

UNIVERZITET U NIŠU
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET
NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Na osnovu Odluke Nastavno-naučnog veća Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu od 25.5.2016. godine, broj 8/189, imenovana je Komisija za pregled i ocenu doktorske disertacije mr Danijele Đurić Mijović, dipl.inž.građ, pod nazivom “Arhitektonsko-konstruktivski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”, u sastavu:

1. dr Veliborka Bogdanović, red.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu
2. dr Todor Vacev, vanr.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu
3. dr Dragan Kostić, vanr.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu
4. dr Miomir Vasov, docent
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu
5. dr Saša Stošić, docent
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

U skladu sa navedenom Odlukom, imenovana Komisija podnosi sledeći

IZVEŠTAJ

o pregledu i oceni doktorske disertacije
mr Danijele Đurić Mijović, dipl.inž.građ.

Kandidat mr Danijela Đurić Mijović, dipl.inž.građ. predala je Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu doktorsku disertaciju pod nazivom:

**“ARHITEKTONSKO-KONSTRUKCIJSKI DIZAJN FASADNIH SISTEMA
OD ČELIKA I ALUMINIJUMA”**

Doktorska disertacija mr Danijele Đurić-Mijović, dpl.inž.građ, je izložena na 190 strana. U okviru teksta nalazi se 147 slika, 42 tabele i spisak referentne literature sa 101 naslovom. U tekstu, koji prethodi numerisanom delu rada, nalaze se: rezime na srpskom i engleskom jeziku, primenjeno obeležavanje i sadržaj disertacije. Nakon numerisanih

poglavlja dati su spisak slika i spisak tabela, kao i biografija autora. Uz disertaciju je priložen i disk sa digitalnim oblikom disertacije i svim rezultatima istraživanja.

SADRŽAJ I STRUKTURA DISERTACIJE

U doktorskoj disertaciji pod nazivom “Arhitektonsko-konstruktivski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma”, navedena problematika je sistematizovana i izložena kroz sledeća poglavlja:

1. *Uvod*
2. *Istorijski razvoj lakih fasadnih sistema*
3. *Zid zavese*
4. *Dejstvo vetra na zgrade*
5. *Numeričko rešavanje razmatranog problema*
6. *Analiza numeričkog modeliranja i zaključci*
7. *Numeričko modeliranje zid zavese*
8. *Zaključci*
9. *Literatura*

U prvom poglavlju je kroz uvodno izlaganje dat koncizan uvid u specifičnu problematiku lakih fasadnih konstrukcija i naglašena je njena aktuelnost. Definisana je predmet istraživanja i istaknuti su postavljeni ciljevi uz navođenje primenjenih naučnih metoda.

Zid zavese definisane su u radu kao lake, obodne konstrukcije čijom materijalizacijom se formira jedinstven fasadni omotač. Ova fasadna konstrukcija je mnogo puta tanja od odgovarajućih nosećih zidova i uključuje niz individualnih komponenti odgovornih za ispunjavanje brojnih funkcija zgrade. Obzirom na kompleksnu funkciju ovih fasada, brojne kriterijume koje one moraju da ispune, znatne visine na kojima se izvode, ali i činjenicu da objedinjuju raznorodne materijale u celinu, autor se na početku rada bavi utvrđivanjem problema karakterističnih za zid zavese i njihovom analizom.

Predmet istraživanja kojim se autor bavi u ovoj disertaciji ogleda se u kompleksnijem i sveobuhvatnijem sagledavanju lakih fasadnih konstrukcija tipa zid zavese, a cilj istraživanja jeste usavršavanje fasadnih konstrukcija u smislu njihove racionalizacije i sigurnosti.

Na kraju uvodnog poglavlja data je i struktura rada kroz kratak opis svakog od ukupno devet poglavlja.

U drugom poglavlju autor daje pregled istorijskog razvoja lakih fasadnih sistema sa posebnim osvrtom na nastanak i razvoj zid zavesa. Nastanak i nagli razvoj ovog tipa lakih fasadnih konstrukcija, popularno nazvanim zid zavesama (od eng. *curtain wall*), vezan je za period u kome dolazi do prelaska sa masivnog na skeletni konstruktivni sistem početkom 19. veka. Fasada kod skeletnog sistema gubi noseću funkciju i stvara se mogućnost formiranja transparentnog fasadnog zida. Dat je prikaz reprezentativnih fasada izvedenih na objektima na evropskom i tlu Sjedinjenih američkih država kroz 19. i 20. vek. Na kraju poglavlja prikazan je razvoj savremenih zid zavesa, u obliku u kakvom ih danas poznajemo, kroz tri karakteristične generacije zid zavesa.

U Poglavlju 3 pod nazivom Zid zavesa definisani su laki fasadni sistemi tipa zid zavesa i najvažnije funkcije koje one na objektu moraju da ispune. Čelik, aluminijum i staklo, kao materijali od kojih su zid zavesa najčešće izrađene, ukratko su opisani i istaknute su njihove karakteristike važne za ovo istraživanje. Noseća konstrukcija zid zavesa koja se sastoji od vertikalnih i horizontalnih elemenata, stubića i prečki je najčešće izrađena od čelika i aluminijuma. Naglašene su sličnosti ali i razlike ova dva materijala, o kojima treba voditi računa pri projektovanju ovog tipa konstrukcija. Posebno su navedene i opisane legure aluminijuma koje se koriste za izradu ovih fasada, a to su AW 6060, AW 6061, AW 6063 i AW 6082. U nastavku je objašnjena konstrukcija zid zavesa i navedena su karakteristična opterećenja kojima su one izložene, a posebna pažnja posvećena je vetru kao dominantnom opterećenju ovog tipa fasadnih konstrukcija.

Svestan činjenice da jedan od izazova koji prate fasade tipa zid zavesa jeste i njihova podela, autor daje jasnu i preglednu podelu ovih fasadnih sistema sa više aspekata. Uzimajući u obzir da do pre dvadesetak godina, tehnička regulativa vezana za lake fasadne konstrukcije skoro da nije ni postojala, a da su one uveliko našle primenu na objektima, treba istaći autorovu težnju da prikupi i sagleda trenutno važeće standarde iz ove oblasti.

U drugom delu poglavlja navedena su najčešća oštećenja i problemi koji se javljaju kod zid zavesa. Pored egzaktno definisanih oštećenja autor sagledava i njihove uzroke i ističe da se prilikom projektovanja fasada moraju uzeti u obzir i sledeći aspekti: preciznija analiza opterećenja, način njihovog prenošenja putem veza sa fasadne na glavnu noseću konstrukciju zgrade, deformacija glavne noseće konstrukcije, relativna pomeranja ali i koordinacija pomeranja fasadnog i nosećeg sistema zgrade.

Autor na kraju poglavlja zaključuje da su problemi koji se javljaju na fasadama ovog tipa, najčešće, posledica neadekvatnog projektovanja, nedovoljno sagledanih opterećenja kojima je izložena, ali i posledica njihovog izvođenja, nekompatibilnosti sa nosećim sistemom objekta, itd.

U Poglavlju 4 koje nosi naziv Dejstvo vetra na zgrade objašnjen je sam fenomen vetra kao prirodne pojave i navedeni su uslovi za njegovo nastajanje obzirom da vetar predstavlja dominantno opterećenje koje deluje na zid zavesa. Navodi se da je ponašanje vetra izuzetno složeno, a imajući u vidu da su savremene konstrukcije izuzetnih visina, sve lakše i fleksibilnije, ovo je rezultovalo potrebom za preciznijom procenom efekata dejstva vetra na zgrade. Posebnu pažnju u radu autor posvećuje uticaju reljefa na formiranje i tok vazдушnih strujanja oko objekata da bi na realniji način sagledao dejstvo vetra na ovaj tip lakih fasadnih konstrukcija. Usled nailaska vazdušnog toka na prepreke dolazi do remećenja ravnomernog toka strujanja vazduha, odvajanja toka, formiranja vrtloga i vrtložnog traga iza prepreke. Kao rezultat ovakvog ponašanja vetra noseći sistem zgrade može biti izložen značajnom aerodinamičkom opterećenju, a sam fasadni omotač je izložen jakim lokalnim fluktuirajućim silama.

Autor skreće pažnju da se glavnoj nosećoj konstrukciji posvećuje mnogo pažnje prilikom projektovanja ali da ne smeju biti zanemarene ili olako shvaćene ni tzv. sekundarne konstrukcije i njihovi elementi. U grupu sekundarnih konstrukcija spadaju i fasadne konstrukcije, njihovi elementi i elementi za vezu sa glavnom nosećom konstrukcijom. Fasadni omotač i krovna obloga ne smeju biti zanemareni u sveukupnom ponašanju zgrada usled dejstva vetra. U ovom poglavlju prikazan je i analiziran znatan broj oštećenja fasada tipa zid zavesa usled dejstva jakih vetrova. Na kraju poglavlja dat je prikaz standarda SRPS U.C7.110-112 koji je važio do 2012. godine i trenutno važećeg SRPS EN 1991-1-4. Navedeni su, analizirani i diskutovani svi faktori značajni za ovo istraživanje.

Poglavlje 5 se bavi numeričkim rešavanjem razmatranog problema primenom proračunske dinamike fluida. Na početku poglavlja date su i komentarisane *Reynolds*-ove osrednjene *Navier-Stokes*-ove (*RANS*) jednačine i *Reynolds*-ovi naponi. Data je kratka istorija modela turbulencije, a potom su detaljno prikazani modeli turbulentnog strujanja korišćeni u okviru ovog rada: standardni *k-ε* model, *RNG k-ε* model, Standardni (*Wilcox*-ov) *k-ω* model i *SST (Shear Stress Transport)* model. Numeričko modeliranje zadatog problema izvršeno je korišćenjem softverskog paketa ANSYS Workbench 15.0 (*CFX*). Svakom parametru analize posvećena je posebna pažnja, a gde je bilo neophodno urađene

su preliminarne analize koje su za cilj imale eliminaciju uticaja na krajnja rešenja. Prikazane su, analizirane i komentarisane aktuelne preporuke za numeričke simulacije dejstva vetra na zgrade a to su AIJ (*Tominaga 2008*) i COST 14 (*Franke 2004*).

Potom su prikazani i objašnjeni formirani modeli koji su bili predmet numeričke analize. Sprovedena analiza je obuhvatila dejstvo vetra na izolovanu zgradu odnosa dimenzija $b:d:h \approx 1:1:2.5$. Formirane su četiri grupe modela, označene kao A, B, C i D, u zavisnosti od ugla dejstva vetra na najbližu fasadu zgrade. Grupa A obuhvatila je modele gde je pravac delovanja vetra upravan na jednu od fasadnih ravni. Grupa B obuhvatila je modele gde vetar deluje na najbližu fasadnu ravan pod uglom od 15° , dok su grupe C i D obuhvatile modele kod kojih vetar deluje pod uglom od 30° odnosno 45° . Da bi se dobili što pouzdaniji rezultati dejstva vetra na fasade izolovane zgrade, u obzir je uzeta i hrapavost terena, modeliranjem atmosferskog graničnog sloja.

Na kraju poglavlja prikazani su dobijeni rezultati dejstva vetra na analizirani objekat preko bezdimenzionalnih koeficijenta pritisaka, za sve četiri grupe modela A, B, C i D, odnosno za zgradu na koju vetar deluje pod uglom od 0° , 15° , 30° i 45° . Rezultati su prikazani tabelarno i grafički za oba primenjena turbulentna modela *RNG k- ϵ* i *SST (Shear Stress Transport)*. Konačno, ovde autor daje zaključke za svaku grupu modela posebno.

Poglavlje 6 nosi naziv Analiza rezultata numeričkog modeliranja i zaključci. Na početku poglavlja je konstatovano da je rezultate dobijene proračunskom dinamikom fluida teško u dobijenom obliku uporediti sa standardima. Iz ovog razloga kandidat je dobijene rezultate primenom oba turbulentna modela, analizirao i prikazao u praktičnijoj i jednostavnijoj formi. Formirani su dijagrami za svaku grupu modela pojedinačno, odnosno za slučaj kada vetar deluje na najbližu fasadu zgrade pod uglom od 0° (grupa modela A), 15° (grupa modela B), 30° (grupa modela C) i 45° (grupa modela D). Na svakom od četiri dijagrama uporedo su jasno prikazani rezultati dobijeni primenom *CFD*-a i to *RNG k- ϵ* i *SST* modelom i dva analizirana standarda SRPS U.C7.110-112 i SRPS EN 1991-1-4. Na ovaj način omogućeno je jednostavno i pregledno poređenje dobijenih rezultata ovog istraživanja sa navedenim standardima. Potom su prikazani izvedeni zaključci vezani za ovu fazu istraživanja.

Činjenica je da sprovođenje eksperimenta u ovoj oblasti predstavlja zahtevan i skup proces pa stoga nije svima i svuda dostupan. Obzirom na ovo, u drugom delu poglavlja verifikacija dobijenih rezultata izvršena je poređenjem sa dostupnim rezultatima eksperimenata izvedenih u laboratorijama Politehničkog univerziteta iz

Tokija i Univerziteta Notr Dam iz SAD i rezultatima prikazanim u literaturi (*Baines 1965, Cheung 1984, Amin i Ahuja 2014*). Takođe, za poređenje su korišćeni i dostupni rezultati *CFD* istraživanja. Na ovaj način kandidat je izvršio verifikaciju dobijenih rezultata, a primenjeni turbulentni modeli pokazali su dobro slaganje sa prikazanim rezultatima eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja. Autor ističe da su ove analize izuzetno osetljive obzirom na veliki broj parametara koje zadaje sam korisnik prilikom numeričkog modeliranja dejstva vetra. Posle ovako izvršene verifikacije zaključuje se da je formiranje modela i usvajanje svih bitnih parametara urađeno na zadovoljavajući način a da se dobijeni rezultati smatraju pouzdanim.

U Poglavlju 7 kandidat se bavi numeričkim modeliranjem zid zavesa na osnovu dobijenih rezultata dejstva vetra prikazanih u poglavlju 5. Analiza je sprovedena u programskom paketu SOFiSTiK 2014 zasnovanom na metodi konačnih elemenata i obuhvatila je tri grupe modela iste geometrije. Prvu grupu čine modeli zid zavesa čiji su noseći elementi izrađeni od čelika S235, dok druge dve grupe čine modeli čiji su stubići i prečke izrađeni od aluminijumskih legura AW 6063.T5 i AW 6082.T6. Sprovedena analiza urađena je u modulu STAR2, a obuhvatila je proračun po teoriji I i II reda ali i proračun sa početnim imperfekcijama i redukovanom krutošću. U inicijalnim proračunima početne imperfekcije uzete su po preporukama datim u standardima EN 1993-1-1 i EN 1999-1-1. Međutim, kandidat uočava da je primenom preporuka vezanih za početne imperfekcije, dopušteni ugibi bivaju prekoračeni. Kod projektovanja ovih fasada ugibi predstavljaju značajan faktor tako da granično stanje upotrebljivosti najčešće biva prvo dostignuto. Vrednosti dopuštenih ugiba su relativno male a posledica su krutih materijala ispune. Iz ovih razloga kandidat analizira i redukovane vrednosti početnih imperfekcija $L/500$ i $L/1000$ i zaključuje da kod fasadnih konstrukcija obzirom na njihovu vitkost i oblik poprečnog preseka uvođenje početnih imperfekcija u proračun jeste neophodno ali da su standardima Evrokod 3 i Evrokod 9, preporučene vrednosti neadekvatne.

Drugi deo ovog poglavlja bavi se analizom i proračunom otpornosti nosećih elemenata zid zavesa na bočno-torziono izvijanje. Razloge za ovu analizu autor objašnjava vitkošću nosećih elemenata zid zavesa, oblikom poprečnog preseka, činjenicom da su poprečni preseki često znatno veće visine nego širine, da mogu biti kako dvostruko tako i monosimetrični a mogu biti izrađeni kako od čelika tako i od različitih aluminijumskih legura. U okviru ovog dela istraživanja napravljena je aplikacija u Majkrosoft Ekselu pod nazivom “*AL_LTB_CSP-3plate*”. Autor navodi da za proračun

geometrijskih karakteristika ova aplikacija koristi već postojeći program *CSP-3plate*, *RUBSTAHL* (Kindmann 2007). Sveske pod nazivom “*Al CS class, Alpha*” i “*Mrd, Mcr EC9*” rezultat su ovog istraživanja. One omogućavaju određivanje klase poprečnog preseka i elastičnog kritičnog momenta na bočno-torziono izvijanje M_{cr} kao i sve neophodne parametre, za proizvoljan zadati presek i izabranu aluminijumsku leguru. Ova aplikacija je urađena za slučaj kada su nosači opterećeni jednako podeljenim opterećenjem a pored dvostruko simetričnih i monosimetričnih I poprečnih preseka, obuhvatila je i T poprečne preseke.

U osmom poglavlju autor prikazuje izvedene zaključke vezane za prethodno prikazane rezultate istraživanja sprovedenog u ovoj disertaciji. Kako je prvi deo istraživanja obuhvatio numeričko modeliranje dejstva vetra na zgradu na koju vetar deluje pod uglom od 0^0 , 15^0 , 30^0 i 45^0 , pojedinačni zaključci izvedeni za svaku grupu modela prikazani su u poglavljima od 5.6.1 do 5.6.4, odmah nakon prikazanih analiza. Obzirom na obim sprovedenih analiza autor daje i konkretne preporuke za formiranje modela u *CFD*-u zavisno od izabranog turbulentnog modela (*RNG k-ε* i *SST k-ω*). Ove preporuke vezane su za veličinu i način formiranja domena, odabir granica, veličinu elemenata mreže itd.

Poređenjem koeficijenata pritisaka C_p dobijenih numeričkim modeliranjem sa standardima SRPS U.C7.112 i SRPS EN 1991-1-4 kandidat zaključuje da su dobijene vrednosti C_p veće po apsolutnoj vrednosti od koeficijenata datih standardom SRPS U.C7.112. i da je bolje slaganje sa trenutno važećim standardom SRPS EN 1991-1-4.

U drugom delu poglavlja utvrđeno je da dimenzije vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa, izrađenih kako od čelika tako i od ispitanih aluminijumskih legura, se neće bitno razlikovati primenom proračuna po teoriji I i II reda. Razlog za ovo pored strogih uslova za ugib, takođe leži i u činjenici da obzirom na male poprečne preseke, težina ovih elemenata nije velika, pa nema velikih normalnih sila u štapovima. Proračun vertikalnih nosećih elemenata zid zavesa po teoriji I i II reda pokazali su male, skoro beznačajne razlike. Komentarisane su standardima preporučene vrednosti početnih imperfekcija za proračun fasadnih elemenata. Potom su prikazani zaključci vezani za ispitano bočno-torziono izvijanje ovih nosača.

Deveto poglavlje daje pregled korišćene literature, standarda i kataloga.

DOPRINOS DISERTACIJE

Doktorska disertacija kandidata mr Danijele Đurić Mijović, dipl.inž.građ. predstavlja značajan doprinos u oblasti savremenih, lakih fasadnih konstrukcija. Naučni doprinos disertacije ogleda se, pre svega, u postavci i originalnosti rešavanja tretiranih problema vezanih za ovaj tip konstrukcija. U ovom istraživanju kandidat sagledava zid zavesa na kompleksniji i sveobuhvatniji način uključujući veliki broj parametara da bi se što vernije predstavili uslovi i zahtevi kojima je ova fasada izložena.

Tokom istraživanja kandidat je koristio savremene, napredne softverske pakete u cilju dobijanja što pouzdanijih rezultata dejstva vetra na zgrade. Treba istaći težnju autora da dobijene rezultate verifikuje na više načina i to: poređenjem sa aktuelnim standardima ali i eksperimentalnim, *CFD* i rezultatima iz literature, te na ovaj način dolazi do pouzdanijih rezultata. Doprinos ovog dela istraživanja ogleda se i u unapređenju trenutno aktuelnih preporuka za modeliranje dejstva vetra na zgrade primenom *RNG k-ε* i *SST k-ω* turbulentnih modela. Ono što ovaj rad ističe jeste težnja i uspeh kandidata da pored analize dejstva vetra na zgradu pod uglom od 0^0 , sagleda i dejstvo vetra pod uglom od 15^0 , 30^0 i 45^0 . Predložene preporuke koje važe za sve grupe modela odnosno nezavisne su od pravca dejstva vetra na zgradu.

Ovo istraživanje nesumnjivo je pokazalo, da je razumevanje prirode i ponašanja vetra od ključnog značaja za adekvatno projektovanje lakih fasadnih konstrukcija tipa zid zavesa i da dejstvo vetra na zgradu mora biti predmet analize u najranijim fazama projektovanja. Kandidat ukazuje na manjkavosti i predlaže unapređenje aktuelne regulative vezane za dejstvo vetra na zgrade. Uključivanjem savremene analize dejstva vetra na fasade visokih zgrada i uzimajući u obzir na promenu brzine vetra sa visinom, dobija se realnija slika opterećenja posebno na uglovima objekta i velikim visinama.

Produbljujući analizu i sagledavajući aspekte stabilnosti kandidat se bavi otpornošću nosećih elemenata zid zavesa na bočno-torziono izvijanje i ističe prednosti određenih monosimetričnih u odnosu na dvostruko simetrične preseke. Na ovaj način potvrđeno je da je moguća racionalizacija nosećih elemenata zid zavesa bez ugrožavanja njihove stabilnosti, a otvara se mogućnost znatnih ušteda u materijalu.

Dobijeni zaključci vezani za sve faze ovog istraživanja predstavljaju naučni i stručni doprinos u oblasti projektovanja i proračuna lakih fasadnih konstrukcija, tipa zid zavesa, koje se mogu koristiti u naučne i edukativne svrhe kao i u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

ZAKLJUČAK

Doktorska disertacija mr Danijele Đurić-Mijović, dipl. inž. građ. pod nazivom “Arhitektonsko-konstruktivski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma” na savremen način tretira probleme koji se javljaju pri projektovanju lakih fasadnih konstrukcija tipa zid zavesa. Dejstvo vetra, kao dominantan faktor, je ovde analizirano primenom numeričke dinamike fluida i vrhunskog softvera, a nosivost i stabilnost konstruktivnih elemenata fasada proveravana originalnim računskim pristupom.

Rezultati istraživanja do kojih se došlo predstavljaju značajan pomak u oblasti aerodinamike građevinskih konstrukcija i daju realne osnove za poboljšanja postojećih evropskih standarda o dejstvu vetra na fasadne konstrukcije i zgrade uopšte.

Na osnovu napred izloženog, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu da doktorsku disertaciju mr Danijele Đurić-Mijović, dipl.inž.grač. pod naslovom “ARHITEKTONSKO-KONSTRUKCIJSKI DIZAJN FASADNIH SISTEMA OD ČELIKA I ALUMINIJUMA” prihvati i uputi Univerzitetu na davanje saglasnosti za javnu odbranu.

Članovi komisije:

dr **Veliborka Bogdanović**, red.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu

dr **Todor Vacev**, vanr.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu

dr **Dragan Kostić**, vanr.prof.
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu

dr **Miomir Vasov**, docent
Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu

dr **Saša Stošić**, docent
Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

U Nišu, jul 2016.