Стручни критички осврт

Данијела З. Ђурић-Мијовић, *Arhitektonsko-konstrukcijski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma* (енглеска насловна страна: *Architectonic – Structural Design of Steel and Aluminium Façade Systems*). Докторска дисертација. Ниш: Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, 2016, 10 предстрана + 201 стр. (основни текст на штампаним странама 1–183; литература од стр. 184, спискови слика и табела од стр. 191, биографија на стр. 197). Ментор проф. др Милисав Дамњановић; комисија за преглед и оцену: В. Богдановић, Т. Вацев, Д. Костић, М. Васов, С. Стошић. Рад је писан српским језиком, латиницом. Отворени приступ: НаРДуС.

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација узима за предмет целину коју чине лаке фасадне конструкције типа зид завеса (curtain wall), с носећим елементима од челика и алуминијума, повезане с најмеродавнијим оптерећењем које их погађа — дејством ветра. Рад је двоструко устројен. Први део нумерички моделира дејство ветра нумеричком динамиком флуида (ANSYS Workbench 15.0, CFX; осредњене Навије–Стоксове једначине у Рејнолдсовом смислу — RANS; турбулентни модели RNG k-ε и SST k-ω) на изоловану зграду димензија 45 × 40 × 100 m под угловима налета 0°, 15°, 30° и 45° (групе модела A, B, C и D), с моделираним атмосферским граничним слојем, и из тога изводи препоруке за формирање CFD модела и предлог зонирања фасадних равни. Други део методом коначних елемената (SOFiSTiK 2014) анализира карактеристично фасадно поље 5 × 4 m са стубићима и пречкама од челика S235 и алуминијумских легура AW 6063.T5 и AW 6082.T6, по теорији I и II реда, с почетним имперфекцијама и редукованом крутошћу, те отпорност стубића на бочно-торзионо извијање сопственом Excel апликацијом. Тежиште рада је, дакле, спој аеродинамике зграда и стабилносне анализе носећих елемената фасаде — и то тежиште одређује како се мери свака замерка која следи.

Пре свега осталог ваља изрећи мерило, изричито и без изузетка. Рукопис је предат крајем маја 2016. године (Комисија за преглед и оцену именована је 25. маја 2016, а реферат носи ознаку „U Nišu, jul 2016“). Рад се стога овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и знању који су постојали и били доступни пре тог тренутка. Ништа настало касније није мерило: ни доцнија издања стандарда, ни водичи добре праксе објављени после тога, ни новије верзије софтвера. То правило важи и за списак литературе овог осврта — свака његова јединица објављена је пре краја маја 2016, изузев саме дисертације, реферата комисије и извора за чињенице

које се временом не мењају (уз назнаку издања). Ту треба додати и једну околност коју ваља тумачити у корист ауторке: депонована PDF датотека рада израђена је 13. јула 2016, дакле после именовања комисије, па се депонована верзија може у појединостима разликовати од рукописа предатог комисији — што се не узима на штету рада.

Наводи из дисертације преузети су дословно, у наводницима, у писму рада (латиница), с бројем штампане стране у загради. Тврдње о стандардима и прописима сравњиване су с изворним текстовима у издању важећем на рок.

II Шта рад доноси

Осврт је дужан да почне оним што дисертација јесте, јер је то и највећи део онога што она вреди.

Прво и најважније, први део рада је обиман и уредно документован нумерички оглед. Студија мрежне независности спроведена је низом од седам до осам мрежа (до реда $5{,}6\cdot10^6$ коначних запремина), с фактором уситњавања суседних мрежа, доследно за све четири групе налета (A–D) и за оба турбулентна модела, уз раздвајање максималних и минималних коефицијената притиска C_p по свакој фасадној равни и крову. Пре главног прорачуна изведене су сопствене прелиминарне анализе — положаја зграде у домену (5H наспрам 10H, с бројчано исказаним разликама) и горње границе домена (Inlet наспрам Symmetry, с разликом испод једног процента) — и на основу њих су свесно и образложено усвојене димензије домена ради уштеде рачунских ресурса. То је узоран инжењерски поступак: препорука се не преузима паушално него се мери и брани.

Друго, валидација је широка. Сопствени резултати упоређени су с пет независних скупова података — аеротунелским огледима (Baines 1965, Cheung 1984, Amin и Ahuja 2014), базом аеродинамичких мерења Политехничког универзитета у Токију и Универзитета Нотр Дам, и туђим CFD резултатима (Dagnew и др. 2009) — уз доследан налаз да SST k-ω боље погађа меродавни притисни C_p од RNG k-ε. Уз то, ауторка поштено и доследно износи највеће неслагање: „koeficijenti Cp [-] dobijeni numerički i do tri puta manji od eksperimentalno izmerenih“ (стр. 140), и сама ограђује сличност упоређених објеката — „model na kome je vršeno eksperimentalno ispitivanje nisu u potpunosti isti već slični“ (стр. 148). Отворено навођење онога што не иде у прилог сопственим резултатима појачава веродостојност свега осталог.

Треће, из тога следе конкретне, употребљиве препоруке за формирање CFD модела: „Utvrđeno je da dužina domena iza objekta od interesa treba biti 30 – 35h, gde je h visina objekta“ (стр. 177), горња граница као Symmetry на 5h, фактор уситњавања суседних мрежа 1,25–1,3 (уместо пренаглог 1,5), и налаз да „preporučeni broj od 10 elemenata po fasadi“ (стр. 178) није довољан за поуздане резултате. Уз то стоји и методолошки

драгоцено упозорење: „Uočeno je da promenom veličine elemenata mreže može doći čak do promene znaka koeficijenata pritisaka“ (стр. 178) — упозорење да мрежа може одлучити чак и о томе да ли је нека раван у притиску или сисању. Практично применљив је и налаз о положају највећих притисака — „na navetrenoj strani javlja se na ~0.85h, gde je h visina zgrade“ (стр. 179) — и, пре свега, пројектантски оперативан предлог зонирања: „navetrenu i zavetrenu fasadu treba podeliti na gornju i donju zonu“ (стр. 179), с приближно двоструко већим коефицијентом у горњој него у доњој зони.

Четврто, други део доноси уредан и самосталан инжењерски прилог. Поређење по теорији I и II реда даје разлике испод једног процента, из чега следи налаз да ефекти II реда и бочно-торзионо извијање нису меродавни за витке фасадне елементе; сопствена Excel апликација „AL_LTB_CSP-3plate“ спреже валидирани програм CSP-3plate (за геометрију пресека, пакет RUBSTAHL, Kindmann 2007) са сопственим потпрограмима по Анексу I стандарда EN 1999-1-1:2007, а из тога следи мерљив и применљив налаз — „povoljno ponašanje pokazali su preseci gde je 0.2≤ ψf≤0.8“ (стр. 182), с најповољнијим ψf = 0,8 за оптерећење на горњој ножици и у центру смицања. Тачно је при том препознато и ограничење важеће регулативе, које рад надомешта: EN 1993-1-1 не даје израз за критични момент бочно-торзионог извијања таквих пресека, па се приступа стандарду за алуминијум.

Најзад, потребно је поштено рећи и оно што надилази појединачне вредности: где год су се тврдње рада могле сравнити с изворним стандардима и уџбеничком грађом, у највећем делу су се показале тачним. Једначине и вредности коефицијената у поглављу о ветру верно одговарају изворним стандардима, физички опис струјања око зграде је тачан, теоријски приказ модела турбуленције уредно је изложен и цитиран, а списак литературе поклапа се с бројем из реферата (101 наслов). Та поузданост основе није споредна околност: она је оно што уопште омогућава да се о раду расправља овако детаљно.

III Циљ, хипотеза и метод

Циљ је постављен програмски и описно: „Cilj rada je da fasade tipa zid zavese budu sigurnije, da budu sagledane kompleksnije“ (стр. 2). Од тих одредница „sagledane kompleksnije“ јесте операционализовано (CFD под четири угла, зонирање, анализа стабилности), док „sigurnije“ и „realnije“ немају задату меру — нема показатеља сигурности или поузданости којим би се потврдили. То није мана замисли, него позив да се завршна оцена циља веже за оно што је стварно измерено.

Полазна хипотеза дата је широко: „Osnovna, polazna hipoteza koju treba potvrditi ovim istraživanjem jeste da ima mesta usavršavanju fasadnih konstrukcija i njihovih sistema, kako u smislu projektovanja, tako i izrade“ (стр. 3). Овако постављена, хипотеза је тешко строго оборива — за скоро сваку инжењерску област увек има места

усавршавању — а рад је потврђује управо пресликавањем опште претпоставке на налазе. Ту напетост, међутим, не треба преувеличавати. Хипотеза овде има улогу усмеравајућег оквира, а не строго обориве тезе, и — што је пресудно — њена садржина испуњена је конкретним, мерљивим доприносима (разлике по теорији I и II реда испод једног процента, повољан опсег параметра моносиметрије $0{,}2 \leq \psi f \leq 0{,}8$, препоруке за CFD, предлог зонирања). Потврда тиме почива на изведеним резултатима, а не на реторици. Остаје танко, али тачно језгро: део хипотезе који се тиче усавршавања *израде* фасада нигде се посебно не испитује ни мери, па за тај део потврда нема покриће у грађи; и препоручљиво би било изричито навести критеријуме успеха. Оцена реферата о потврђеним хипотезама, узето формално, стоји, али би добила прецизношћу ако би се тај део ограничио на пројектовање.

Најављене методе (стр. 4) — анализа, класификација, компарација, нумеричко моделирање и нумеричка анализа — све су и стварно примењене, што рад чини методолошки доследним у замисли. Три садржинске примедбе методолошком слоју, које се разрађују у наставку, тичу се домета закључака, а не саме замисли: примењени стационарни RANS даје средње Cp који се терминолошки и упоредно третирају као да носе динамичко (вршно) дејство; нема формалне процене нумеричке несигурности; а препоруке су изведене с једног случаја. Ниједна од њих не обара рад, али све траже изричиту ограду при читању закључака.

IV Зид завесе: материјали, склоп, стандарди и проблеми (поглавља 2 и 3)

Прегледни део рада — историјски развој лаких фасада и систематски приказ зид завеса (материјали, склоп, подела, стандарди, проблеми и допуштена померања) — прикладно уводи предмет и добро га веже за мотивацију истраживања. Упоредна табела механичких својстава челика, алуминијума и стакла на једном месту (по EN 1999-1-1:2007) прегледна је подлога за избор материјала, а рано је, тачно, препознат и кључни физички проблем моносиметричних I пресека — бочно-торзионо извијање — што успоставља везу са сопственим доприносом другог дела. Ниједан сопствени нумерички резултат не почива на овом делу, па су све замерке које следе формалне, апаратске или појединачно-чињеничне тежине.

Неколико их, ипак, треба изричито навести као грешке које ваља исправити. Прва је нумеричка: тврдња да је код алуминијума „koeficijent termičkog širenja (vidi tabelu 3.1) je tri puta veći nego kod čelika“ (стр. 19) демантована је сопственом табелом на истом месту, у којој однос коефицијената топлотног ширења ($23{\cdot}10^{-6}$ према $12{\cdot}10^{-6}$) износи приближно два, а не три; множилац „три пута“ по свој прилици је пренет из тачног односа модула еластичности. У истој реченици унакрсни позив упућује на

табелу 3.1 уместо на табелу с коефицијентима ширења — ситна омашка у упућивању. Тачне вредности стоје у самој табели, па закључци нису измењени, али реченицу треба исправити.

Друга група тиче се приказа актуелне регулативе за зид завесе. У одељку који приказује важеће стандарде наведени су као нацрти prEN 13119, prEN 14019 и prEN 13947, иако су сва три до маја 2016 већ била објављена као пуноважни EN стандарди (EN 13119:2007, EN 14019:2004, EN 13947:2006), при чему је EN 13947 до рока већ био замењен стандардом EN ISO 12631:2012. Пошто одељак приказује важеће стање, ознака prEN у тренутку предаје није тачна, а временско правило ту не иде у прилог раду (замене су настале 2004–2012). Уз то, опис уз EN 13501-2 погрешно је преузет од Дела 1 (реакција на пожар), док се Део 2 односи на отпорност на пожар (fire resistance), а као тренутно важећа наведена су и повучена акустичка издања ISO 140-3:1995 и ISO 717-1:1996, замењена новијим издањима још пре рока. Ниједан од тих стандарда не улази у прорачуне рада и предмети им се тачно наводе, па је тежина замерки споредна — али приказ важеће регулативе треба ускладити са стањем на дан предаје.

Остале примедбе овог дела заиста су лаке: илустрације општепознатих објеката преузете с Википедије без потпуног извора, поједини бројеви (мере Кристалне палате, датовање селидбе Баухауса, квалификација зграде Hallidie као седишта Америчког архитектонског института уместо његовог огранка), недоследна транслитерација презимена и навођење каталога само називом, те неколико лекторских омашки. Реч је о материјалу прегледно-приказног карактера који не носи ниједан резултат.

V Дејство ветра на зграде и прописи о оптерећењу ветром (поглавље 4)

Поглавље о ветру садржински је коректно. Дефиниције оба меродавна стандарда — SRPS U.C7.110–113 (изворно JUS, 1991/1992) и SRPS EN 1991-1-4:2012 (истоветан EN 1991-1-4:2005) — пренете су с изворним приписивањем, а рад тачно раздваја статус двају стандарда, наводећи да је стари важио до 2012, а европски да је тренутно на снази. Једначине профила брзине и притиска и вредности коефицијената верно одговарају изворницима. То поглавље, дакле, добро припрема нумерички део.

Замерке су претежно нотационе и апаратске. У изразу за фактор терена (4.21) у бројиоцу стоји z уместо z0, уз висински опсег који уз константан фактор терена није примерен — реч је о изостављеном индексу при слогу, док су сви коефицијенти (0,19; 0,07; z0,II = 0,05 m) усаглашени с EN 1991-1-4, а профил је рачунат исправним вредностима. Илустративне фотографије оштећења фасада (слике 4.9–4.17) преузете су с блогова и портала, делом без аутора и датума приступа, а поједине носе нетачне

године верно пренете из извора (торнадо у Атланти датиран у 2000. уместо 2008; ураган Ike у 2006. уместо 2008). Немачки водич VDI 3783 наведен је без ознаке дела (реч је о Blatt 12:2000), а две табеле уметнуте су као верне репродукције изворника на енглеском без превода заглавља. Све те примедбе тичу се научног апарата и читљивости, не тачности параметара храпавости и коефицијената, који су проверени и одговарају изворима.

Једна примедба има методолошко језгро које се пуном тежином испољава тек у поређењима поглавља 6, али је вреди најавити овде: поглавље верно преноси дефиниције стандарда и изричито раздваја глобалне коефицијенте $c_{pe,10}$ (за површине веће од 10 m²) од локалних $c_{pe,1}$ (за површине до 1 m², за причвршћења и мале елементе). Управо то раздвајање постаје меродавно кад се сопствени средњи C_p буду поредили са стандардним коефицијентима.

VI Нумеричко моделирање ветра: домен, мрежа, турбулентни модели, гранични услови и резултати (поглавље 5)

Ово је језгро првог дела и, у највећем, солидно изведено. Теоријски приказ (RANS једначине, Рејнолдсови напони, стандардни k-ε, RNG k-ε, Wilcox-ов k-ω и SST k-ω, с једначинама и константама) систематичан је и уредно цитиран, а провера фон Карманове константе показује владање материјом. Гранични услови документовани су појединачно: улаз с профилом атмосферског граничног слоја (Richards и Hoxey), тло задате храпавости (z_0 = 0,1 m), излаз, бочне и горња граница и зидови зграде. Усвојени критеријуми мреже — фактор уситњавања суседних мрежа 1,3 и више од десет елемената по страни објекта — потичу управо из водича добре праксе на које се рад позива (COST 732, Franke и др., 2007; AIJ, Tominaga и др., 2008; однос суседних ћелија по Ferziger и Perić, 2002), па су методолошки утемељени, а не произвољни. Хомогеност улазног профила кроз празан домен, међутим, није квантификована, што Blocken, Stathopoulos и Carmeliet (2007) издвајају као услов ваљаности зидних функција уз храпаво тло. Прелиминарне анализе положаја зграде и горње границе домена, поменуте у одељку II, узорне су мале валидационе студије с образложеном одлуком. Домишљато је и инжењерско решење издужених ћелија изнад крова кроз два поддомена.

Три ствари, међутим, треба изричито навести, и оне се тичу онога што рад проглашава меродавним.

Прва и најозбиљнија у целом раду јесте да за групу D (налет под 45°) сисући (минимални) C_p на наветреној фасади, крову и левом зиду нису достигли мрежну независност ни на најфинијој мрежи: магнитуда монотоно расте (на крову до −2,61), а „najveća odstupanja javila su se kod minimalnih C_p [-] na navetrenoj fasadi i levom zidu (do 20%)“ (стр. 129), како ауторка сама изричито наводи. Пошто су управо вршни

сисући притисци на угловима и уз кров меродавни за причвршћење фасадне облоге — а то је срж тезе рада — њихова немрежна конвергенција стварно ограничава употребну вредност баш тих вредности за ту сврху. У корист рада говори то што је ограничење поштено и изричито признато, а максимални притисни Cp, меродаван за глобално оптерећење, остаје стабилан; даље прогушћивање превазилазило је расположиве рачунске ресурсе. То, међутим, не отклања сам налаз, него га чини часно признатим али стварним ограничењем.

Друга је у томе што независност од мреже почива искључиво на процентуалном одступању двеју суседних мрежа, без формалне процене грешке дискретизације (Ричардсонова екстраполација, индекс конвергенције мреже — GCI). За величине које пролазе кроз нулу (максимални Cp крова) тај поступак даје математички неупотребљиве бројеве (реда неколико стотина процената), што рад делом сам ублажава изричитом квалитативном оградом да су одступања на крову знатна и мрежно зависна, а обмањујуће проценте не користи за лажан закључак о конвергенцији. Најмеродавнији писани ослонац за ову замерку јесте управо водич добре праксе на који се рад позива: COST 732 за RANS валидацију тражи да се „for validation simulations, a systematic grid convergence study using generalised Richardson extrapolation should be tried“ (Franke и др., 2007), а формални поступак процене несигурности прописује и уреднички стандард ASME (Celik и др., 2008). Изостанак такве процене сам по себи не доказује нетачност резултата, па је ово захтев за строжим поступком, а не доказ нетачног; али би GCI поузданије омеђио преосталу грешку и заменио проценте тамо где Cp пролази кроз нулу.

Трећа је инхерентно ограничење изабраног метода: стационарни RANS при једној референтној брзини даје искључиво осредњене Cp, док вршни флуктуирајући притисци — управо величина меродавна за локални сре,1 и за оштећења облоге која рад и мотивишу — овим приступом нису доступни. Метод је примерен за средња оптерећења, а ограничење је делом и признато у раду, али га треба јасно навести при поређењу са стандардним коефицијентима (то поређење се пуном тежином разматра у одељку VII).

Уз то иду и појединачне унутрашње недоследности које не мењају резултате, али отежавају праћење и треба их исправити ерата-списком: бројка о највећем одступању на крову SST групе B пренета је из закључка групе A (за групу B то одступање између суседних мрежа износи знатно више); одредба да је слагање најфинијих мрежа „мање од 5%“ важи за доминантне притисне вредности, али не и за све равни; исказ да је кров групе C у потпуном сисању „za mrežu veličine 2.2 m i sve sitnije mreže“ (стр. 118) требало је везати за финију мрежу, будући да сопствена табела још даје позитиван максимални Cp крова за мрежу 2,2 m; а релативна ознака ширине сисуће зоне „~B/60“ на једном месту аритметичка је омашка (при основи ≈45 m то је ~B/30, како рад исправно пише на суседном месту). Прелазак на SST k-ω

за групу D, коју RNG није успео да реши с доследним доменом, физички је оправдан (боље хвата одвајање тока при косом налету) и не нарушава упоредивост, јер је SST примењен на све четири групе; часно је, уз то, наведено и негативно искуство — „nije bilo moguće uraditi analizu gde bi svi parametri bili isti osim veličine mreže“ (стр. 125). Оправдање одбацивања модела k-ω, међутим, позива се на „vrednosti Cp su bile mnogo veće od očekivanih i od vrednosti dostupnih u literaturi“ (стр. 125) уопштено, без навода конкретног извора на том месту; исцрпно поређење дато је тек у поглављу 6, на које је требало упутити.

VII Верификација: стандарди, огледи и литература (поглавље 6)

Поглавље верификације носи праву научну вредност: широку валидацију с пет независних скупова података и поштено пријављивање највећих неслагања, о чему је већ било речи. Дијаграми који уз сопствене CFD резултате приказују и оба стандарда за све четири групе прегледни су и омогућавају непосредно поређење.

Средишња методолошка примедба тиче се природе поређења. Сопствени Cp су осредњене вредности стационарног RANS-а, а коефицијенти стандарда (cpe,10 и cpe,1) пројектне су коверте везане за вршни притисак брзине — то нису истоврсне величине, а усаглашеност референтне висине и притиска није у поглављу изричито показана. Стандард EN 1991-1-4:2005 сам раздваја те величине по намени (у одељку 7.2.1: локални коефицијенти cpe,1 везани су за површине до 1 m², за пројектовање малих елемената и причвршћења, а глобални cpe,10 за површине веће од 10 m²), из чега следи да паушално поређење по апсолутној вредности треба узети с опрезом у погледу магнитуде. Отуда и закључак — „zaključujemo da su dobijene vrednosti Cp veće po apsolutnoj vrednosti od koeficijenata datih standardom SRPS U.C7.112“ (стр. 180) — вреди читати као налаз о *облику* расподеле, а не као поређење историодних бројева. Ту, међутим, треба бити правичан: суштинска опаска рада — да стандард целе равни третира једнообразно и не описује расподелу при косом ветру — тачна је и независна од магнитуде; управо из ње следи предлог зонирања.

Уз то иду и ограничења валидације која ваља изричито навести. Валидациони објекти разликују се по виткости, па део одступања приписаних турбулентном моделу потиче из геометрије — што ауторка ограђује изричито (стр. 148). При поређењу прорачуна у природној размери с аеротунелским мерењима на умањеним моделима размера и Рејнолдсов број нису разматрани; изостанак је бранљив (за оштроивичне зграде тачке одвајања леже на ивицама, па је Cp практично независан од Рејнолдсовог броја), али га је требало изрећи. Систематско потцењивање заветреног Cp „do tri puta“ доследно је пријављено на свих пет поређења, али без именовања узрока (инхерентно ограничење стационарног RANS-а у вртложном трагу) и без разматрања последица по сисуће притиске. Најзад, оцене за поједине

равни дате су квалитативно, без бројчане мере (изузетно добро слагање за бок и кров), за разлику од наветрене стране где је одступање бројчано исказано. Ниједна од тих примедаба не обара носиви закључак о слагању у облику расподеле, али домет валидације ваља сузити на оно што је стварно измерено.

VIII Носећи елементи зид завесе: теорија I и II реда, имперфекције и бочно-торзионо извијање (поглавље 7)

Други део рада садржински је коректан и носи самосталан инжењерски прилог. Претпоставке МКЕ модела јасно су наведене (фасадно поље 5 × 4 m, комбинације оптерећења, имперфекције, редукција крутости), а теоријски апарат бочно-торзионог извијања преузет је директно из Анекса I стандарда EN 1999-1-1, с интерном провером и с физички очекиваним редоследом отпорности. Из тога следи применљив параметарски налаз о повољности пресека $0{,}2 \le \psi f \le 0{,}8$, поткрепљен сопственом апликацијом која спреже валидирани CSP-3plate са изразима из стандарда.

Једна замерка овде стоји без ублажавања, јер погађа методолошку исправност поступка. Гранично стање употребљивости — угибе — по стандарду EN 1990 треба проверавати у карактеристичној комбинацији (с факторима 1,0) и без имперфекција, а рад ту проверу води на комбинацијама с факторима граничног стања носивости (1,35G + 1,5W), делом уз имперфекције, чиме су угиби осетно већи од меродавних. То није безазлено: управо зато што су угиби с имперфекцијом по стандарду већ били достигнути, рад прелази на редуковане имперфекције L/500 и L/1000 — па неусаглашена комбинација за угибе храни и закључак да је гранично стање употребљивости меродавно и избор редукованих имперфекција: „predlaže se uvođenje početnih imperfekcija u proračun ovih elemenata u opsegu L/500 do L/1000“ (стр. 182). Одступање јесте на страни сигурности (ветар је пројектна вредност из CFD-а), па рад не постаје небезбедан — али корак не одговара стандарду EN 1990 и слику употребљивости чини пренаглашено конзервативном; тај део прорачуна ваља изричито усагласити.

Остале примедбе овог дела лакше су и добро ограђене у самом раду. Приказ L/200 као једне „препоручене“ имперфекције упрошћен је — EN 1993-1-1 (Табела 5.1) даје вредност зависну од криве извијања (од L/350 до L/150), а L/200 одговара кривој c — али је реч о стварној кодној и конзервативној вредности, а осетљивост је проверена варирањем. Поређење по теорији I и II реда даје разлике испод једног процента, што је, кад су нормалне силе у витким стубићима мале (како рад сам утврђује), унапред очекивано: „Proračun vertikalnih nosećih elemenata zid zavese po teoriji I i II reda pokazali su male, skoro beznačajne razlike“ (стр. 181); тежиште закључка стога би боље стајало на налазу да извијање и ефекти II реда нису меродавни, него на самој блискости резултата. Сопствена Excel апликација није у

тексту верификована на познатом еталонском решењу (затворена форма за критични момент, или независни програм за бочно-торзионо извијање), што би учврстило поверење у нумеричке вредности; поверење ипак почива на валидираним компонентама и на физички очекиваном смеру налаза, па је реч о препоруци за јачу верификацију, а не о доказу грешке. Најзад, тврдња о „značajne uštede u materijalu“ изнета је у кондиционалу — „Na ovaj način usvajajući mono-simetrične I preseke ostvarile bi se značajne uštede u materijalu“ (стр. 183) — без упоредног димензионисања маса или цена, па је прецизније означити је као квалитативну назнаку могућности него као бројчано доказан резултат.

IX Једначине, слике, табеле и језик

Апарат величина, ознака и слика место је на коме је рад био најмање брижљив, мада ни ту не у мери која дира садржину; све спорне једначине, слике и табеле проверене су на самим странама рада.

Најсадржајнија примедба ове врсте јесте двоструко значење симбола за вискозност: у једначини (5.6) молекулска (динамичка) вискозност означена је симболом νt и названа „турбулентна“, иако рад тај симбол иначе користи за вртложну вискозност — при чему су сама релација и јединице тачни. Меродаван међународни извор за ознаке величина овде је SI Brochure (BIPM, 2006), који управо због такве колизије препоручује да се исти симбол не користи за две различите величине: „authors may wish to use a symbol of their own choice for a quantity, for example in order to avoid a conflict arising from the use of the same symbol for two different quantities“. Реч је о нотационој неусаглашености, без утицаја на прорачун.

Остале примедбе козметичке су, али их ваља отклонити: једначине улазног профила атмосферског граничног слоја носе у PDF-у ознаке поглавља 6 (6.41–6.45), док их текст позива као 5.41–5.43, где се судара с већ додељеним ознакама SST модела; друга мешовита функција SST модела тачно је у тексту названа F2, а у самој једначини исписана ознаком F1; вредност фон Карманове константе за RNG (0,41 у тексту, ≈0,40 из наведених константи) разликује се у оквиру заокруживања и лежи у опсегу који рад сам наводи као прихватљив. У списковима: слика поглавља 5 погрешно је означена као „Slika 6.30. Koeficijenti pritiska Cp“ (стр. 102); слике 3.2 нема у списку слика иако постоји у тексту, а табеле 4.7 нема у списку табела иако се текст на њу позива; табеле 4.3 и 4.5 носе истоветан наслов и извор (поновљени приказ ради прегледности, који је ваљало изричито означити). Језик је, у целини, стручно уредан; ситне лекторске омашке и недоследна транслитерација презимена спадају у коректуру. Терминолошки, назив динамичка анализа за стационарни (осредњени) RANS може завести — „dinamička analiza dejstva vetra primenom numeričke dinamike fluida daje, za razliku od statičke analize, preciznije uticaje na

fasadu“ (стр. 180) — јер прорачун не даје флуктуирајуће (вршно) дејство; смисао израза (нумеричка динамика флуида наспрам фиксних коефицијената стандарда) бранљив је, али је терминологија непрецизна и вреди је уредити.

X Научни апарат

Списак литературе доследан је у стилу (аутор–година), поклапа се с бројем из реферата (101 наслов), с уредним приписима извора табела и слика и без злоупотребе посредног цитирања; покривеност турбулентне, ветровне и фасадне литературе, уз солидан удео домаћих извора, добра је. То треба рећи пре замерки, јер оне погађају потпуност и уједначеност, а не разумевање.

Најтежа међу њима јесте изостанак двају носећих стандарда за други део рада из самог пописа: EN 1999-1-1:2007 (Еврокод 9), позван више од петнаест пута, и EN 1993-1-1:2005 (Еврокод 3), позван пет пута, доследно су и с тачним издањем навођени у тексту, табелама и једначинама, али недостају као засебне јединице у списку литературе. Реч је о изостанку пописних јединица које су и коришћене и тачно означене, а не о нетачном навођењу — али их ваља унети. Из пописа недостају и извор једначине за угиб стакла (International Building Code 2006), извор класификације пресека (Brookes 2008) и по један извор из групних позива (Žegarac 1995), као и пописна јединица и датум приступа за илустративне интернет изворе (Wikipedia, Smith 2000). Меродаван референт за навођење електронских извора и датум приступа јесте ISO 690:2010.

У попису, обрнуто, стоји и петнаестак јединица које се у тексту нигде не позивају (међу њима оба рада ментора), што није грешка навођења, али умањује функционалну повезаност пописа с текстом. Стварних недостатака прегледности има неколико: исти магистарски рад уписан је двапут (под „Unhale, S.A.“ и под „Sanket A.U.“), каталог произвођача уписан је двапут, а неколико јединица непотпуно је (ANSYS CFD Manual без аутора, године и издавача; шест јединица без године) — што умањује тачан број различитих дела испод номиналних 101 и попис ваља прочистити. Ознака легуре „AW 6082.T5“ на једном месту у закључку (стр. 181), наспрам доследно коришћене AW 6082.T6 на свим меродавним местима, словна је омашка без утицаја на прорачун; исто важи и за текуће заглавље „Literatura“ које стоји на странама закључка. Најзад, веза одељака о бочно-торзионом извијању с ранијим магистарским радом ауторке (Đurić 2002) могла би бити изричито назначена ради јасног разграничења новог доприноса од раније подлоге; сам рад је уредно наведен и позван, па је реч о формалном пропусту.

XI Однос рада и реферата комисије

Реферат комисије оцењује рад као „značajan doprinos u oblasti savremenih, lakih fasadnih konstrukcija“ и издваја унапређење препорука за моделирање дејства ветра и налаз о повољности моносиметричних пресека — оцене које, у делу који се тиче замисли и изведених доприноса, одговарају стању у тексту: препоруке за CFD, зонирање и параметарски налаз о ψf стварно су изведени и употребљиви.

Две ствари, међутим, ваља изрећи ради правичности према тексту. Прво, вредносна оцена да резултати „daju realne osnove za poboljšanja postojećih evropskih standarda o dejstvu vetra“ шира је од изведеног, јер поређење средњих CFD коефицијената с пројектним ковертама стандарда није поређење истоврсних величина; налаз који стварно стоји тиче се облика расподеле при косом ветру, што стандард не описује. Друго, реферат оцењује хипотезе потврђеним — што узето формално стоји, јер их рад проглашава потврђеним — али је полазна хипотеза постављена преопштено да би била строг тест, па потврду носе конкретни налази, а не сама теза. Уз то, реферат не доноси списак објављених радова кандидаткиње, па се тај део подобности из грађе не може проверити (потврђује се само коауторство Savić и др. 2013 и магистарски рад Đurić 2002). Проверљиве бројчане оцене реферата — 190 страна нумерисаног текста, 147 слика, 42 табеле, 101 наслов — поклапају се са стањем у раду. Ситне разлике у називу поглавља 6 и у приписивању препорука (реферат наводи „COST 14 (Franke 2004)“ и „AIJ (Tominaga 2008)“, а закључак рада „Franke i dr 2007, AIJ 2005“) наводе се само као напомена.

XII Шта остаје

Кад се све сабере, добија се оцена коју вреди изрећи у једном комаду, без ублажавања и без претеривања.

Дисертација Данијеле Ђурић-Мијовић солидан је и амбициозан рад који домаћем пројектовању лаких фасада доноси на једном месту обиман и уредно документован CFD оглед дејства ветра на високу зграду под четири угла налета, широку валидацију с пет независних скупова података, употребљиве препоруке за формирање CFD модела и пројектантски применљив предлог зонирања фасадних равни, а уз то и самосталан стабилносни прилог — сопствену апликацију по Еврокоду 9 за алуминијум и параметарски налаз о повољности моносиметричних пресека. Тамо где се основа рада могла сравнити с изворним стандардима и уџбеничком грађом, у највећем делу држи, а рад на више места сам, без принуде, издваја оно што му не иде у прилог — што је знак поштеног извештавања и појачава веродостојност целине.

Слабости су, по оцени овог осврта, четвороструке, и ниједна не руши носеће доприносе. Прва и најозбиљнија тиче се управо величине коју рад проглашава меродавном: вршни сисући коефицијенти притиска на угловима и уз кров, меродавни за причвршћење облоге, нису достигли мрежну независност (најизразитије код групе D), а формалне процене нумеричке несигурности (Ричардсон/GCI) нема — па квантитативне препоруке за вршно сисање треба узети с том оградом, коју рад делом и сам наводи. Друга је природа метода и поређења: стационарни RANS даје средње Cp, који се терминолошки називају динамичком анализом и упоређују с пројектним ковертама стандарда као да су истоврсни — што важи за облик расподеле, али не и без ограде за магнитуде. Трећа је домет закључака: препоруке за формирање CFD модела изведене су на једном односу димензија, једној категорији терена и, за групу D, другом турбулентном моделу, па их је најбоље читати као полазну смерницу за изоловане високе зграде сличних пропорција, а не као универзални пропис. Четврта је научни апарат: изостанак двају носећих Еврокода из самог пописа, непотпуне и двоструке јединице, и изостанак датума приступа код интернет извора. У другом делу, засебно, стоји и методолошки неусаглашена провера граничног стања употребљивости на комбинацијама граничног стања носивости.

Изнад свега тога стоји једна правилност коју вреди именовати: рад је, по правилу, брижљивији у мерењу и у извештавању о ономе што не иде у прилог него у завршним оценама и уопштавањима. Управо зато највећи део онога што треба поправити већ је негде у раду тачно урађено или поштено ограђено — само на закључном месту изражено шире него што грађа носи.

Неколико измена биле би, по оцени овог осврта, најплодније у евентуалном монографском издању или наставку истраживања, и највећим делом не траже ново истраживање него доследно спровођење онога што је рад већ започео. Прво, уз процентуална одступања суседних мрежа приложити формалну процену дискретизационе грешке (Ричардсонова екстраполација / GCI, у складу с COST 732 и Celik и др. 2008), посебно тамо где Cp пролази кроз нулу или не излази на плато, и изричито означити да вршна сисућа оптерећења нису конвергирала. Друго, за вршна флуктуирајућа оптерећења меродавна за облогу назначити границе стационарног RANS-а и, где је то могуће, допунити их нестационарним моделирањем, а поређење са стандардним коефицијентима водити с усаглашеним референтним притиском и висином и уз јасно раздвајање средњих од пројектних вредности. Треће, општост препорука ојачати студијом варијације виткости, храпавости терена и Рејнолдсовог броја. Четврто, у другом делу проверу угиба усагласити с EN 1990 (карактеристична комбинација, без имперфекција), приложити контролни прорачун сопствене апликације на познатом еталонском решењу и бројчано поткрепити тврдњу о уштедама. Пето, употпунити и прочистити попис литературе (унети EN 1999-1-1:2007 и EN 1993-1-1:2005 и остале коришћене

изворе, објединити двоструке јединице, додати датуме приступа), ускладити приказ актуелне регулативе за зид завесе са стањем на дан предаје (EN уместо prEN, тачан опис EN 13501-2, важећа акустичка издања) и исправити нумеричку омашку о коефицијенту топлотног ширења. Уз ту врсту редакције, дисертација остаје вредан и употребљив допринос, чије би препоруке за моделирање и параметарски налаз о избору пресека имали шта да кажу и стручном читаоцу и пројектантској пракси изван уже теме.

Литература

Предмет осврта

Ђурић-Мијовић, Данијела З., *Arhitektonsko-konstrukcijski dizajn fasadnih sistema od čelika i aluminijuma* [докторска дисертација]. Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, 2016. (НаРДуС, https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/8287.)

Реферат Комисије о прегледу и оцени докторске дисертације мр Данијеле Ђурић-Мијовић, Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу, Ниш, јул 2016.

CFD у инжењерству ветра: добра пракса, верификација и валидација

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. (eds.), *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*, COST Action 732, Meteorological Institute, University of Hamburg, 2007. ISBN 3-00-018312-4.

Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A. G., et al., „Recommendations on the use of CFD in wind engineering“, y: van Beeck, J. P. A. J. (ed.), *Proc. Int. Conf. on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics (COST Action C14)*, von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, 2004.

Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T., „AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings“, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (10–11), 2008, 1749–1761. DOI 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., Raad, P. E., „Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications“, *Journal of Fluids Engineering* 130 (7), 2008, 078001. DOI 10.1115/1.2960953.

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., „CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems“, *Atmospheric Environment* 41 (2), 2007, 238–252. DOI 10.1016/j.atmosenv.2006.08.019.

Ferziger, J. H., Perić, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed., Springer, Berlin, 2002.

Дејство ветра на зграде

EN 1991-1-4:2005+A1:2010, *Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-4: General actions — Wind actions*, CEN, Brussels.

SRPS EN 1991-1-4:2012, Институт за стандардизацију Србије, Београд (усваја EN 1991-1-4:2005+A1:2010+AC:2010).

SRPS U.C7.110–113:1992 (истоветни JUS U.C7.110–113:1991), Институт за стандардизацију Србије (повучени 29.11.2012).

Зид завесе: производни и перформансни стандарди

EN 13119:2007, *Curtain walling — Terminology*, CEN.

EN 14019:2004, *Curtain walling — Impact resistance — Performance requirements*, CEN.

EN 13947:2006, *Thermal performance of curtain walling — Calculation of thermal transmittance*, CEN (замењен EN ISO 12631:2012).

EN ISO 12631:2012, *Thermal performance of curtain walling — Calculation of thermal transmittance*, CEN/ISO.

EN 13501-2:2007+A1:2009, *Fire classification of construction products and building elements — Part 2: Classification using data from fire resistance tests*, CEN.

Основе пројектовања и стабилност

EN 1990:2002+A1:2005, *Eurocode — Basis of structural design*, CEN, Brussels.

EN 1993-1-1:2005, *Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN.

EN 1999-1-1:2007+A1:2009+A2:2013, *Eurocode 9: Design of aluminium structures — Part 1-1: General structural rules*, CEN.

Величине, ознаке и научни апарат

Bureau International des Poids et Mesures, *The International System of Units (SI)*, 8th ed., BIPM, Sèvres, 2006.

ISO 690:2010, *Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*, ISO, Geneva.