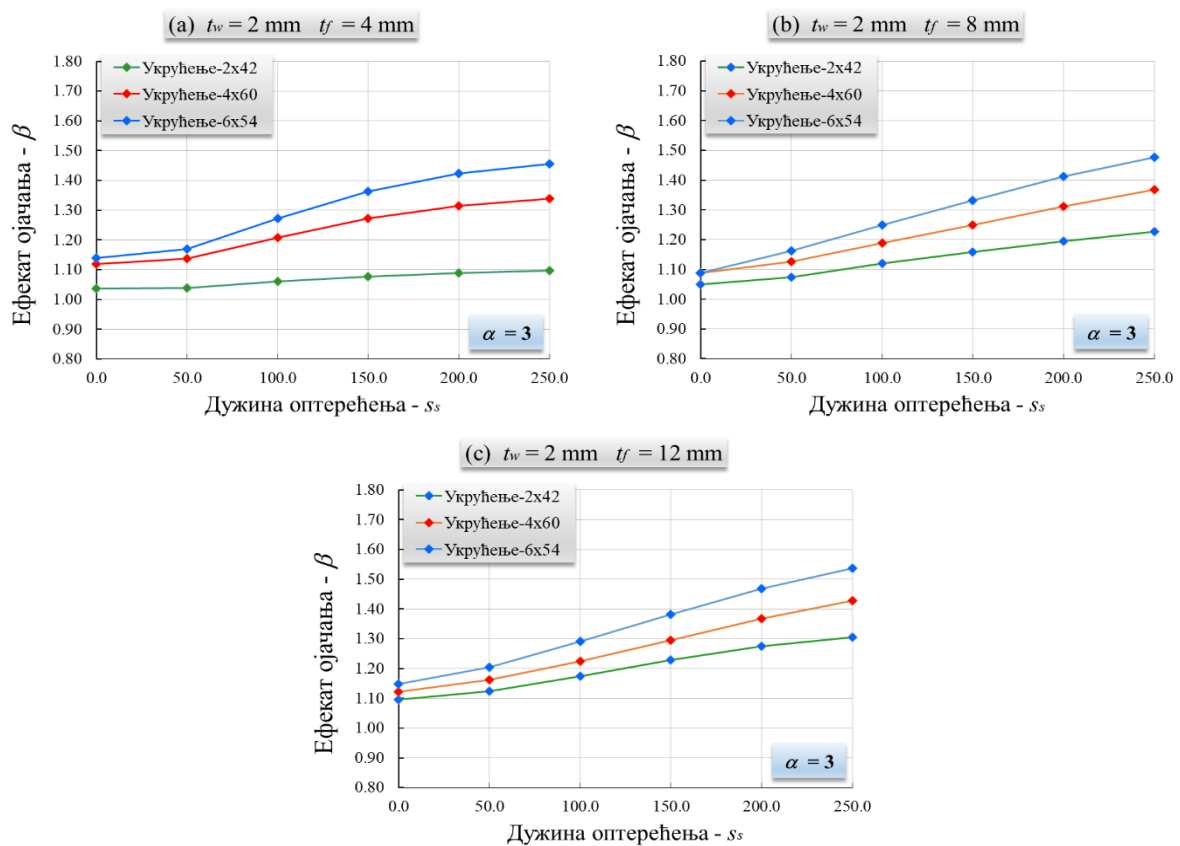
Слика А5 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$



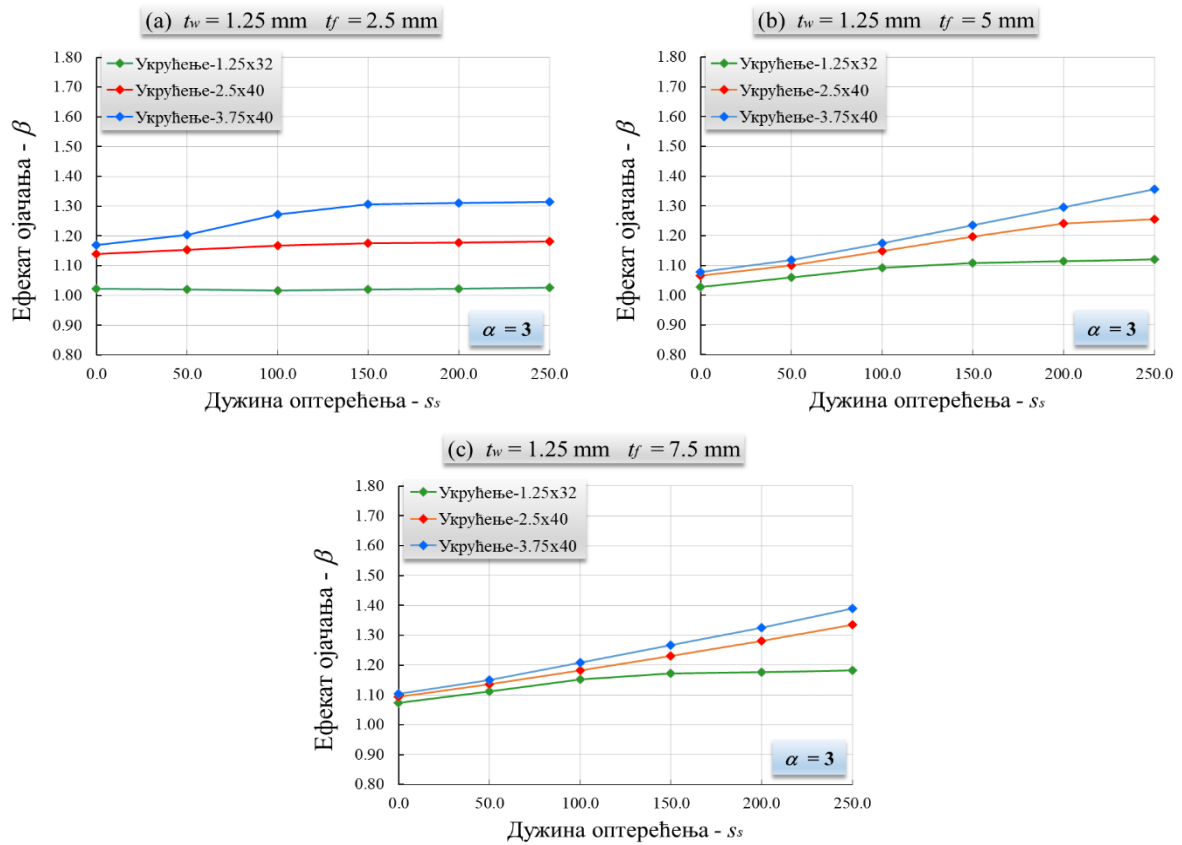
Слика А6 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 2$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$



Слика А7 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$

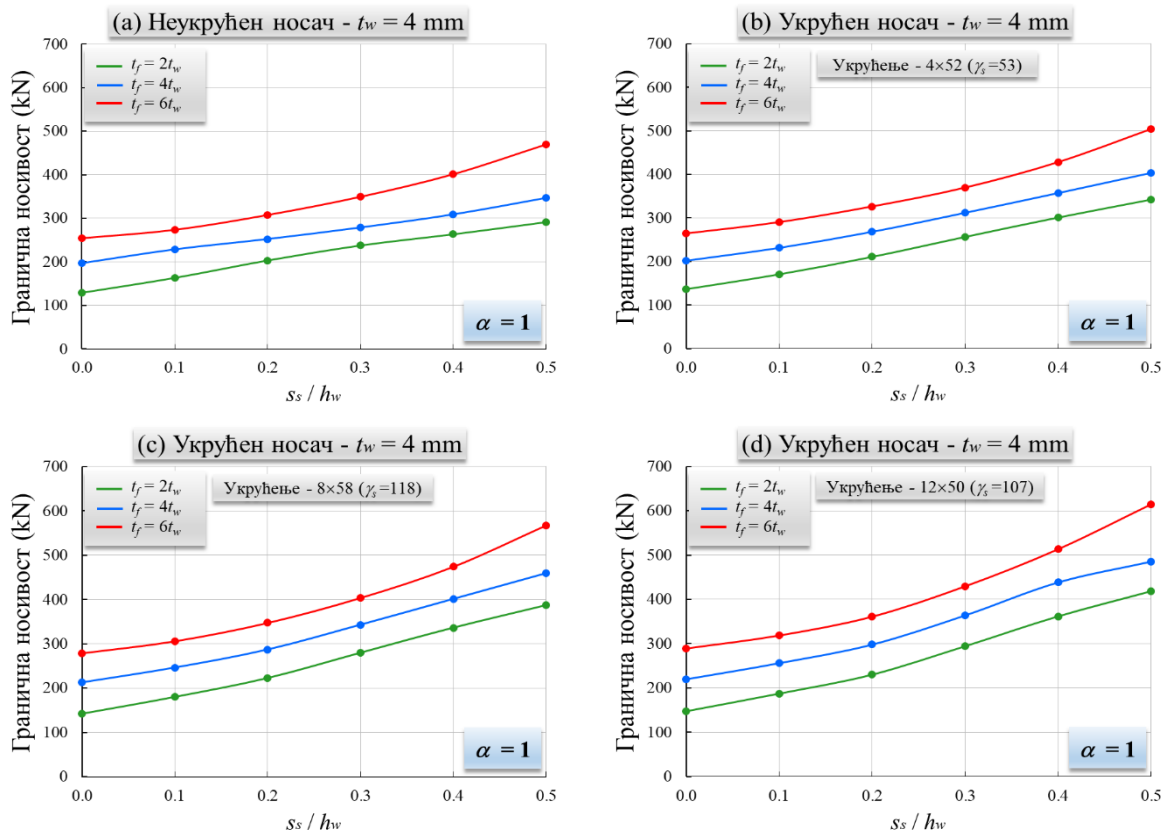


Слика А8 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 2$, (a) $t_f = 4$, (b) $t_f = 8$, (c) $t_f = 12$

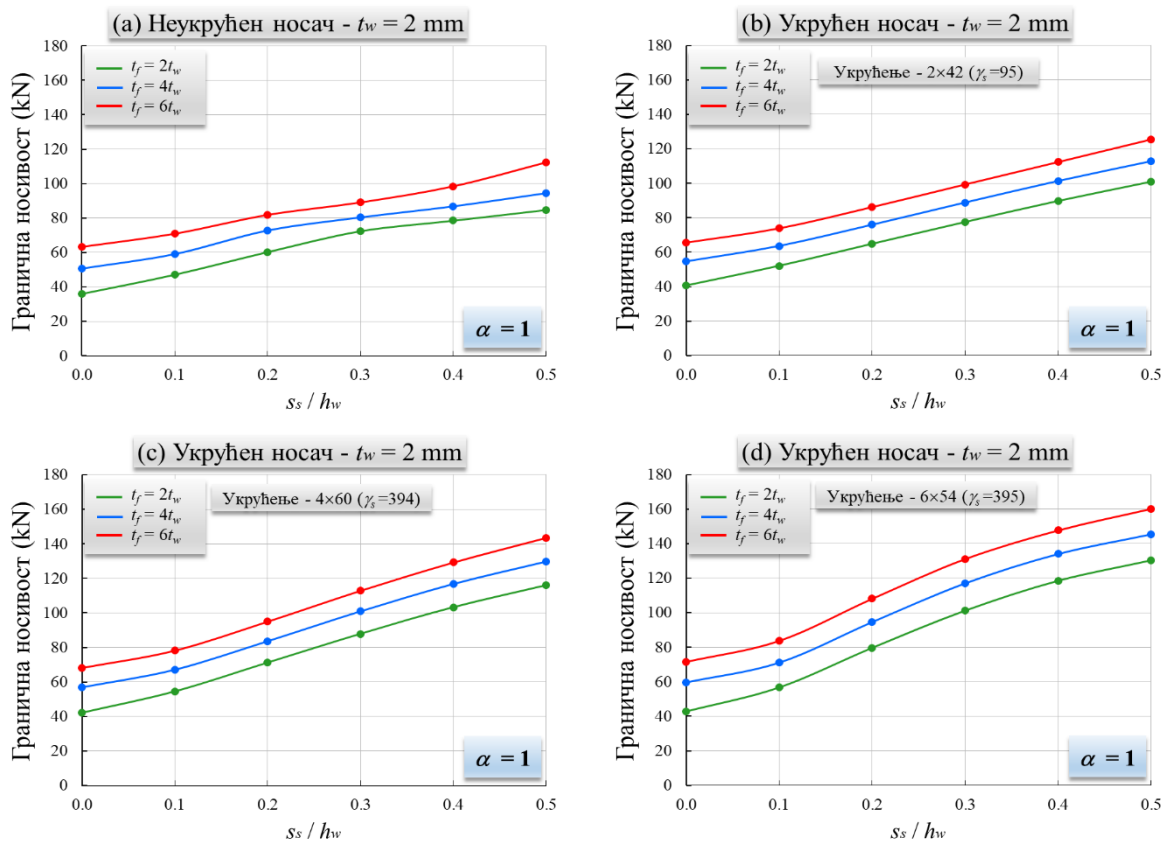


Слика А9 Дијаграми ефекта ојачања $\alpha = 3$, $t_w = 1.25$, (a) $t_f = 2.5$, (b) $t_f = 5$, (c) $t_f = 3.75$

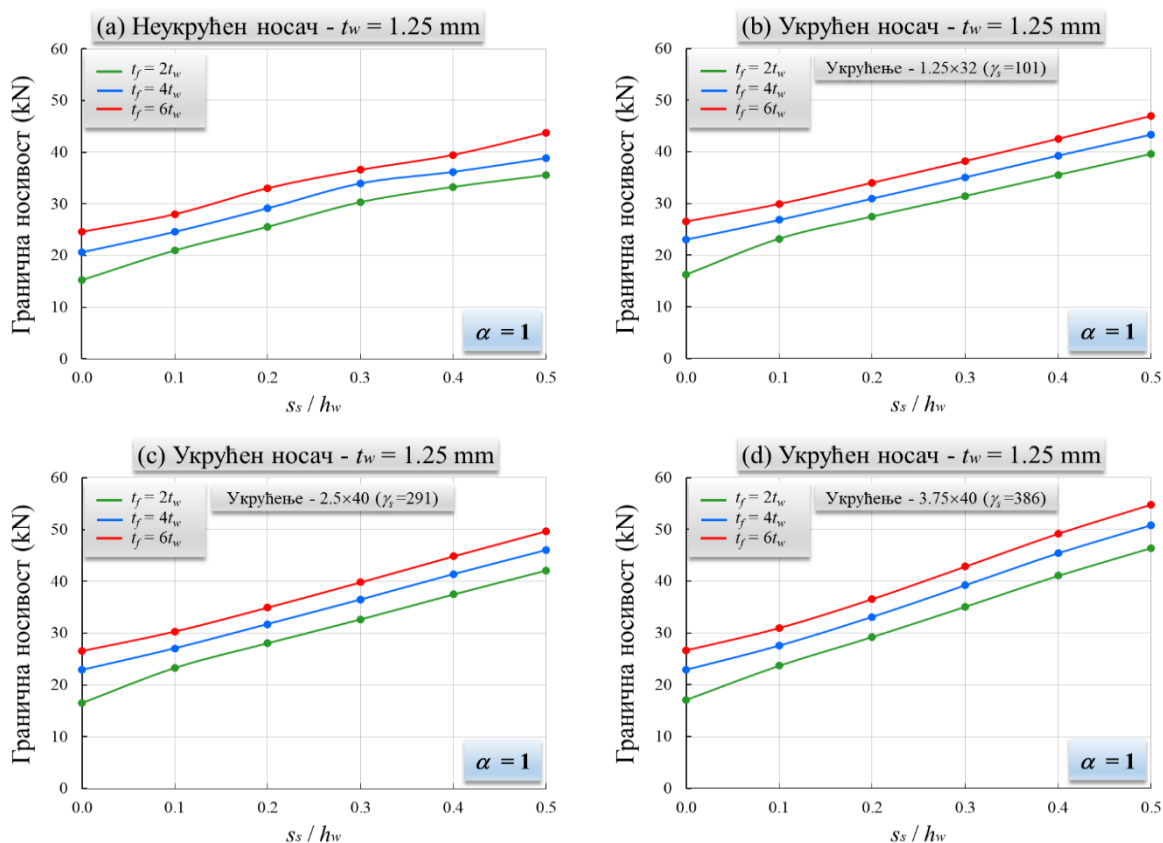
ПРИЛОГ Б – Гранична носивост носача за различите дебљине појаса



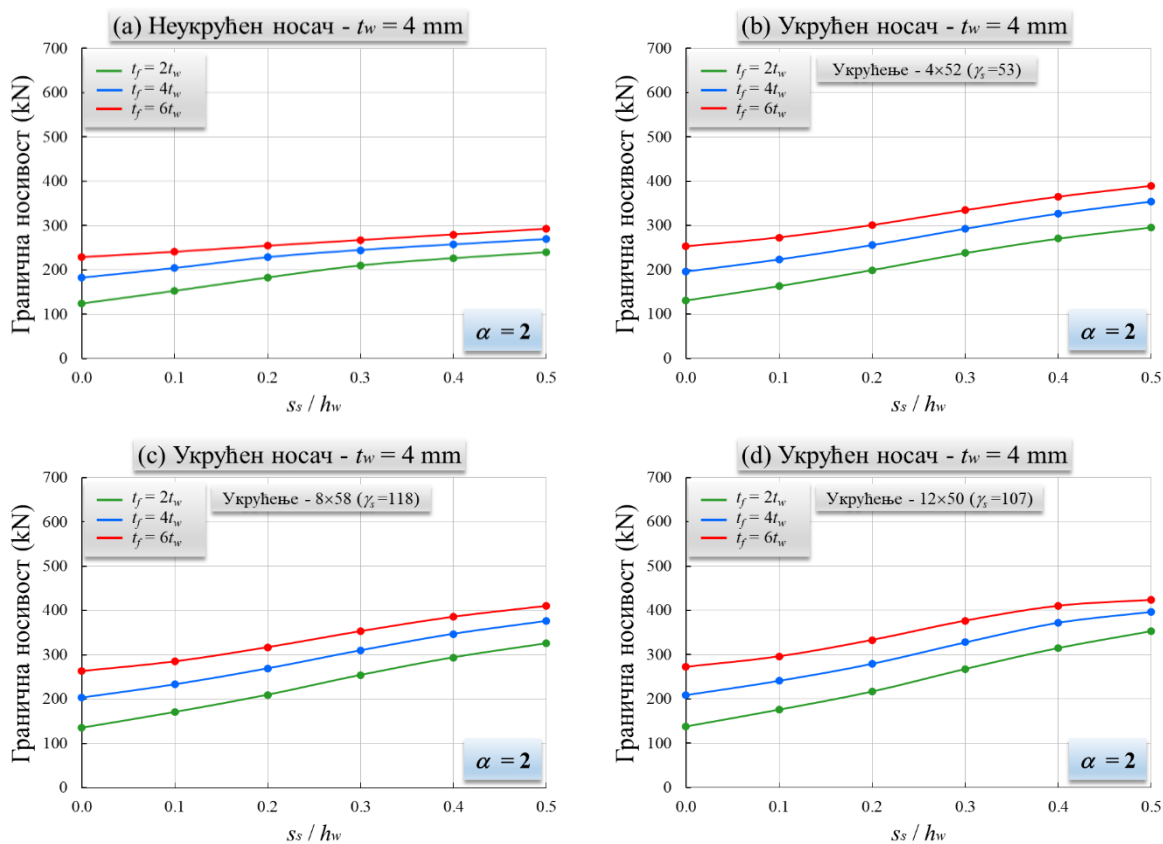
Слика Б1 Гранична носивост носача ($\alpha = 1$, $t_w = 4$) за различите дебљине појаса



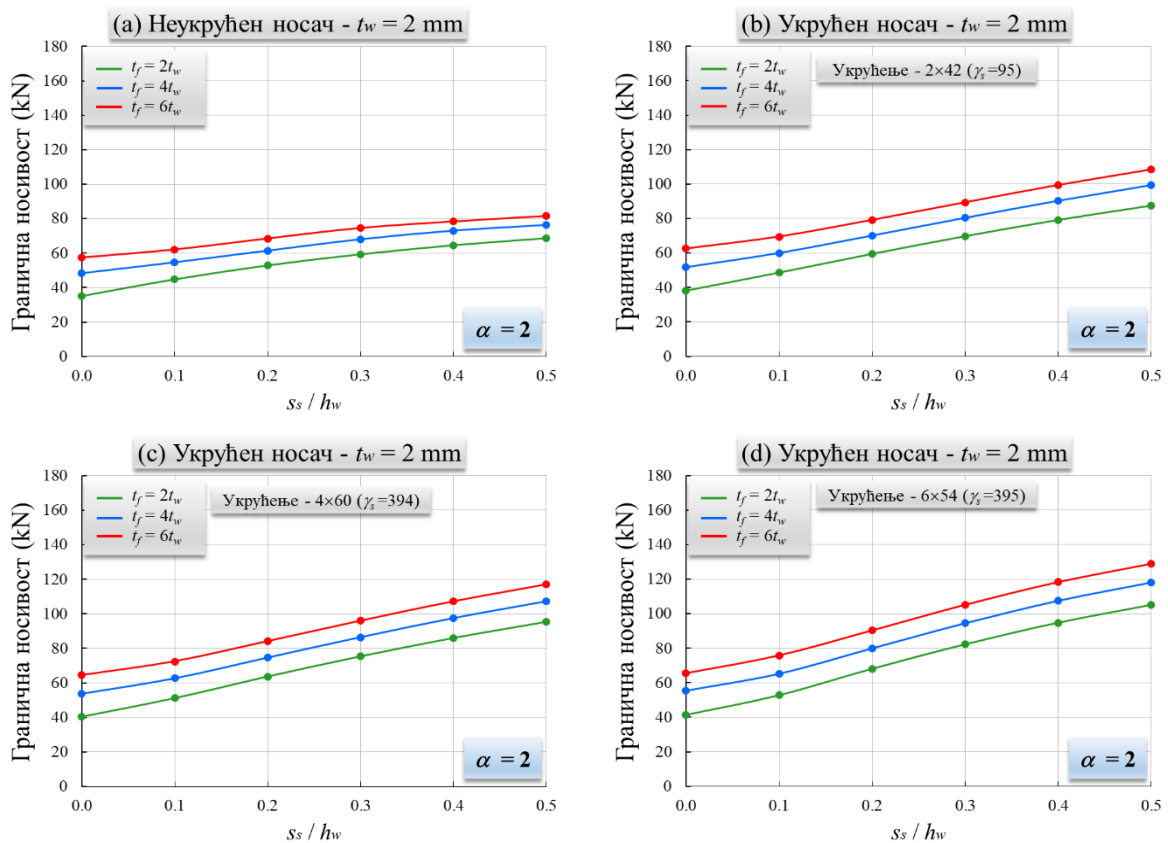
Слика Б2 Гранична носивост носача ($\alpha = 1$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса



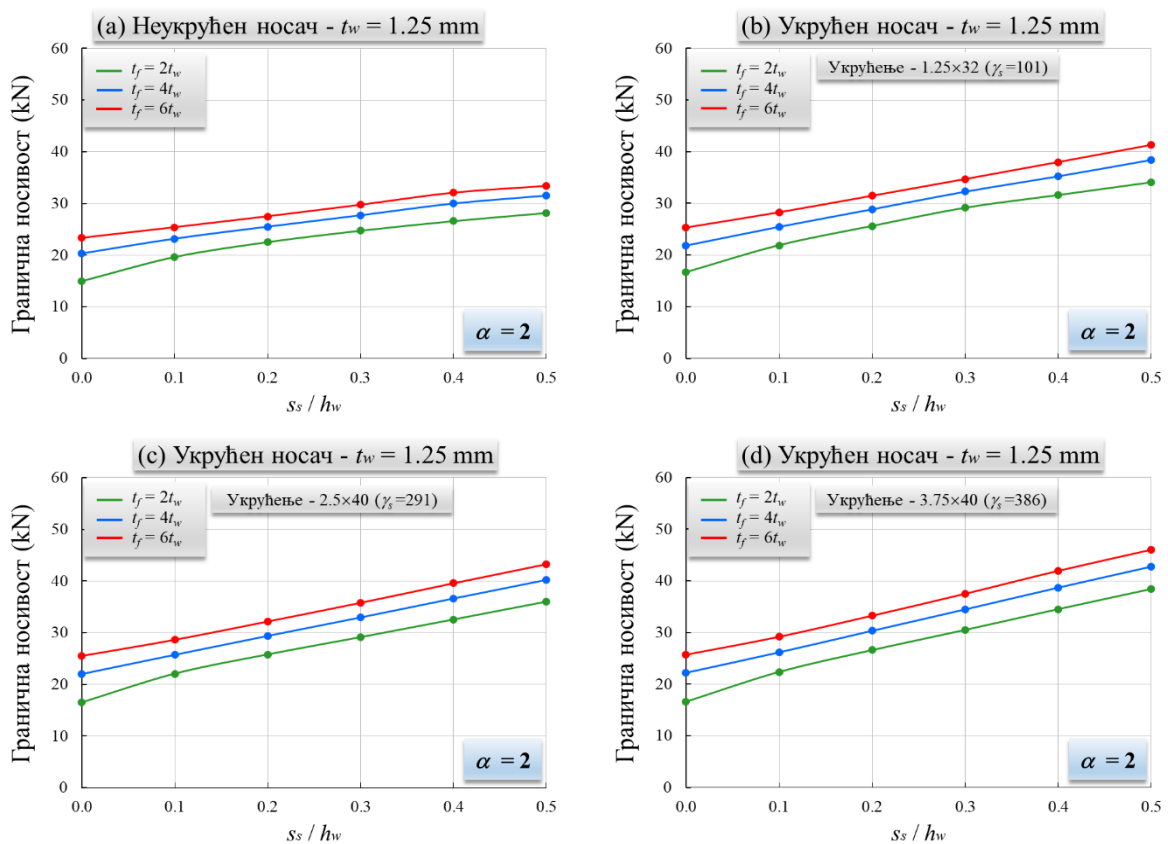
Слика Б3 Гранична носивост носача ($\alpha = 1, t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса



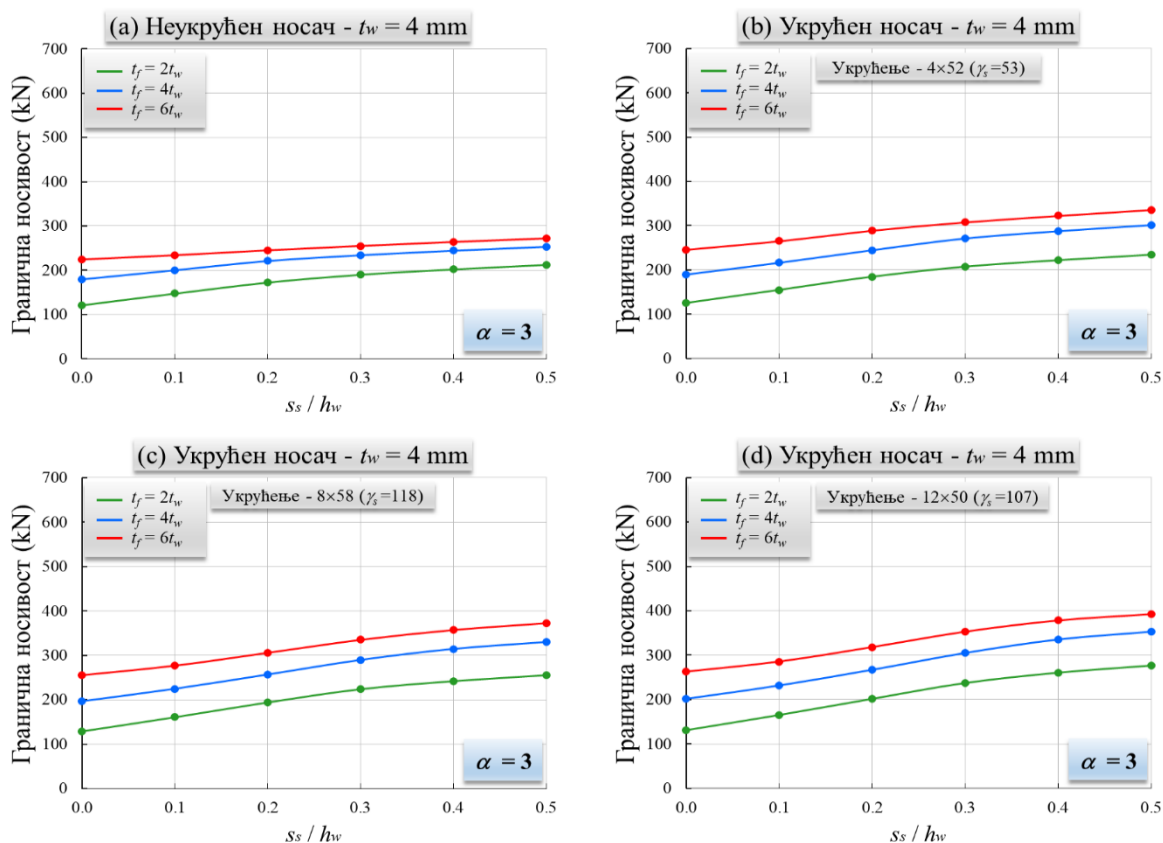
Слика Б4 Гранична носивост носача ($\alpha = 2, t_w = 4$) за различите дебљине појаса



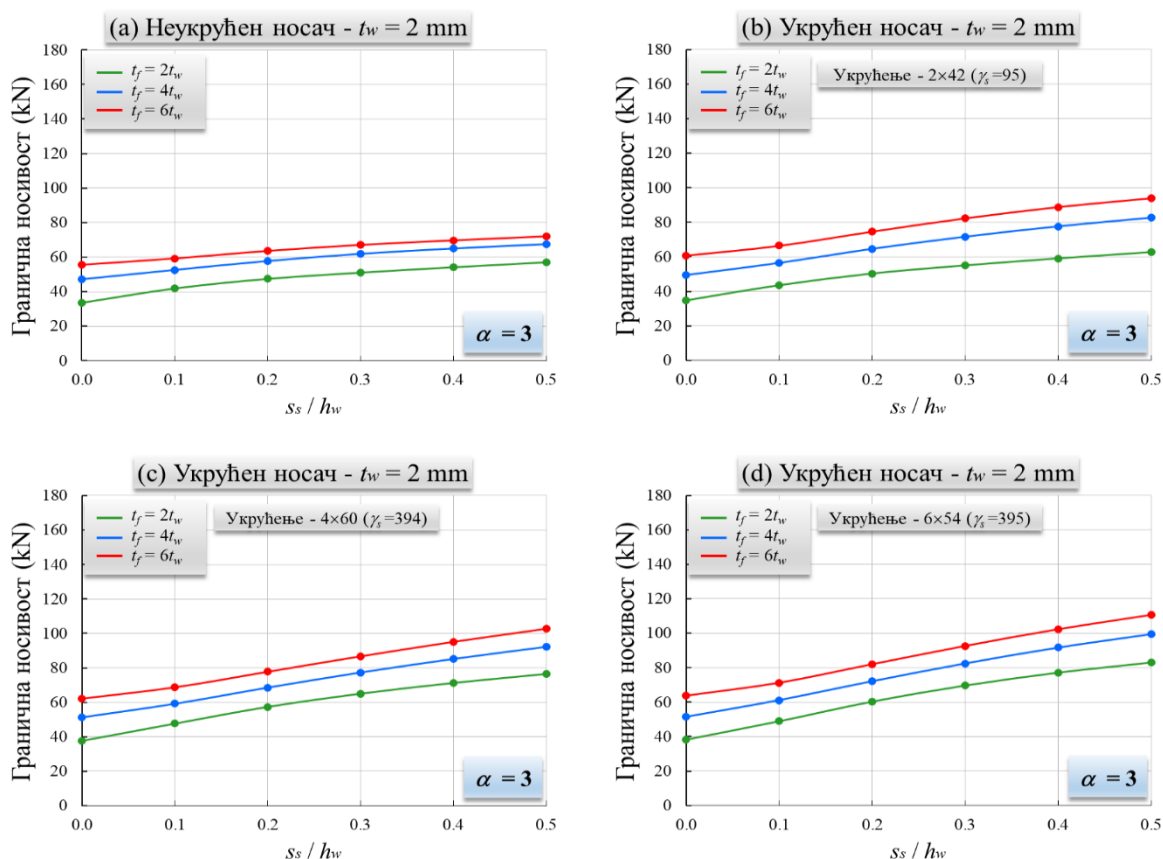
Слика Б5 Гранична носивост носача ($\alpha = 2$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса



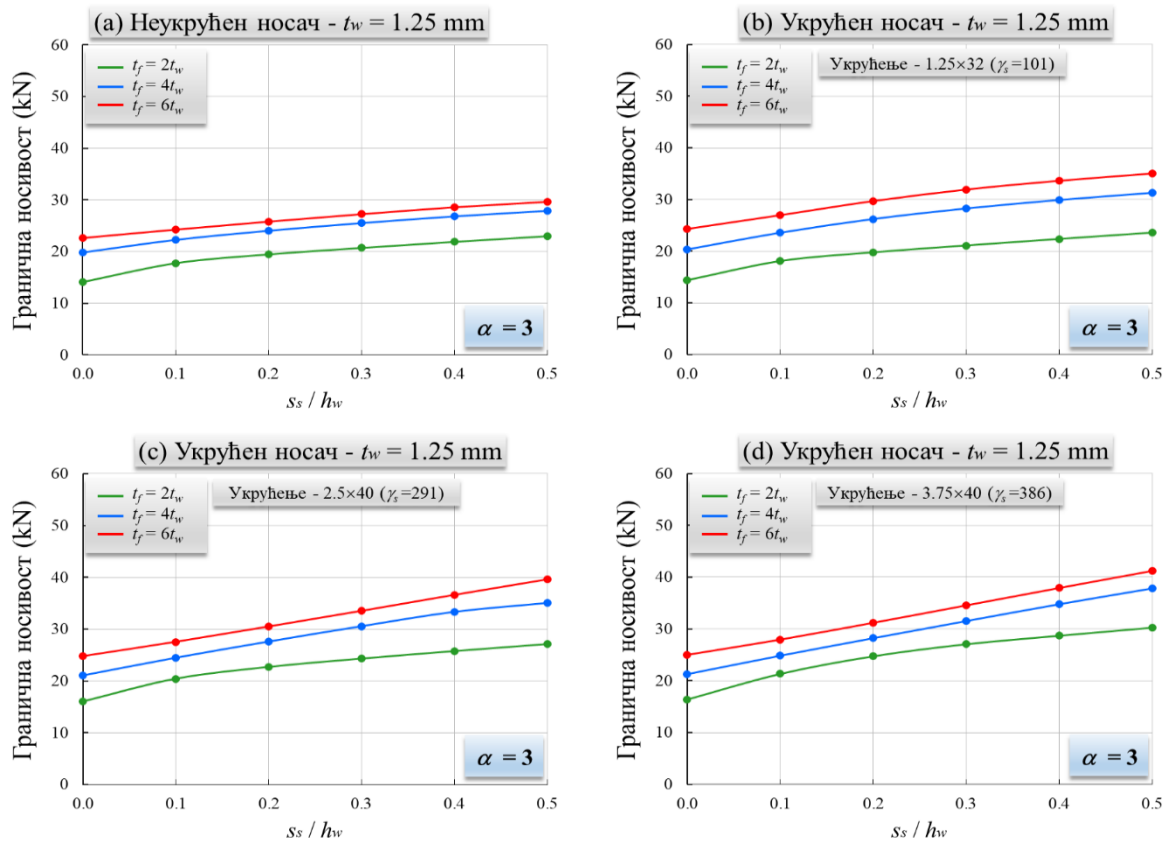
Слика Б6 Гранична носивост носача ($\alpha = 2$, $t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса



Слика Б7 Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 4$) за различите дебљине појаса

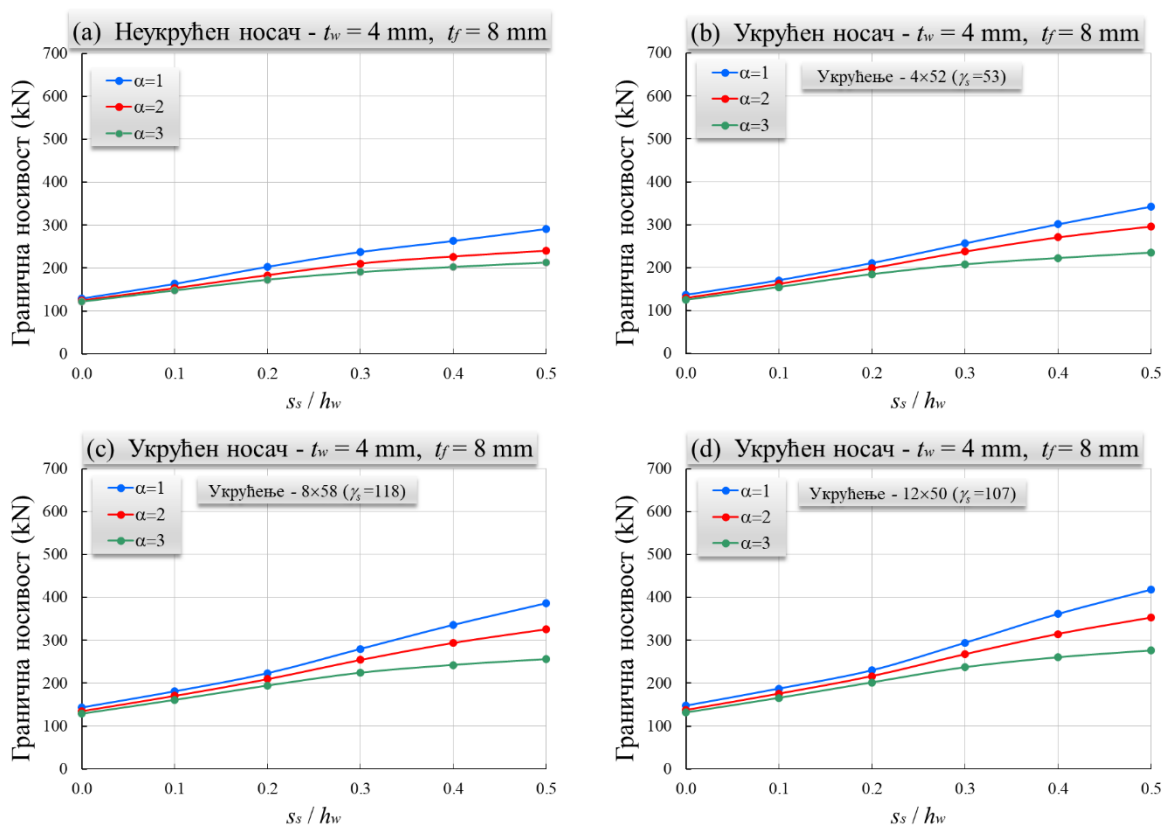


Слика Б8 Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 2$) за различите дебљине појаса

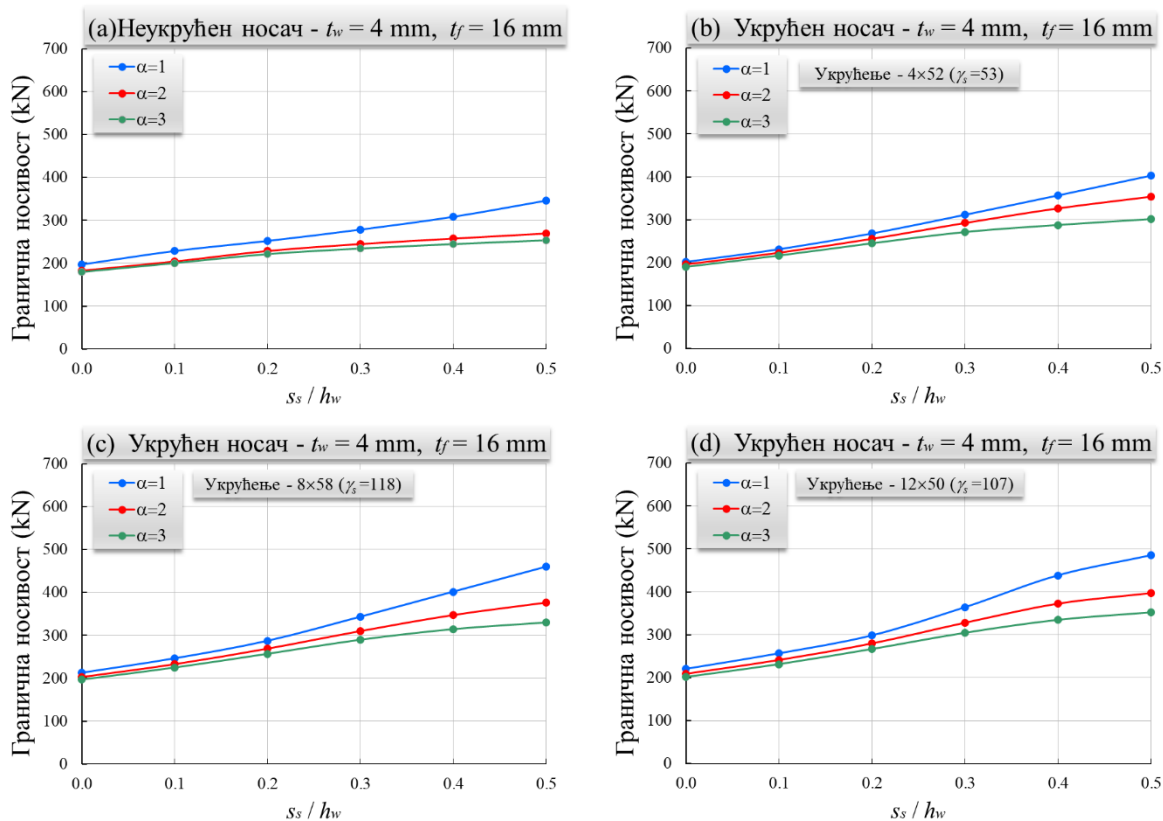


Слика Б9 Гранична носивост носача ($\alpha = 3$, $t_w = 1.25$) за различите дебљине појаса

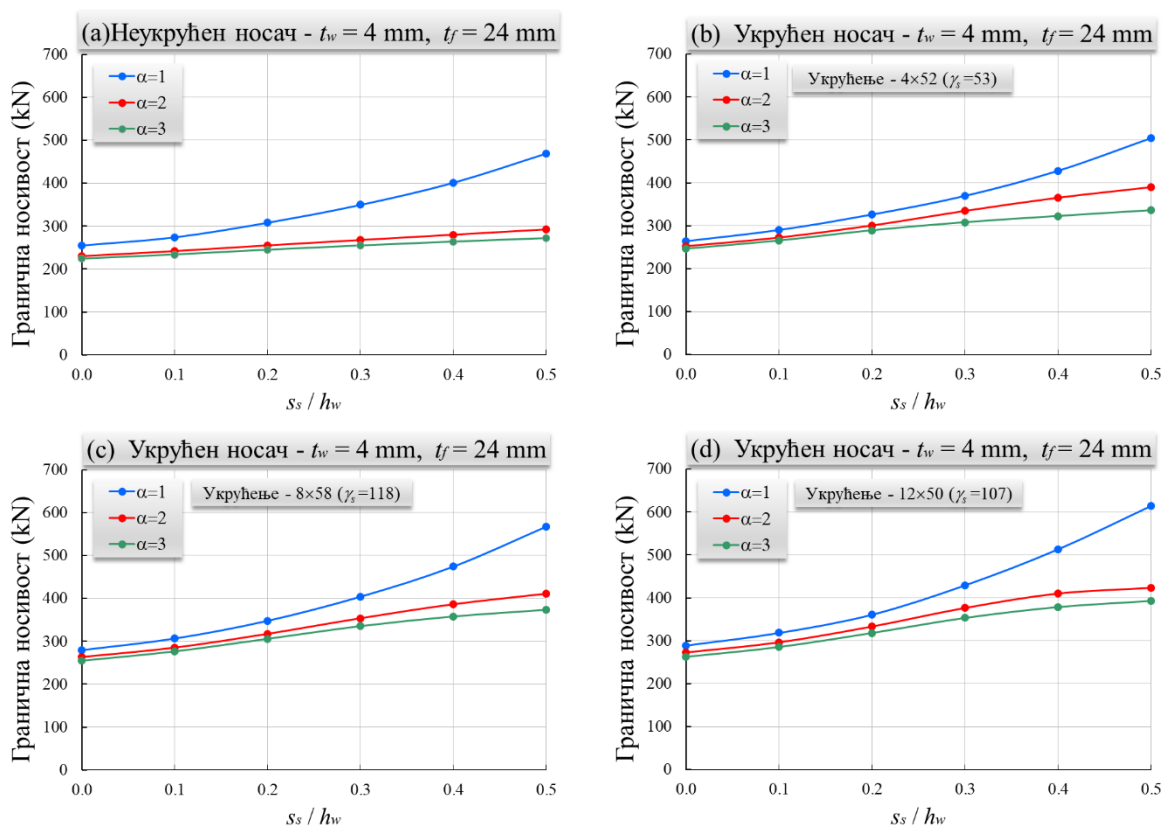
ПРИЛОГ В - Гранична носивост носача за различите односе дужине и висине оптерећеног панела



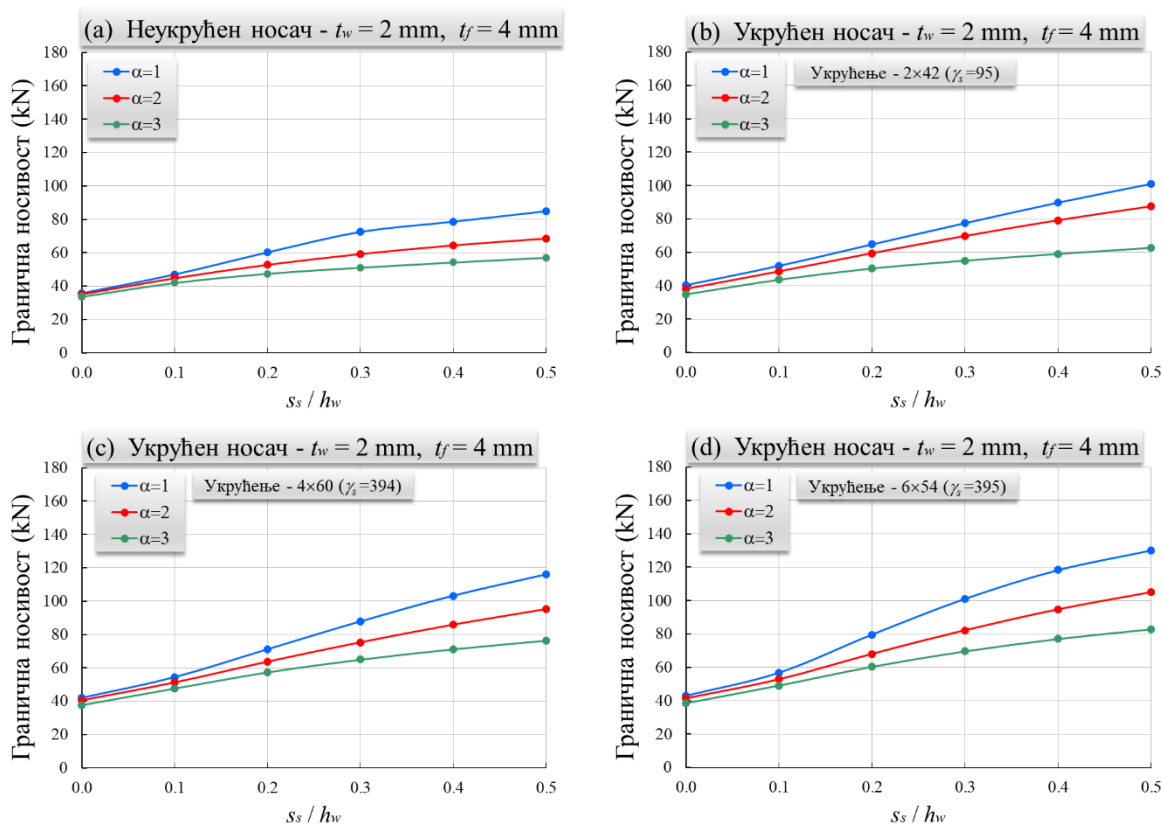
Слика В1 Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 8$) за различите односе дужине и висине опт. панела



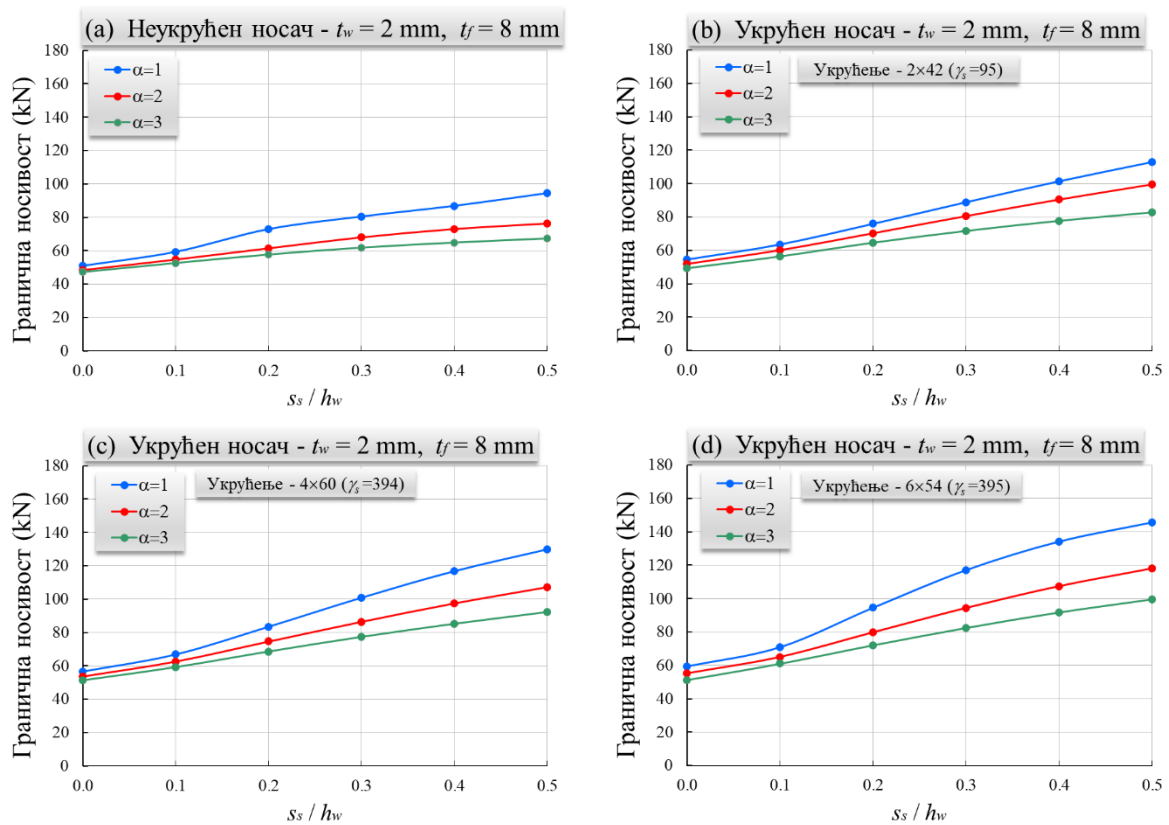
Слика В2 Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 16$) за различите односе дужине и висине опт. панела



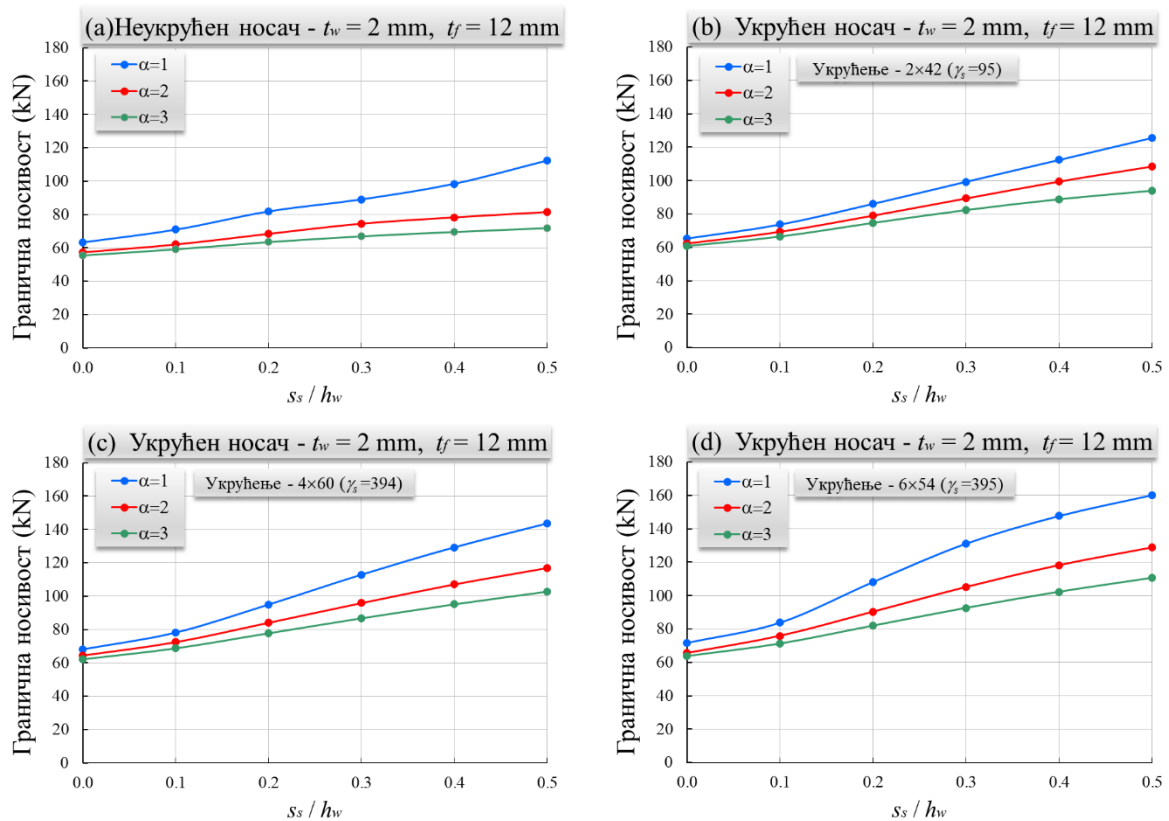
Слика В3 Гранична носивост носача ($t_w = 4$, $t_f = 24$) за различите односе дужине и висине опт. панела



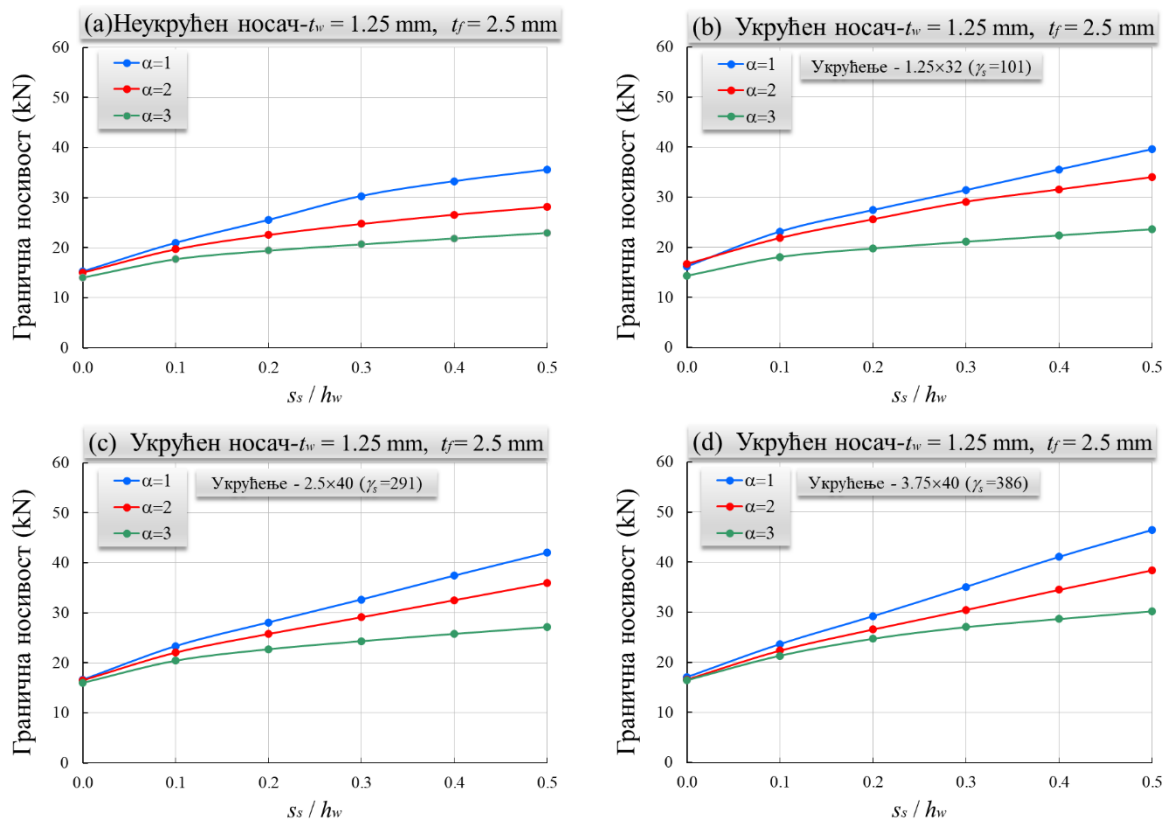
Слика В4 Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 4$) за различите односе дужине и висине опт. панела



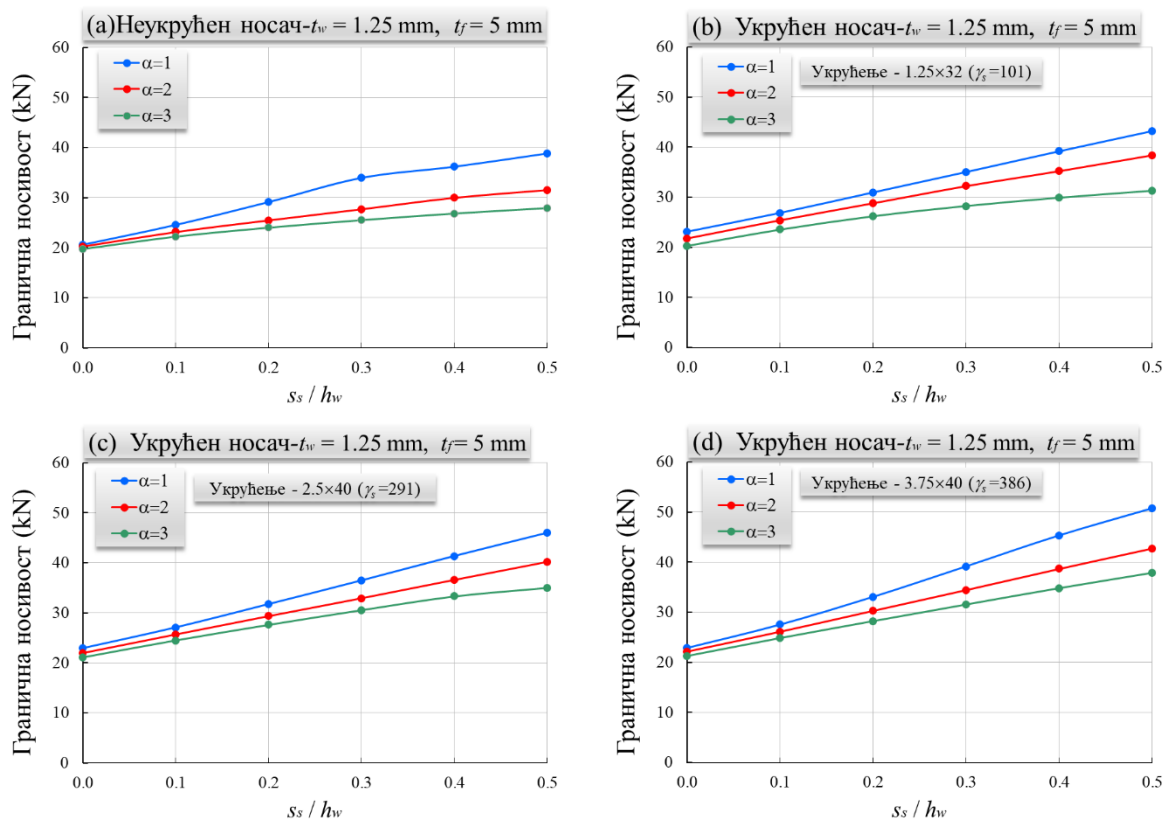
Слика В5 Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 8$) за различите односе дужине и висине опт. панела



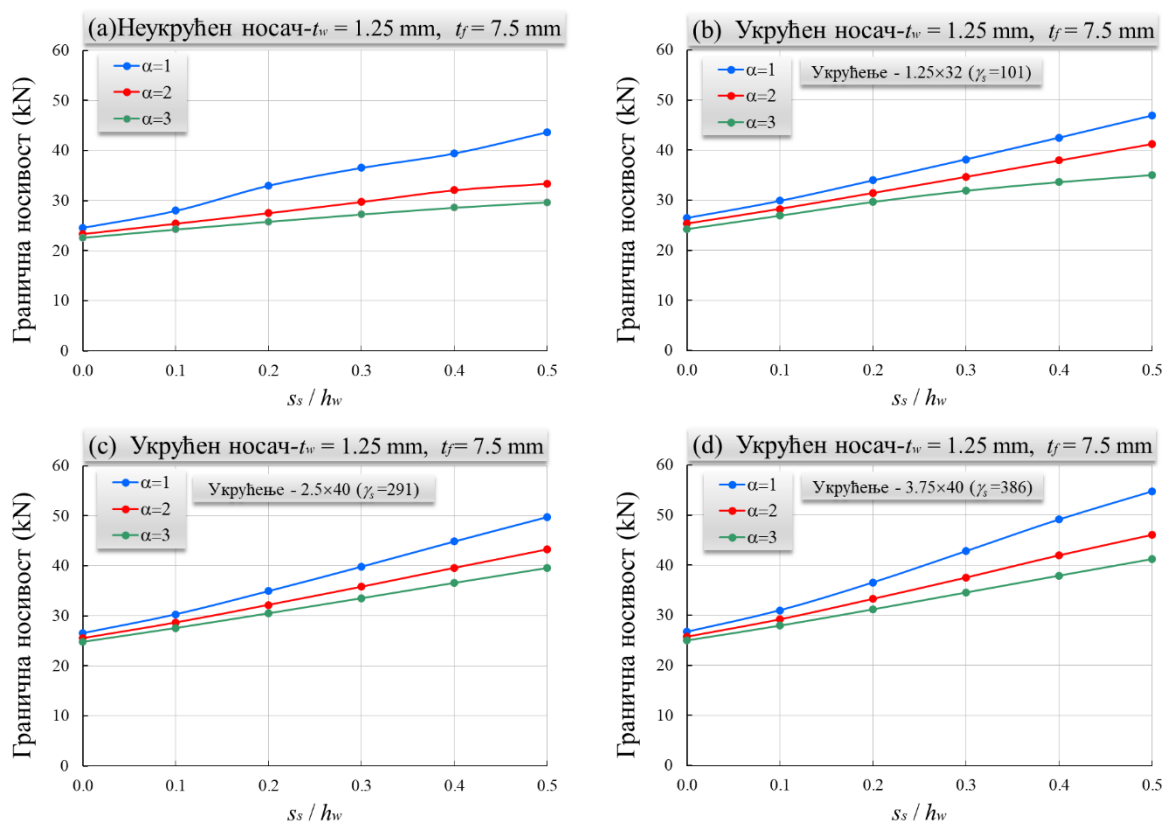
Слика В6 Гранична носивост носача ($t_w = 2$, $t_f = 12$) за различите односе дужине и висине опт. панела



Слика В7 Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 2.5$) за различите односе дужине и висине опт. панела



Слика В8 Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 5$) за различите односе дужине и висине опт. панела



Слика В9 Гранична носивост носача ($t_w = 1.25$, $t_f = 7.5$) за различите односе дужине и висине опт. панела

БИОГРАФИЈА

Александар М. Теранић, дипл. инж. грађ. рођен је 30.09.1976. године у Беранама.

Основну школу и гимназију природно-математичког смјера завршио је у Беранама са одличним успехом и као носилац дипломе „Луча“.

Грађевински факултет у Подгорици уписао је 1995. године, а дипломирао 2003. године, са просјечном оцјеном 8,00. Дипломски рад из предмета Преднапрегнуте и спрегнуте конструкције одбранио је оценом 10.

Постдипломске студије на Грађевинском факултету у Београду, смер Computational Engineering, уписао је 2004. године. Све испите предвиђене наставним планом и програмом положио је са просечном оценом 9,46. Магистарску тезу под називом “Еласто-пластично понашање и гранична носивост лимених носача оптерећених локализованим оптерећењем” успјешно је одбранио 2016. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду.

Од априла 2008. до јануара 2015. године радио је у Саобраћајном институту ЦИП, Београд, Србија. Положио је приправнички испит и добио лиценцу за пројектовање. Радио је као одговорни пројектант и учествовао у изради већег броја идејних и главних пројеката инфраструктурних објеката (углавном армиранобетонских и преднапрегнутих мостова).

Од јануара 2015. до августа 2017. године радио је у компанији CRBC (China Road and Bridge Corporation) и учествовао је у изради Главног пројекта аутопута Бар-Бољаре, дионица Смоковац-Матешево. Одговорни пројектант је за више од 20 мостова на овој дионици.

Од августа 2017. године ради у компанији Spenncon As, Hønefoss, Норвешка, као одговорни пројектант и консултант у статичким анализама објеката високоградње. Компанија је саставни дио шире међународне пословне групе Consolis Group и бави се пројектовањем и извођењем објеката високоградње.

Аутор и коаутор је у 10 радова из области еластопластичне анализе лимених носача оптерећених локалним оптерећењем.

Прилог 5.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора Александар Ђеранић

Број индекса 916/16

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**УТИЦАЈ ПОДУЖНИХ УКРУЂЕЊА НА ПОНАШАЊЕ И ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ
ЛИМЕНИХ НОСАЧА ОПТЕРЕЂЕНИХ ЛОКАЛНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ**

- 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,
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 07.06.2022.

Потпис аутора



Прилог 6.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Александар Ђеранић
Број индекса	916/16
Студијски програм	Грађевинарство
Наслов рада	УТИЦАЈ ПОДУЖНИХ УКРУЋЕЊА НА ПОНАШАЊЕ И ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ ЛИМЕНИХ НОСАЧА ОПТЕРЕЂЕНИХ ЛОКАЛНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ
Ментор	проф.др.Светлана Костић, проф.др. Душко Лучић

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.

У Београду, 07.06.2022.

Потпис аутора



Прилог 7.

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УТИЦАЈ ПОДУЖНИХ УКРУЂЕЊА НА ПОНАШАЊЕ И ГРАНИЧНУ НОСИВОСТ
ЛИМЕНИХ НОСАЧА ОПТЕРЕЂЕНИХ ЛОКАЛНИМ ОПТЕРЕЂЕЊЕМ

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, 07.06.2022.

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.