





# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;

spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, marec 2019, letnik 68, str. 53-88

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik

**Dušan Jukič**

**prof. dr. Matjaž Mikoš**

IZS MSG: **Gorazd Humar**

**Ana Brunčič**

**dr. Branko Zadnik**

UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**

UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Romana Hudin**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**500 tiskanih izvodov**

**3000 naročnikov elektronske verzije**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>.

Letno izide 12 števil. Letna naročina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojene 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana: SI56 0201 7001 5398 955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

## Članki • Papers

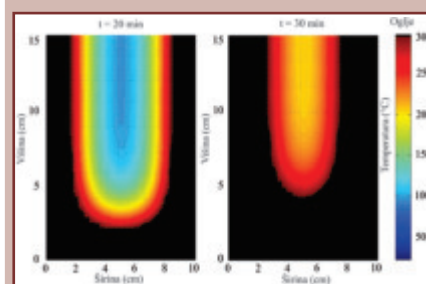
stran **54**

dr. Alexey Shakhvorostov, inženjer stroitelj  
**KONSTRUKCIJA NEBOTIČNIKA LAKHTA CENTER  
V SANKT PETERBURGU, RUSIJA**  
STRUCTURE OF THE SKYSCRAPER LAKHTA CENTER  
IN SAINT-PETERSBURG, RUSSIA



stran **78**

izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.  
**TEMPERATURNO-VLAŽNOSTNA POŽARNA ANALIZA  
LESENIH PREČNIH PREREZOV Z UPOŠTEVANJEM OGLENENJA**  
TEMPERATURE-MOISTURE FIRE ANALYSIS OF TIMBER  
CROSS-SECTIONS EXPOSED TO FIRE



## Poročila s strokovnih srečanj

stran **86**

mag. Smiljan JUVAN, univ. dipl. inž. grad.  
**29. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2018**



stran **88**

doc. dr. Andrej Tibaut, univ. dipl. inž. rač. in inf.  
**SIBIM 2018 »DOBRODOŠLA PRIHODNOST«**



## Novi diplomanti

Eva Okorn

## Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Logistični center LIDL v Arji vasi, foto Toni Klemenčič

# KONSTRUKCIJA NEBOTIČNIKA LAKHTA CENTER V SANKT PETERBURGU, RUSIJA

## STRUCTURE OF THE SKYSCRAPER LAKHTA CENTER IN SAINT-PETERSBURG, RUSSIA

dr. Alexey Shakhvorostov, inženjer stroitelj

a.shakhvorostov@inforceproject.ru  
Inforceprojekt, d. o. o.,  
Vurnikova 2, 1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK 624.014.2:69.032.22(470+571)

**Povzetek** | Članek opisuje konstrukcijo najvišje stolpnice v Evropi, nebotičnika Lakhta Center, višine 462 metrov. V tej stolpnici so poslovni prostori sedeža ruske družbe Gazprom. Začeli so jo graditi oktobra 2012, dokončana pa je bila leta 2018.

Ključne besede: nebotičnik, armiranobetonske konstrukcije, jeklene konstrukcije, sovprežne konstrukcije iz jekla in betona.

**Summary** | The paper describes the structures of the highest building in Europe – 462 meter high skyscraper Lakhta Center. The building is the headquarters of the company Gazprom. The Lakhta Center construction began in October 2012 and finished in 2018.

Key words: reinforced concrete structures, steel structures, composite steel and concrete structures.

### 1 • UVOD

#### 1.1 Opis objekta

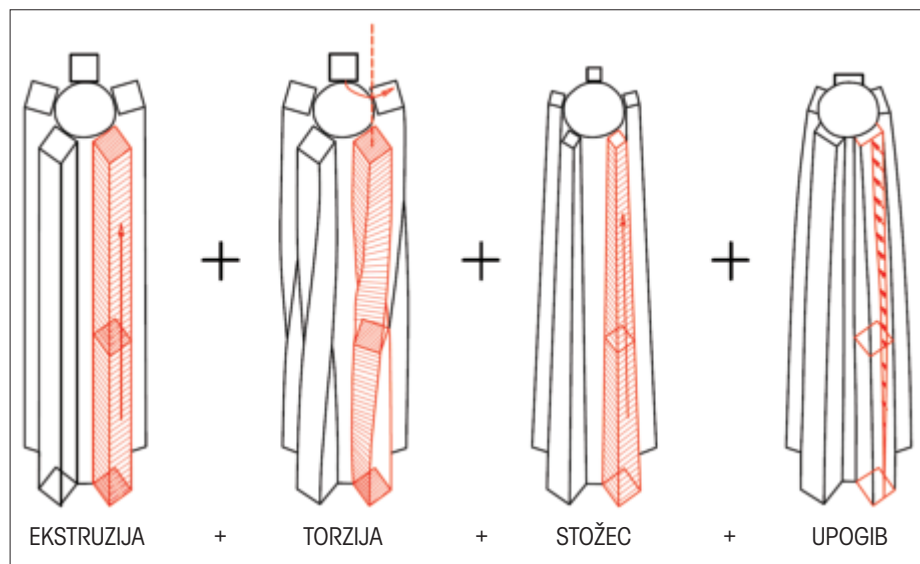
Nebotičnik Lakhta Center je predviden za glavni sedež ruske družbe Gazprom, največjega proizvajalca zemeljskega plina. Zgradba, visoka 462 m, je v mestu Sankt Peterburg neposredno ob Finskem zalivu in je najvišja v Evropi. Lakhta Center ima 86 nadzemnih in 3 podzemne etaže. Na nivoju zgornje, 86. etaže je razgledna ploščad. Na vsakih 16 etaž sta predvideni po dve tehnični etaži, kjer so poleg instalacijske opreme montirane sovprežne prečne ojačitve konstrukcije (angl. outriggers), ki izboljšajo togost celotne zgradbe. Zato se te tehnične etaže imenujejo tudi »outrigger« etaže. Skupaj so v stolpnici štiri »outrigger« nivoji, ki so na 17. in 18., 33. in 34., 49. in 50. ter 65. in 66. »outrigger« (tehnični) etaži. V preostalih etažah so poslovni pro-stori družbe Gazprom.

Geometrijo stolpnice kaže slika 1. Deli stolpnice se sukajo okrog središča v konični vrh. Medetažne plošče imajo obliko petih kvadratnih cvetnih lističev, ki

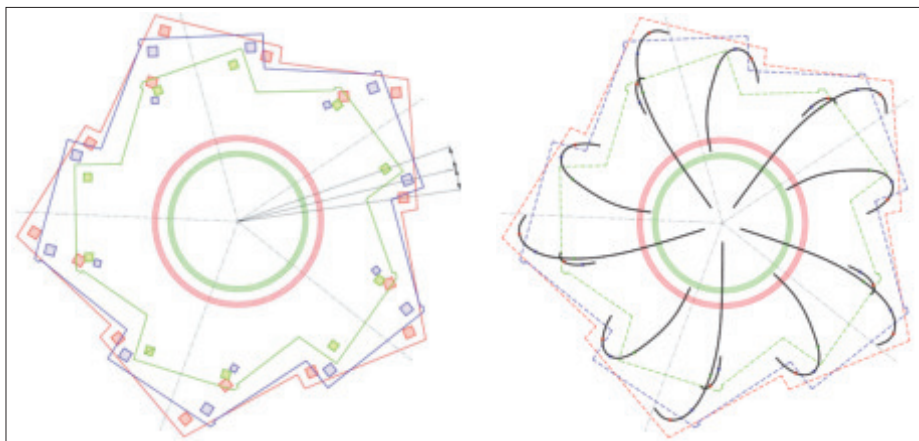
jih povezuje okroglo osrednje jedro. Z naraščanjem višine se »lističi« vrtijo okrog svoje osi v nasprotni smeri urnega kazalca. Poleg tega z naraščanjem višine ti

»lističi« postanejo manjši, njihovo središče pa se premika proti osi okroglega jedra stavbe.

Na nivoju 1. etaže je nadzemni del stolpnice umeščen v peterokotnik z dolžino stranice 35,2 m med osmi stebrov. Od 1. do 16. etaže se gabariti vsake naslednje



Slika 1 • Geometrijska shema stolpnice.



Slika 2 • Tlorisna dispozicija 19., 39. in 59. etaže.

etaže nadzemnega dela povečujejo, od 16. etaže navzgor pa se zmanjšujejo (slika 2).

### 1.2 Zgodovina projekta

Zgodovina projekta sega v konec leta 2006, ko je britanski arhitekturni biro RMJM London Limited zmagal na arhitekturnem natečaju za projektiranje nebotičnika glavnega sedeža družbe Gazprom v

urbanem okolju mesta Sankt Peterburg blizu zgodovinskega središča. Leta 2008 je konstruktorski biro Inforceproject zmagal na natečaju za projektiranje gradbenih konstrukcij stolpnice, ki se je takrat imenovala Okhta Center (slika 3). Leta 2011 je bil projekt nebotičnika, ki je bil takrat že v veliki meri pripravljen, preklican zaradi ostrih kritik javnosti mesta Sankt Peters-

burg zaradi neskladnosti z arhitekturo zgodovinskega središča mesta. V istem letu (2011) so začeli izdelovati projektno dokumentacijo za stolpnico za novi lokaciji, na obali Finskega zaliva Baltskega morja. Kompleks je bil imenovan Lakhta Center (slika 4). Čeprav se je vizualno stolpnica le zanemarljivo spremenila, so se njeni tlorisni gabariti povečali za 10 %, višina pa se je povečala za 66 metrov, s 396 m na 462 m (slika 5). Zadnja pomembna sprememba projekta nebotičnika Lakhta Center je bila v obdobju 2014–2015, ko je naročnik v imenu hčerinske družbe Gazprom povabil k sodelovanju pri projektu družbo Samsung C&T.



Slika 3 • Prikaz kompleksa Okhta Center.



Slika 4 • Prikaz kompleksa Lakhta Center.



Slika 5 • Lokaciji stolpnic Okhta Centra in Lakhta Centra na zemljevidu Sankt Peterburga.

### 1.3 Udeleženci projekta

Objekt:

**Lakhta Center, Sankt Peterburg**

Investitor:

**Gazprom**

Arhitektura:

**RMJM, Gorproject**

Konstrukcija:

**Inforceproject, Gorproject**

Projektno vodenje:

**AECOM, SamsungC&T**

Glavni izvajalec:

**Renaissance Construction**



Slika 6 • Udeleženci projekta na gradbišču Lakhta Center.

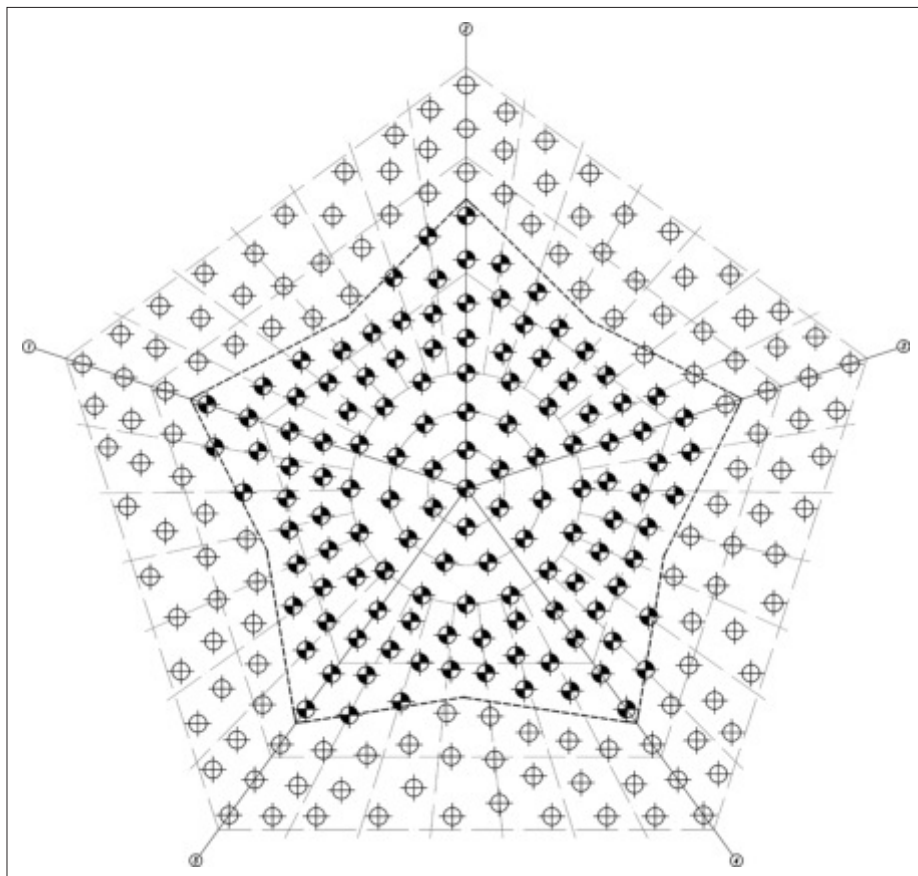
## 2 • KONSTRUKCIJA NEBOTIČNIKA LAKHTA CENTER

### 2.1 Konstrukcija temeljev

Projekt nebotičnika Lakhta Center je od projektantov zahteval rešitve številnih zapletenih inženjerskih nalog. Ena od njih je bila projektiranje konstrukcije temeljev (Shakhvorostov, 2016). Značilnost gradbene parcele Lakhta Center je

bila prisotnost glinastih tal z nizko nosilnostjo, debelina plasti teh glinastih tal pa je znašala ca. 20 m. Šele na globini, večji od 20 m, se je pričnela trda glina, ki je bila uporabljena kot nosilna osnova za stolpnico, skalnata tla iz peščenjakov pa so se pričnela na globini približno 100 m.

Temeljenje s piloti obsega 264 uvrtnih pilotov premera 2000 mm ter dolžine 55 m in 65 m, postavljenih v medsebojnem razmiku 4 do 6 metrov oziroma od 2 do 3 premere pilotov (slika 7). Ker se je vrtnje vrtin za uvrtno pilote pričelo na površini terena, ne pa z dna gradbene jame, je dejanska globina vrtin za namestitvev pilotov znašala 72 m in 82 m (slika 8). Ocenjena nosilnost pilotov dolžine 55 metrov je znašala 36.000 kN v skladu s



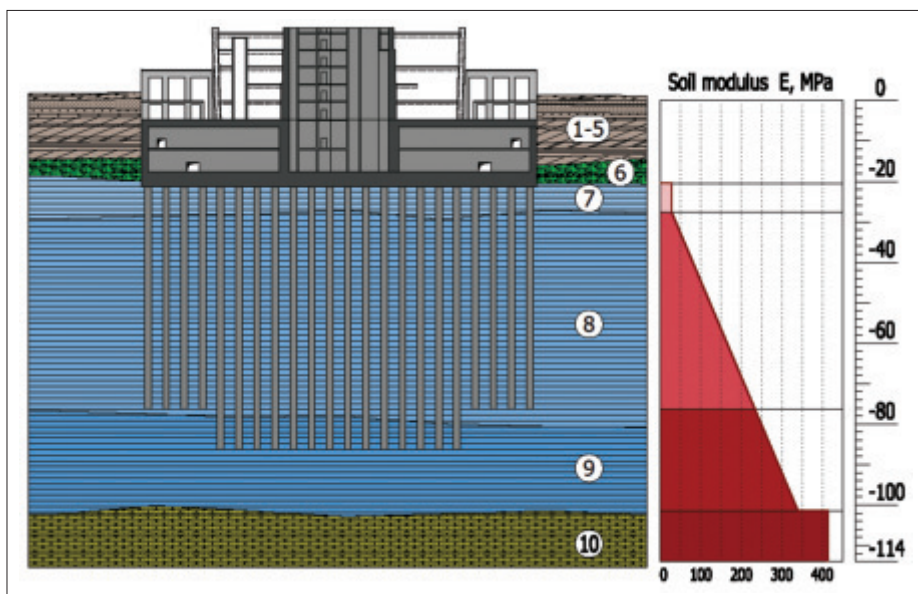
● Piloti dolžine 65 metrov, merjeno od dna gradbene jame

⊕ Piloti dolžine 55 metrov, merjeno od dna gradbene jame

Slika 7 • Shema namestitve pilotov stolpnice Lakhta Center.

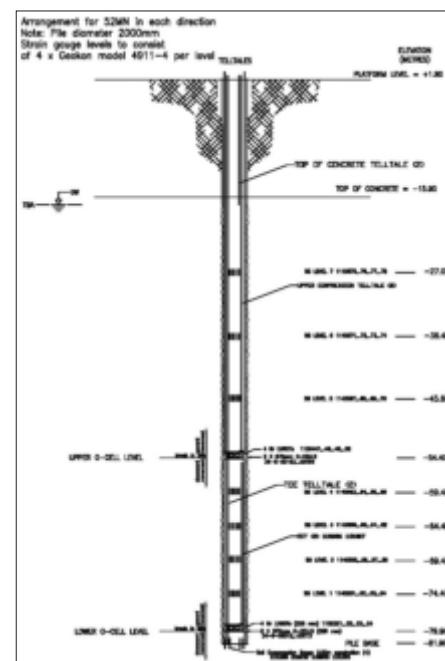
standardi in 64.000 kN po rezultatih preizkusa z metodo O-cell (angl. Osterberg Cell test), ocenjena nosilnost pilotov dolžine 65 metrov

pa 43.000 kN v skladu s standardi in 77.000 kN po rezultatih preizkusa z metodo O-cell (slike 9 do 11).



Slika 8 • Prerez pilotnega temelja stolpnice Lakhta Center.

Teža stolpnice pri karakterističnih obtežbah (unfactored load) znaša 4.930.000 kN vključno s škatlkastim temeljem. Pretežni del teh obtežb (ca. 70 %) je deloval na majhen del tlorisa premera 26 m oziroma 530 m<sup>2</sup>, ki je omejen z okroglim osrednjim jedrom stolpnice. V tem delu je tlak pod spodnjim delom temelja znašal 6500 kPa. Ker ni bilo mogoče prenesti tako velike obtežbe neposredno na temeljna tla, je bilo treba porazdeliti ta tlak po obrobju stolpnice. Prvotni izračuni za določitev potrebne debeline temeljne plošče (brez škatlastega temelja) so pokazali, da z vidika enakomernosti posedanja običajna temeljna plošča, celo debeline 7–8 m, ne zadostuje. Posedki pod jedrom stolpnice so znašali ca. 180 mm, po obodu stolpnice pa ca. 60 mm. Prvi korak pri reševanju tega problema je bil prenos obtežb z osrednjega dela na obrobje stolpnice s pomočjo povezovalnih togostnih diafragem. Drugi logični korak je bila zgornja



Slika 9 • Prerez testa Osterberg Cell.

plošča, ki je povezala celotni sistem v enotni škatlasti temelj in zagotovila bolj ekonomično rešitev. Izračuni so pokazali, da ima tak temelj večjo togost (razlika med posedki v coni jedra in po obrobju stolpnice ne presega 25–30 mm) ter uspešno razbremeno jedro stolpnice premera 26 m, tako da prenese in enakomerno porazdeli obremenitve z jedra na enakostranični peterokotnik podzemnega dela stolpnice (dolžina stranice 57,5 m). Po izvedbi vseh ukrepov je povprečni tlak pod temeljem stolpnice pri normativnih obtežbah znašal 870 kPa.



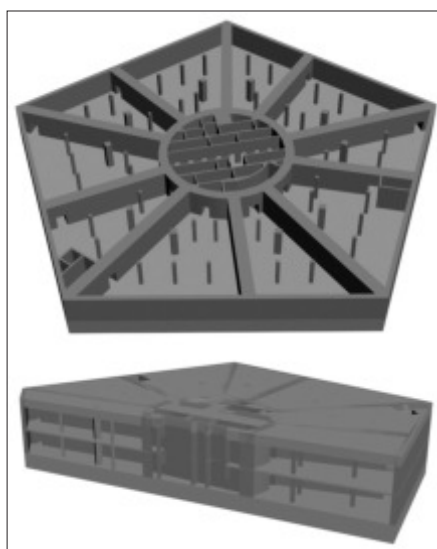
Slika 10 • Testni pilot Osterberg Cell.



Slika 11 • Test dvigalke Osterberg Cell.

Končno je bil za projekt nebotičnika Lakhta Center potrjen škatlasti temelj (slika 12). Spodnja temeljna plošča, ki je na relativni koti -17,650 m, ima debelino 3600 mm, zgornja temeljna plošča, ki je na relativni koti -4.650 m, pa ima debelino 2000 mm. Skupno delovanje spodnje in zgornje plošče škatlatega temelja zagotavlja 10 povezovalnih togostnih diafragm debeline 2500 mm, ki potekajo od jedra stolpnice v radialni smeri. V škatlitem temelju je bil uporabljen beton razreda C50/60 z dodatnimi zahtevami za vodoneprepustnost, krčenje in sproščanje hidrationske toplote.

Zapletena vprašanja so se pojavljala tudi pri gradnji škatlatega temelja. Zaradi visokih napetosti, peterokotne oblike temelja in drugih značilnosti stolpnice je bilo potrebno neprekinjeno betoniranje spodnje plošče debeline 3600 mm za škatlasti temelj v količini skoraj



Slika 12 • Konstrukcija škatlatega temelja stolpnice, 3D-pogled.

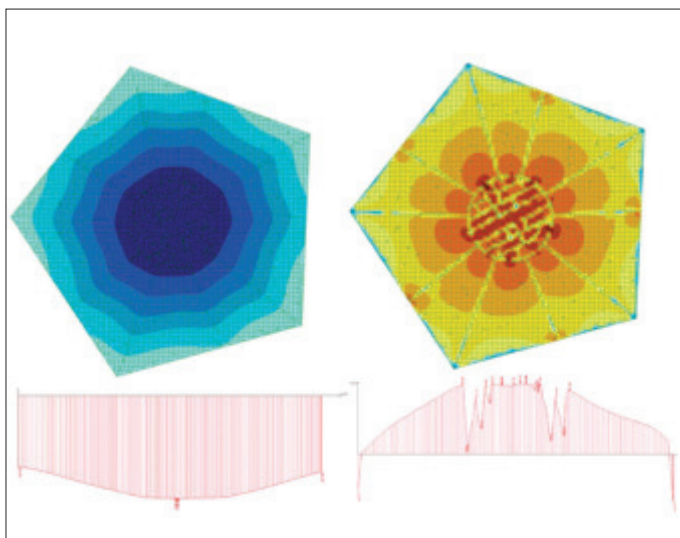
20.000 m<sup>3</sup> betona, kar je bil takrat svetovni rekord, ki je bil vpisan v Guinnessovo knjigo rekordov. V sredini avgusta 2015 je bila gradnja škatlatega temelja zaključena.

Na slikah 13 do 17 so prikazani upogibki in napetosti škatlatega temelja.

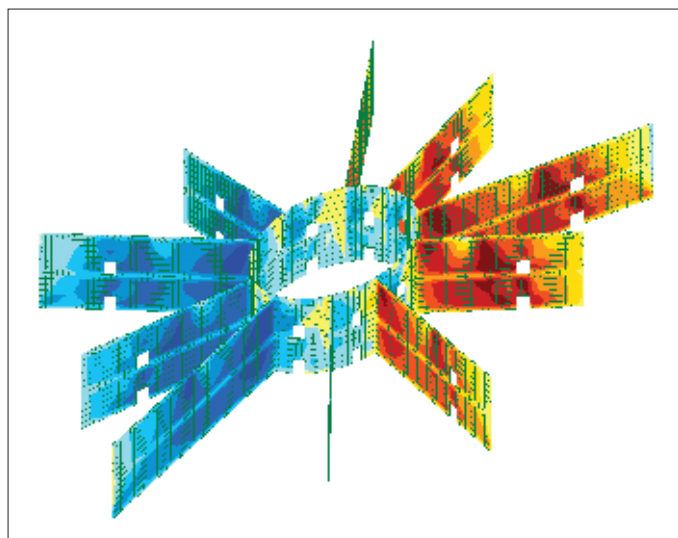
## 2.2 Konstrukcija nadzemnega dela stolpnice

Glavno nosilno konstrukcijo stolpnice tvori osrednje armiranobetonsko jedro skupaj z 10 sovprežnimi stebri po obodu stolpnice. Za zmanjševanje razpona med stebri je predvidenih še 5 sovprežnih stebrov do nivoja 56. etaže. Dodatno togost zgradbe in odpornost pred progresivno porušitvijo zagotavljajo dvoetažne prečne ojačitve konstrukcije (*angl.* outriggers) na vsakih 16 etaž po višini zgradbe (slika 18).

Geometrija konstrukcije nebotičnika je zvita okoli navpične osi. Trenutno je na svetu deset

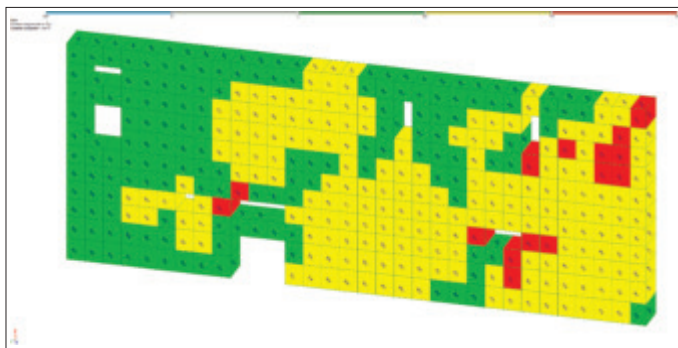


Slika 13 • Upogibki in natezne napetosti v spodnji plošči škatlatega temelja.

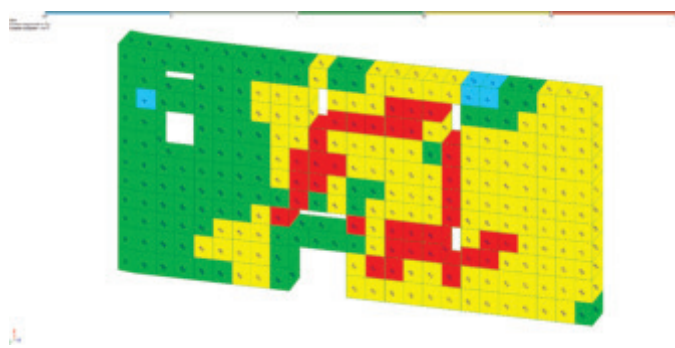


Slika 14 • Strižne napetosti v radialnih stenah škatlatega temelja.

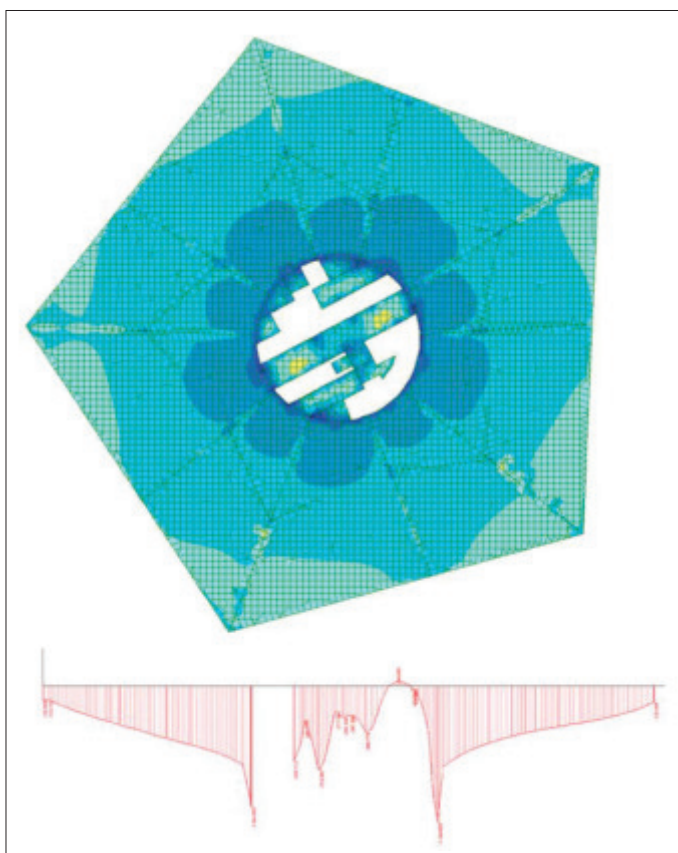




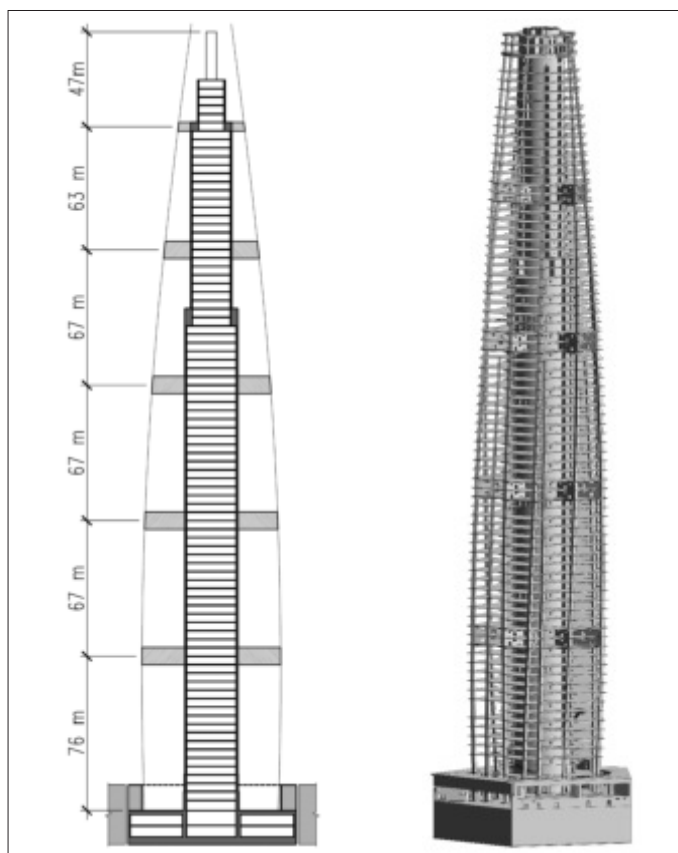
Slika 15 • Strižne napetosti v daljši radialni steni škaflastega temelja (končni 3D-elementi).



Slika 16 • Strižne napetosti v krajši radialni steni škaflastega temelja (končni 3D-elementi).



Slika 17 • Tlačne napetosti v zgornji plošči škaflastega temelja.



Slika 18 • Shema razporeditve prečnih ojačitev in 3D-pogled konstrukcije stolpnice Lakhta Center.

stavb s tako konstrukcijo, višjih od dvesto metrov (slika 19) (CTBUH, 2019).

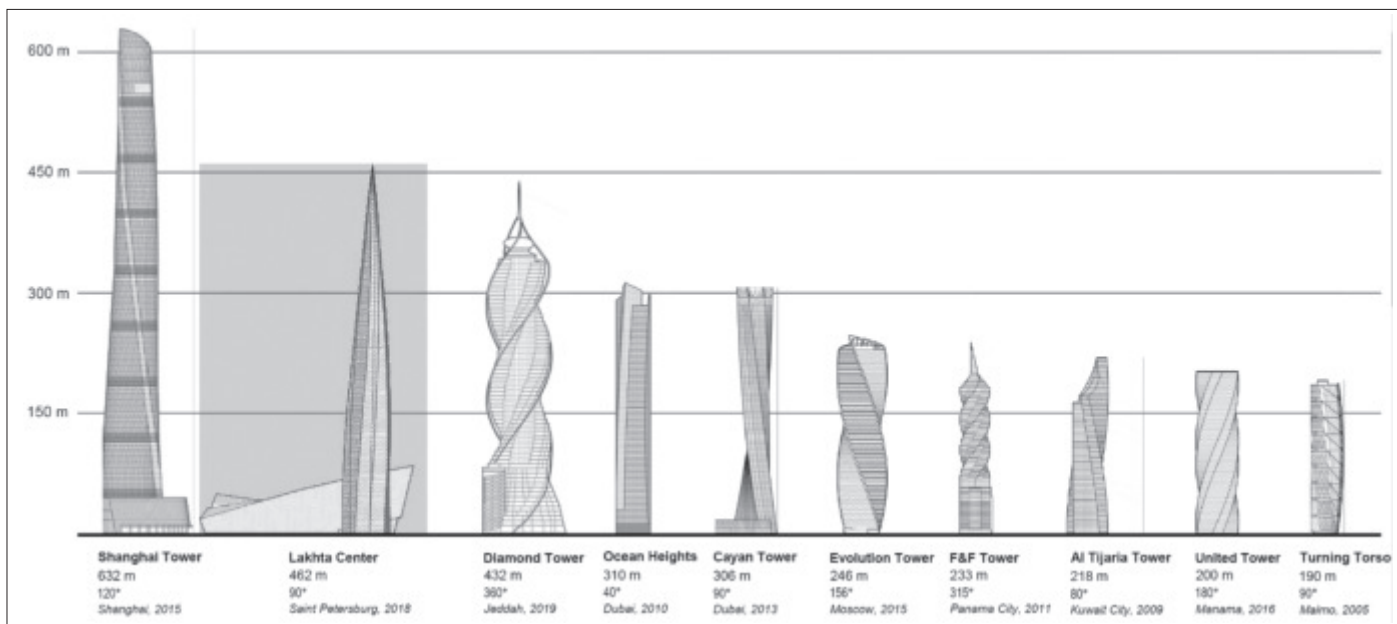
Najvišja med njimi je Shanghai Tower. Toda zvito obliko ima le fasada te stavbe, nosilna konstrukcija pa ne. Lakhta Center je tako najvišja stavba, pri kateri je zvita ne le fasada, ampak tudi konstrukcija.

Zvitost konstrukcije je konstantna po višini, in oblika stavbe je zato spiralna. Stebri na obodu stavbe so nagnjeni v radialni in tangencialni smeri (slika 20). Zaradi tega nastanejo vodoravne sile, ki se prenašajo na jedro preko medetažnih plošč. Za prevzem torzijske obre-

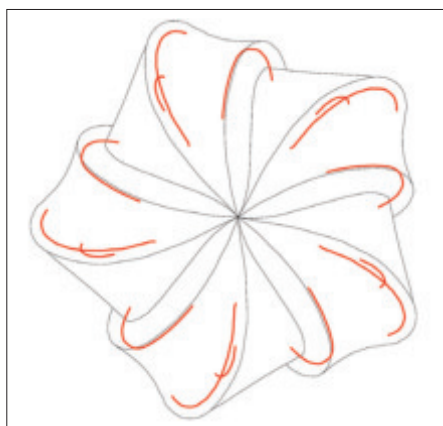
menitve je bila izbrana okrogla oblika preseka jedra nebotičnika. Takšna rešitev v največji meri izpolnjuje zahteve za to vrsto sile, saj je okrogla oblika preseka jedra najbolj učinkovita za torzijo.

Značilnost konstrukcije so tudi prečne ojačitve konstrukcije (angl. outrigger structures). Nosilno konstrukcijo nebotičnika tvori osrednje armiranobetonsko jedro skupaj s sovprežnimi stebri in nosilci. Togost in stabilnost konstrukcije sta zagotovljeni z osrednjim jedrom in 10 sovprežnimi stebri, ki so razporejeni po obodu stolpnice. Na nivojih 17.–18., 33.–34.,

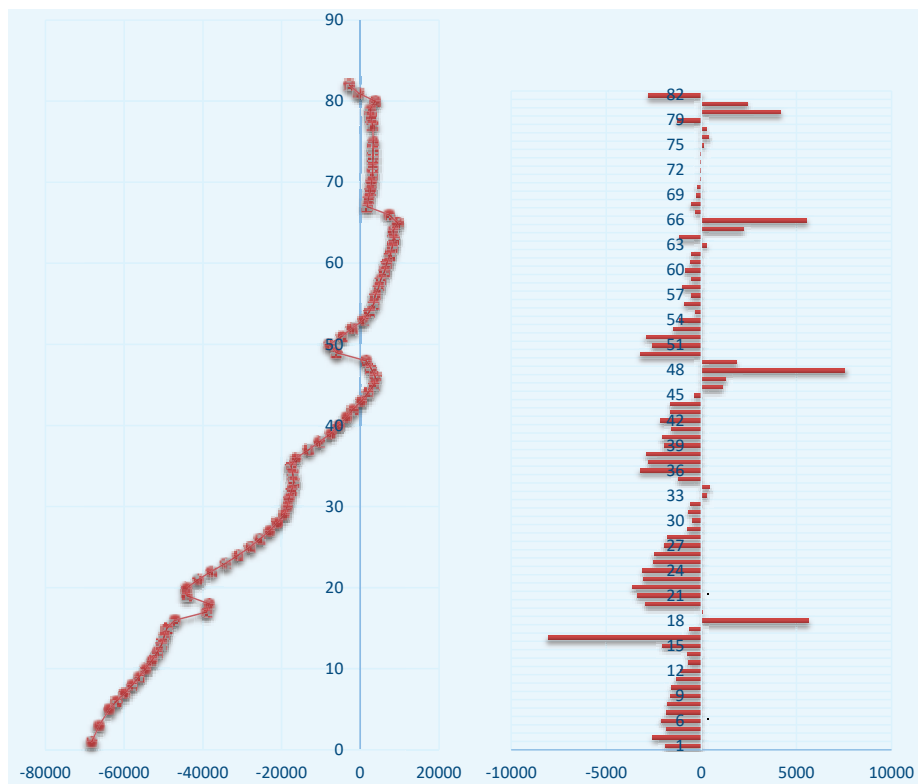
49.–50., 65.–66. etaže je armiranobetonsko jedro povezano s stebri s prečnimi ojačitvami. Vse naštetje etaže so tehnične etaže. Medetažna plošča nad 80. etažo igra tudi vlogo zgornje prečne ojačitve konstrukcije stolpnice. Osrednje armiranobetonsko jedro je osnovni element, ki zagotavlja prevzem horizontalnih obtežb. Toda zaradi razmerja med premerom jedra in višino stolpnice, ki znaša 1 : 17, togost jedra ni zadoščala normativnim zahtevam za horizontalne pomike vrha stavbe in največji dovoljeni pospešek zgornjih etaž, ki je bil pogoj za udobno bi-



Slika 19 • Najvišje zvite stavbe na svetu.



Slika 20 • Toris osi stebrov, ki so nagnjeni v radialni in tangencialni smeri.



Slika 21 • Torzijski moment v jedru (v 10 kNm) in torzijski momenti po etažah (v 10 kNm).

vanje v zgornjih etažah. Za to vrsto ojačitve so se konstruktorji odločili po temeljitem razmisleku (slika 22).

Izvedba konstrukcije s prečnimi ojačitvami je omogočila zmanjšati horizontalne pomike vrha nebotičnika, ki jih povzročata obtežba vetra, in tako zagotoviti udobno bivanje v zgornjih etažah stolpnice.

Razlika med pomiki konstrukcije v primeru polne obtežbe vetra je zelo velika. Za konstrukcijo brez prečnikov znaša 521 mm, s prečniki na petih nivojih pa 313 mm (slika 23). Pomik je bil izračunan v 81. etaži.

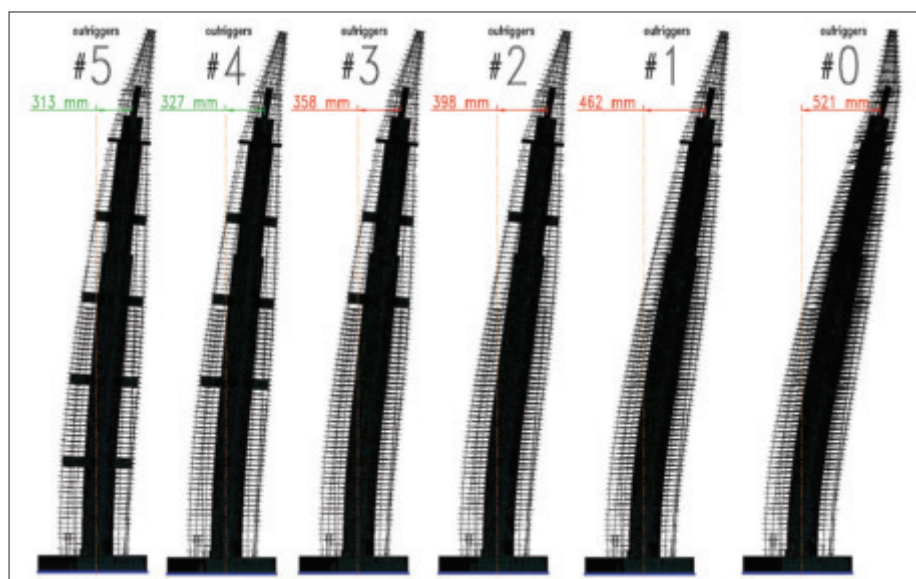
Za kriterij udobja bivanja v zgornjih etažah je bila uporabljena omejitev vodoravnega pospeška. Naročnik je predpisal, da ne sme

preseči 0,08 m/sec<sup>2</sup>. Brez prečnikov tega pogoja ni bilo mogoče izpolniti. S prečniki pa je vrednost pospeškov 0,049 m/sec<sup>2</sup>.

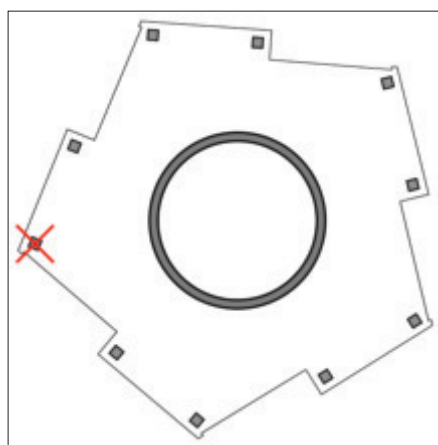
Naročnik projekta Lakhta Tower je postavil tudi zahtevo, da mora imeti konstrukcija visok nivo robustnosti in veliko odpornost proti progresivni porušitvi. Tudi temu pogoju je bilo ustrezno z uporabo prečnikov na 5 nivojih.



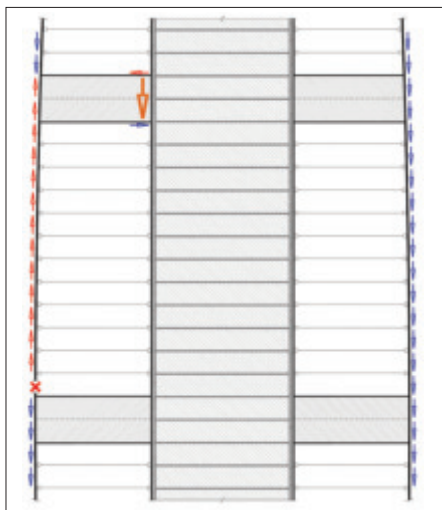
Slika 22 • Inženirji konstruktorji, avtorji projekta nebotičnika Lakhta Tower, med razpravo o ojačitvi konstrukcije s prečniki. Z leve proti desni: Alexander Timofeevich, Inforceproject; dr. Alexey Shakhvorostov, Inforceproject; dr. Vladimir Travush, Gorproject; Ahmad Abdelrazaq, Samsung C&T, december 2014.



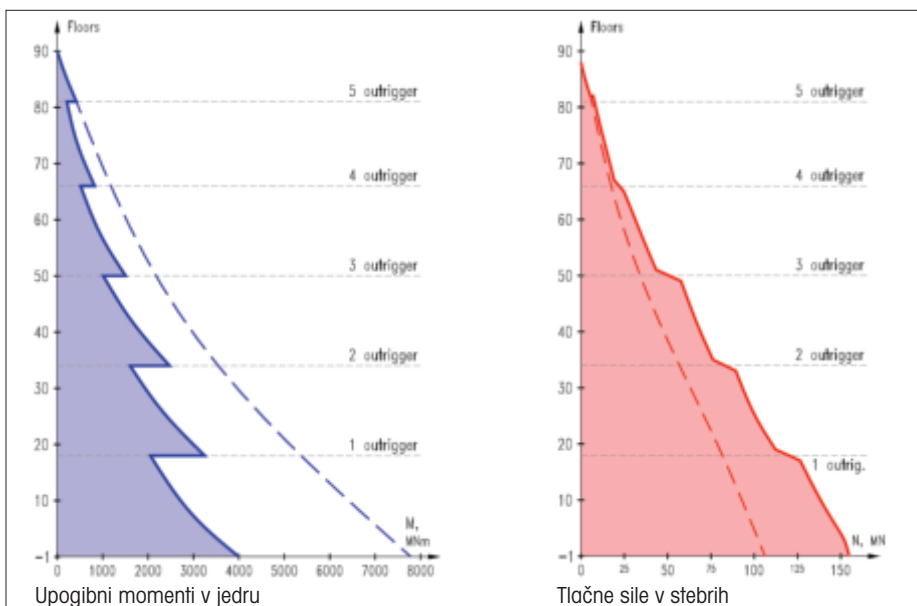
Slika 23 • Horizontalni pomik zgornje etaže v odvisnosti od števila prečnikov.



Slika 24 • Prikaz odstranjenega stebra v tlorisu.



Slika 25 • Prikaz posledic odstranjenega stebra v narisu.



Slika 26 • Vpliv prečnih na upogibne momente v jedru in osne sile v stebrih.



Slika 27 • Jekleno paličje v prečnih.

Delovanje prečnih v primeru odstranitve enega stebra v florisu (slika 24) in narisu (slika 25) je opisano v nadaljevanju.

V stebrih nad odstranjenim stebrom se pojavi nateg in obtežba se prenese v zgornji prečni. Zato so vsi stiki stebrov projektirani tako, da prenesejo morebitni nateg v takem primeru. Konstrukcija je varna pred progresivno porušitvijo celo v primeru, če bi bili odstranjeni vsi obodni stebri.

Pri obtežbi z vetrom prečni zmanjšajo upogibni moment v jedru in povečajo tlačno silo v stebrih za 20 do 30 % (slika 26).

Prečni so betonski sovprežni nosilci, visoki dve tehnični etaži. Podprti so z jedrom in obodnimi stebri. Debeli so 1200 mm, vanje pa je vstavljeno jekleno paličje (slika 27).

Zgornji in spodnji pasovi prečnih so na stiku z jedrom povezani z dvema krožnima nosilcema (slika 28). Prečni prerez prečnih je oblike črke I (slika 29).

Skupaj s stropnimi ploščami sestavljajo prečni ki toge škatlaste konstrukcije, ki zagotavljajo sodelovanje jedra in stebrov pri obtežbi vetra in preprečujejo progresivno porušitev konstrukcije nebotičnika (slika 30).

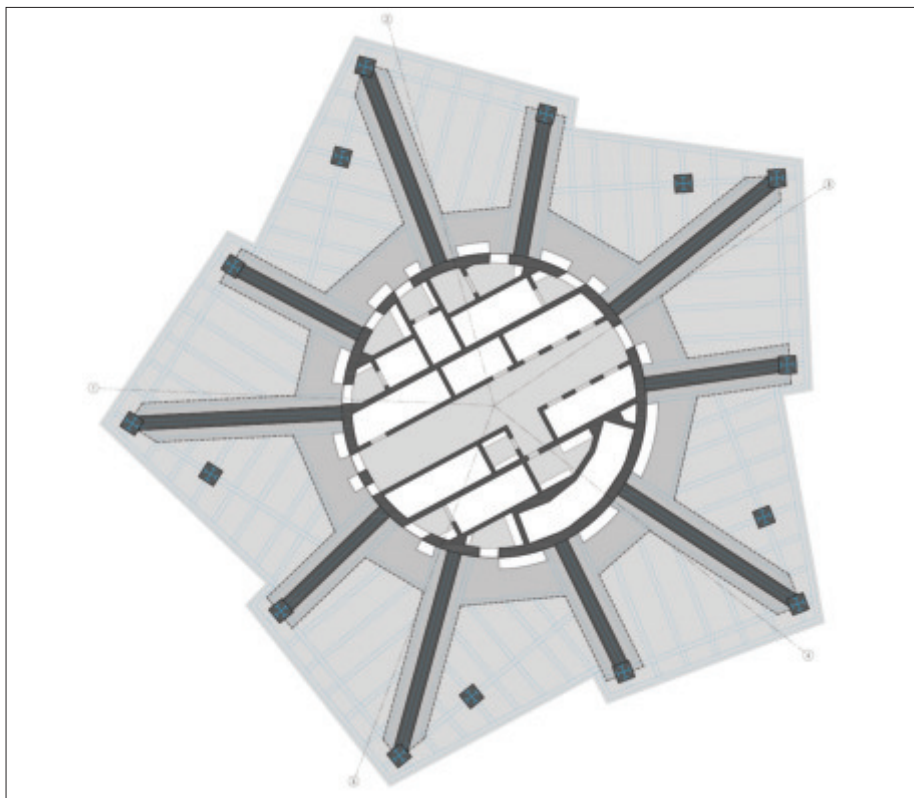
Prečne ojačitve so projektirane kot armiranobetonski nosilci-stene z jeklenim paličnim nosilcem v armiranem betonu. Za nosilce prečnih ojačitev je bil uporabljen beton s tlačno trdnostjo razreda C70/85.

Jekleni palični nosilci so projektirani tako, da prenesejo obtežbo vetra v času gradnje stolpnice pred vgradnjo armiranobetonskih prečnih ojačitev konstrukcije. Jeklena paličja za prečno ojačitev konstrukcije so izdelana iz jekla S390.

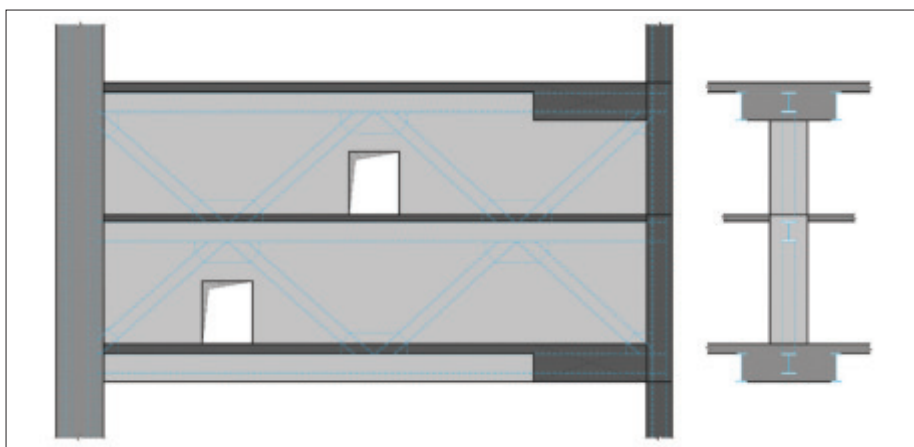
Jekleno paličje in armatura prečnih, spodnje plošče in krožnega nosilca so na slikah 31, 32, 33 in 34.

Armiranobetonsko jedro ima krožno obliko in je glavni nosilni element konstrukcije nebotičnika. Jedro prevzame in prenese na temelj vertikalne in horizontalne obtežbe vključno s torzijskimi obtežbami, ki so stalno prisotne zaradi geometrije konstrukcije.

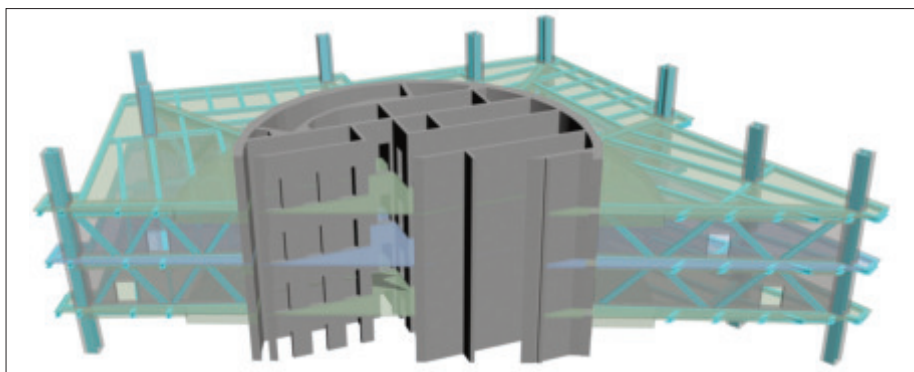
Debelina zunanjih sten jedra je 2500 mm v etažah -3. in -2., v etažah -1. in 1. 2000 mm, v etažah 2. in 3. 1700 mm, v etažah 4. in 5. 1400 mm, v etažah 6. in 7. 1100 mm, v etažah 8.–67. 800 mm, v etažah 68.–80. 600 mm, v etažah 81.–89. 400 mm. Debelina zunanjih sten jedra je bila določena z izračunom za vse vrste vplivov kot tudi v skladu s konstrukcijskimi zahtevami (število in lokacije lukenj, odprtin, raster armaturnih mrež itd.).



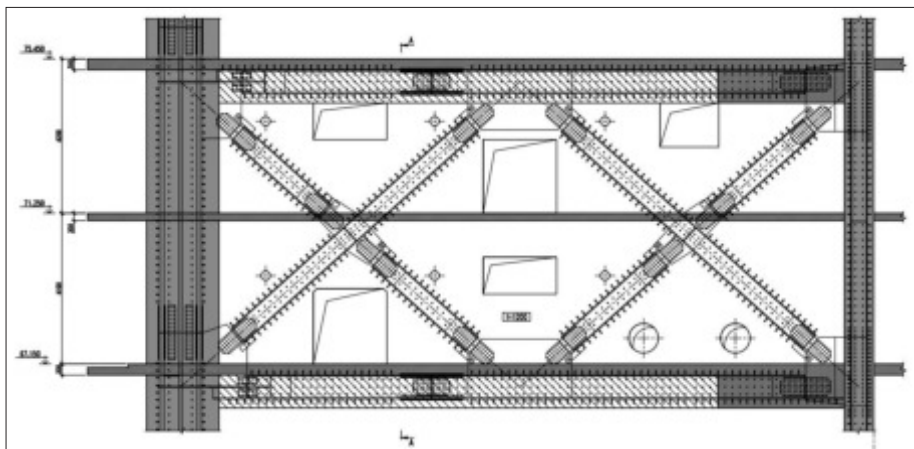
Slika 28 • Prečniki v tlorisu.



Slika 29 • Prečni prerez prečnikov.



Slika 30 • Pogled 3D na konstrukcijo prečnikov.



Slika 31 • Vzdolžni prerez prečnika; na levi stebler na obodu etaže, na desni krožna nosilca in stena jedra.



Slika 32 • Jekleno paličje prečnika v 33. in 34. etaži.

Zunanji premer jedra od 8. do 58. etaže je 26,1 m, od 59. do 80. etaže pa se zunanji premer jedra zmanjša do 21,0 m.

Za pritrditve jeklenih nosilcev medetažnih plošč tipskih etaž na zunanje stene jedra so v zunanjih stenah jedra vgrajeni pritrtilni elementi. Poleg vertikalne obtežbe omenjeni pritrtilni elementi prevzamejo tudi sile, ki se pojavijo zaradi globalne torzije nebotičnika.

Med projektiranjem je bila posebna pozornost namenjena enakomerni razporeditvi vratnih odprt in inštalacijskih prebojev v zunanjih stenah jedra, da bi zagotovili enakomerno porazdelitev togosti po obodu jedra.

Za stene osrednjega jedra stolpnice je uporabljen beton s tlačno trdnostjo razreda C70/85.

Detalji armature zunanje stene jedra je prikazan na sliki 35.

Deset sovprežnih stebrov, razporejenih po obodu stolpnice, je povezanih z jedrom s prečniki. Za zmanjševanje razpona med stebri je predvidenih še 5 sovprežnih stebrov do nivoja 56. etaže. Ti stebri prevzamejo samo vertikalne obtežbe.

Sovprežni stebri so izdelani iz kovinskega jedra in zaliti z betonom. Material kovinskega jedra je jeklo HISTAR 460 (High Strength ArcelorMittal) proizvajalca ArcelorMittal. Kovinsko jedro je izdelano v obliki križa, sestavljenega iz I-profilov HL po ASTM A 6/A 6M-12 in dodanih T-profilov, izrezanih iz I-profilov. Za spajanje elementov kovinskega jedra so uporabljeni neprekinjeni kotni zvari.

V skladu z arhitekturnim konceptom so sovprežni stebri razporejeni v spiralo, s čimer je omogočena zasakana oblika fasade stolpnice. Prelom osi kovinskega jedra stebra je izveden na nivojih lih etaž. Spoj na nivoju preloma osi jedra stebra je izdelan s prirobnicami iz jeklene pločevine razreda S440 po GOST-u 27772-88. Neposredni prenos horizontalne komponente sile na mestu preloma osi stebrov je izveden na nivoju medetažne plošče. Montažni spoj jeder stebrov je izveden na višini 1200 mm nad nivojem medetažne plošče. Montažni spoji jeklenih jeder stebrov so vijaki. Spoji so izdelani v vsaki drugi etaži.

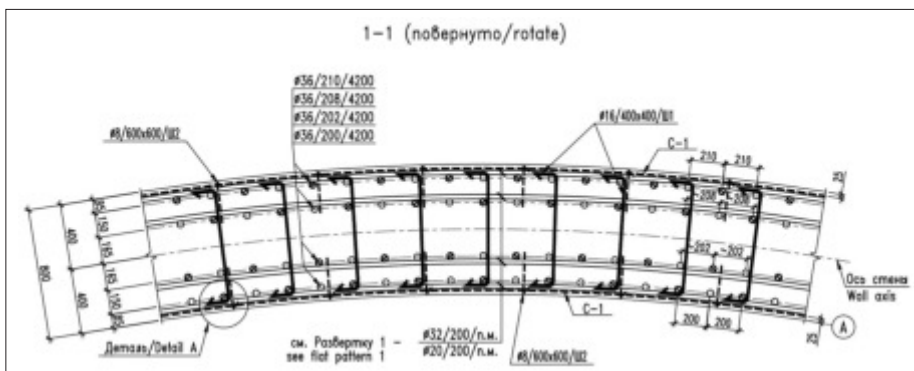
Za zagotovitev skupnega delovanja jeklenega jedra stebra z armiranim betonom so predvideni čepi, ki so bili nameščeni na jedra stebrov že v tovarni proizvodnji.



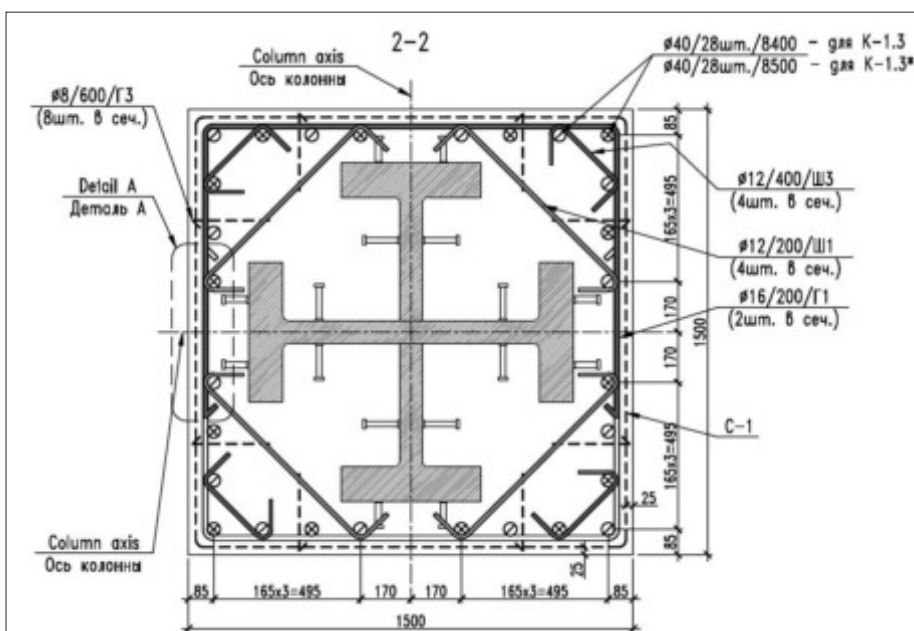
Slika 33 • Jekleno paličje ter armatura spodnje plošče in krožnega nosilca.



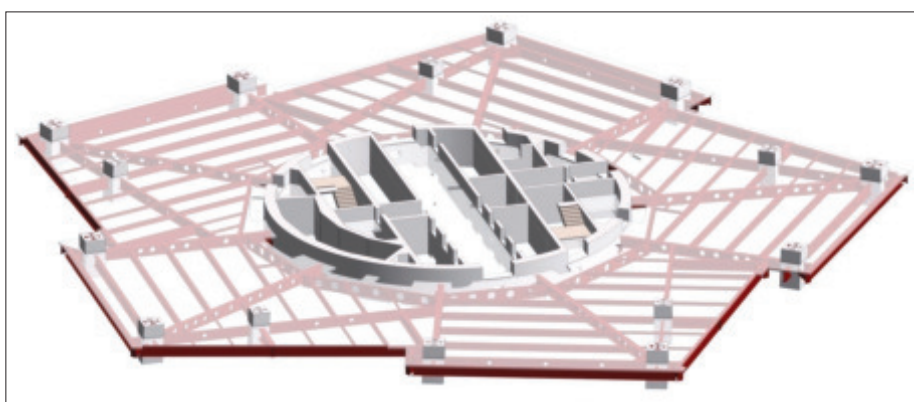
Slika 34 • Armatura stene prečnika v 33. etaži.



Slika 35 • Detalj armiranja zunanje stene jedra.

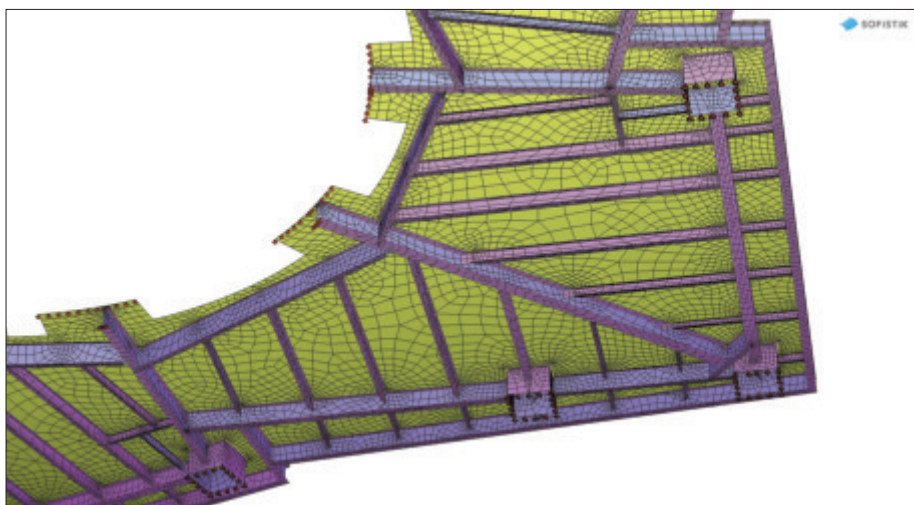


Slika 36 • Prezrežje sovprežnega stebra.

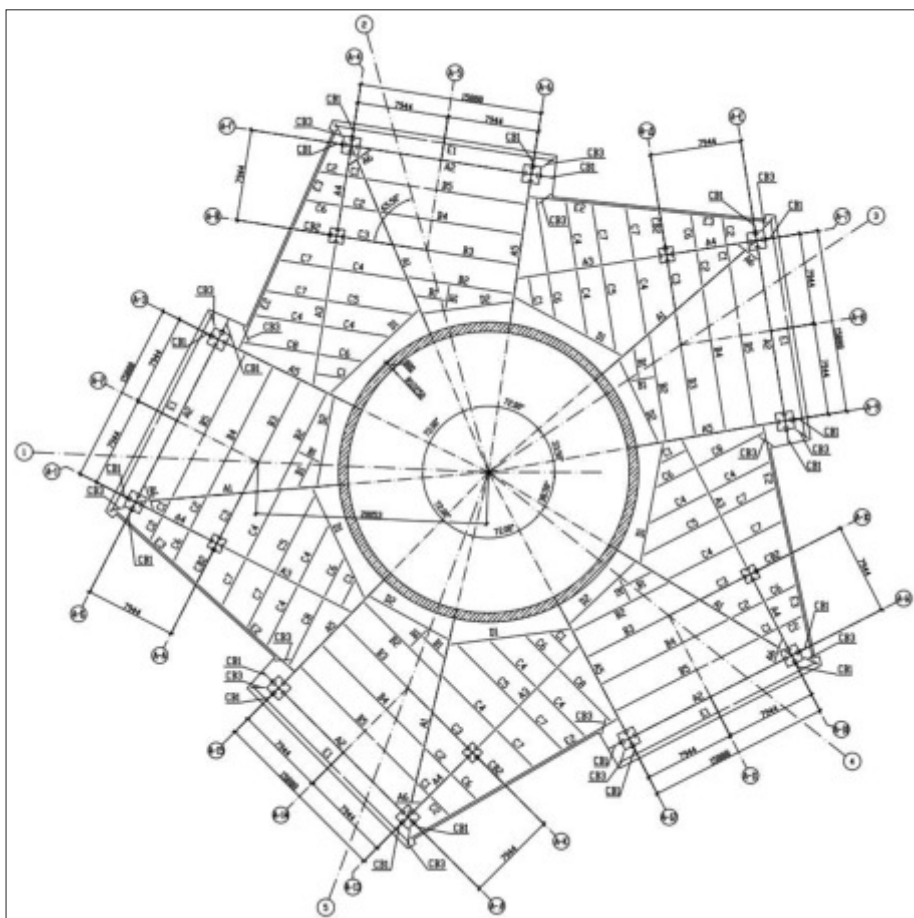


Slika 37 • Sovprežne medetažne konstrukcije, 3D-pogled.

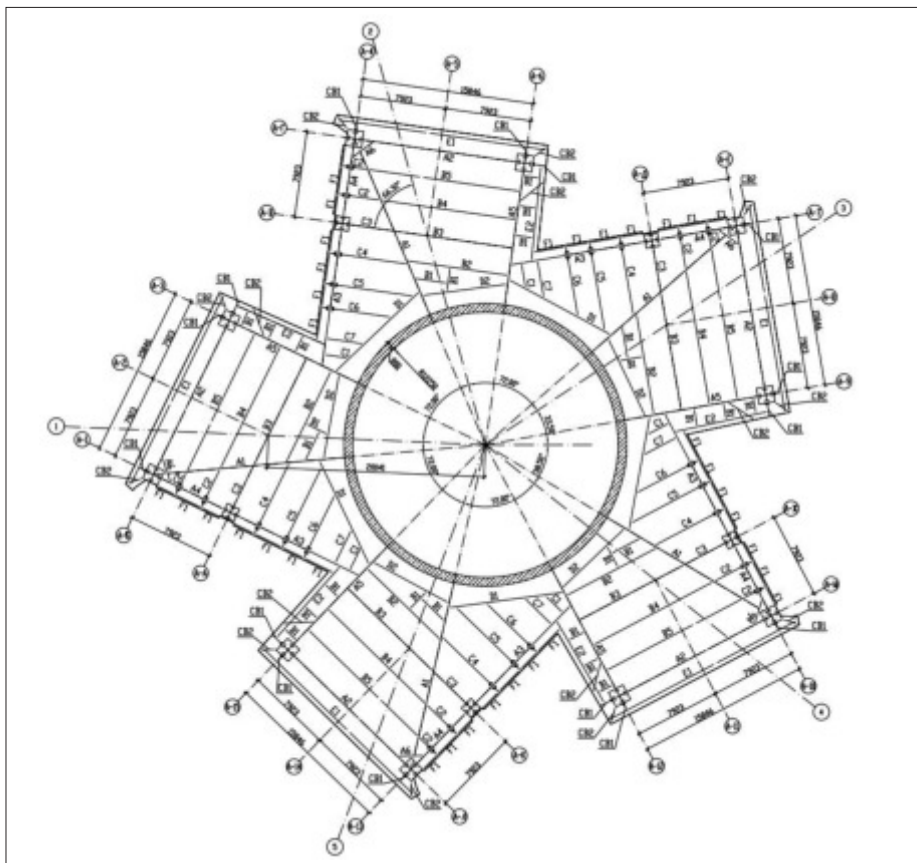




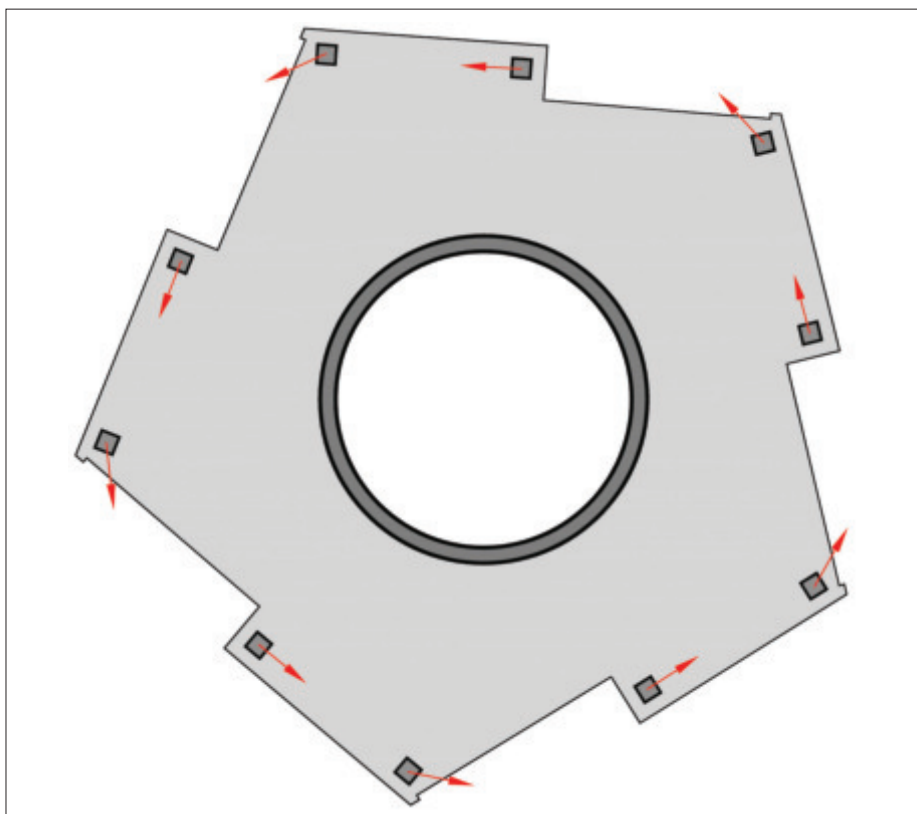
Slika 38 • Pogled od spodaj na del jeklene konstrukcije stropa.



Slika 39 • Razpored jeklenih nosilcev stropa na 25. etaži.



Slika 40 • Razpored jeklenih nosilcev stropa na 26. etaži.



Slika 41 • Sile, s katerimi delujejo stebri na etažne plošče.

Razred tlačne trdnosti betona sovprežnih stebrov je C70/85.

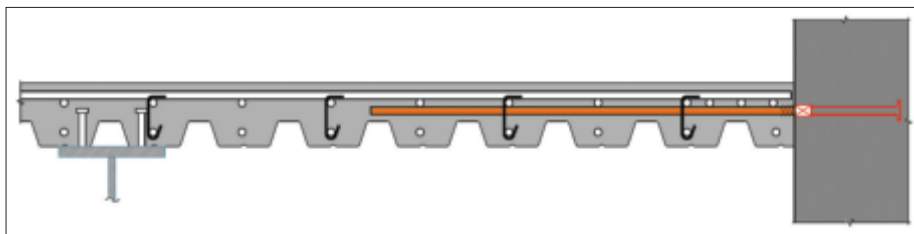
Prezrez stebra je prikazan na sliki 36.

Medetažne konstrukcije zunaj jedra so sovprežne (slike 37–40). Plošče so izvedene na fiksnem opažu iz profilirane pločevine, ki sloni na jeklenih nosilcih. Debelina medetažnih plošč znaša 150 mm. Za plošče je uporabljen beton trdnostnega razreda C35/45. Skupno delovanje armiranobetonskih plošč z jeklenimi nosilci je zagotovljeno s čepi, ki so privarjeni na zgornjo pasnico nosilcev. Jekleni nosilci so izdelani iz valjanih I-profilov v skladu z ruskimi tehničnimi pogoji STO ASČM 20-93, presek profila do 40B2 (ruski standard). Višina profila varjene izvedbe je 750 mm, material – jeklo S345-3 po GOST-u 27772-88, S390 (10XCHДА) po GOST-u R 55374-2012. Vozlišča in montažni spoji nosilcev so izvedeni z visokotrdnimi vijaki M24 trdnostnega razreda 10.9. Za stike nosilcev z armiranobetonskimi konstrukcijami jedra so uporabljeni vgradni pritrdilni deli in izvršeno montažno varjenje.

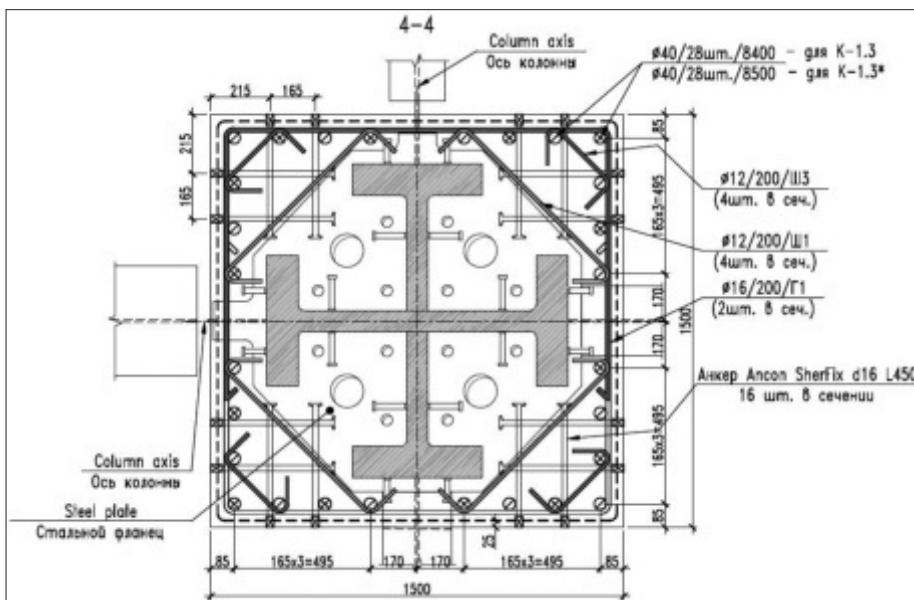
Zaradi posebne oblike nebotičnika mora vsaka medetažna plošča prevzeti precej velike horizontalne sile, ki se pojavljajo zaradi preloma osi stebrov, in prenesti te stalno delujoče sile na jedro stolpnice (slika 41). Zato so predvidene rešitve, ki upoštevajo značilnosti delovanja medetažnih plošč:

- ojačano armiranje monolitnih plošč po celi površini za prenos natezne in strižne sile od nagiba stebrov na jedro;
- uporaba armature in čepov, ki zagotavljajo prenos sile globalne torzije na osrednje jedro stolpnice. Armatura je potrebna zaradi številnih komunikacijskih kanalov, ki potekajo po obodu zunanje stene jedra.

Prenos vodoravnih sil med stebri in ploščami ter ploščami in zunanjo steno jedra, velikih od 100 do 200 kN, je zagotovljen s posebnimi sidri, ki v kombinaciji armaturnimi palicami z navoji poenostavijo stik med ploščami in stebri oziroma stenami. Sidra so vgrajena v stebre in stene, pri čemer so navoji v sidru zaščiteni pred zalitjem s cementnim mlekom. Po odstranitvi opaža stene ali stebra ter zaščite navoja je v sidro mogoče priviti armaturne palice. Tako se izognemo vrтанju betona. Na slikah 42 do 50 sta prikazana stikovanje plošč in stene jedra, jeklenih nosilcev stropov in stene jedra ter montaža jeklenih nosilcev stropov.



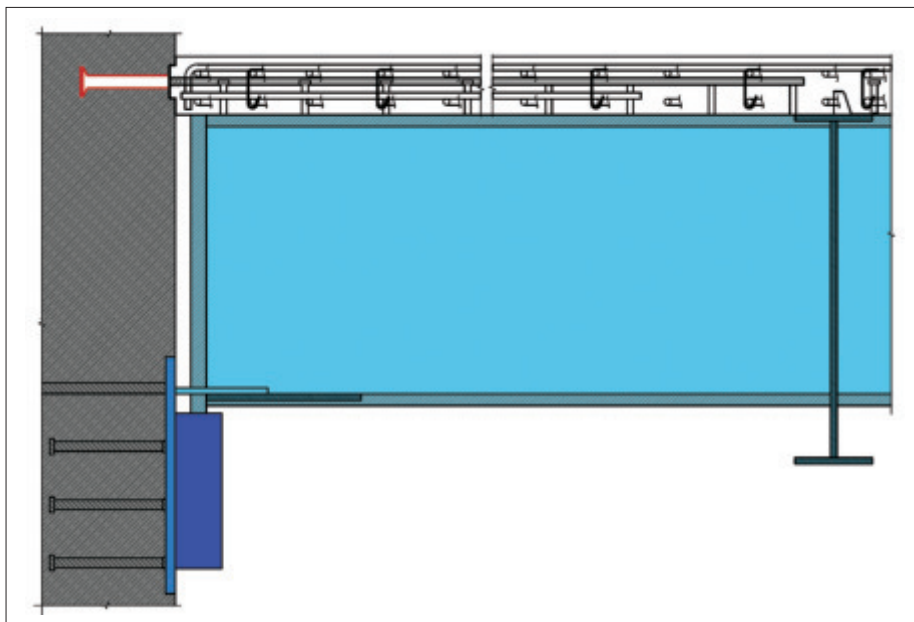
Slika 42 • Stik plošče s steno jedra.



Slika 43 • Razpored sider v prerezu stebra na stiku s ploščo.



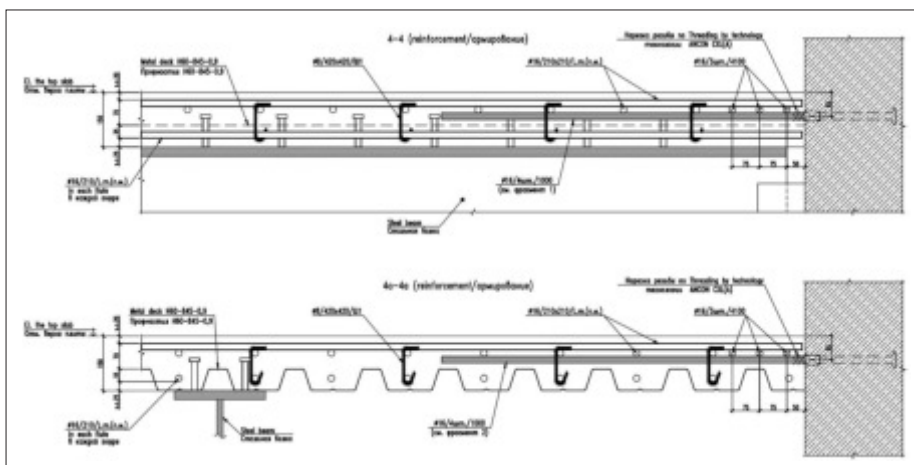
Slika 44 • Armatura stebra in sidra v vogalu stebra.



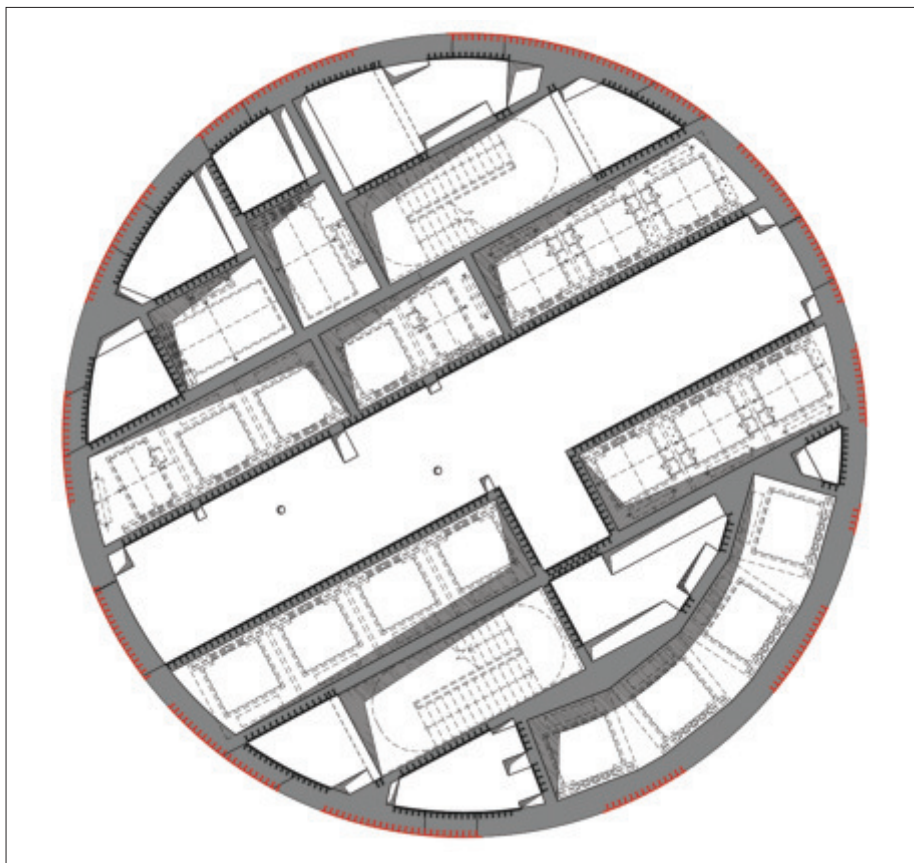
Slika 45 • Stik stropne plošče in nosilca stropa s steno jedra.



Slika 46 • Stik nosilca stropa s steno jedra.



Slika 47 • Detajl sovprežne medetažne konstrukcije na stiku s steno jedra.



Slika 48 • Razpored sider po obodu zunanje stene jedra in v notranjih stenah jedra.



Slika 49 • Montaža nosilcev plošče.



Slika 50 • Vijačeni stik nosilca plošče.

### 2.3 Konstrukcija zgornjega stožčastega dela stolpnice

Zgornji, stožčasti del nebotičnika (slika 51) je funkcionalno in konstrukcijsko razdeljen na dva dela:

- pohodni ogrevani del, ki vključuje razgledne ploščadi ter dvigala in rampe za dostop do njih;

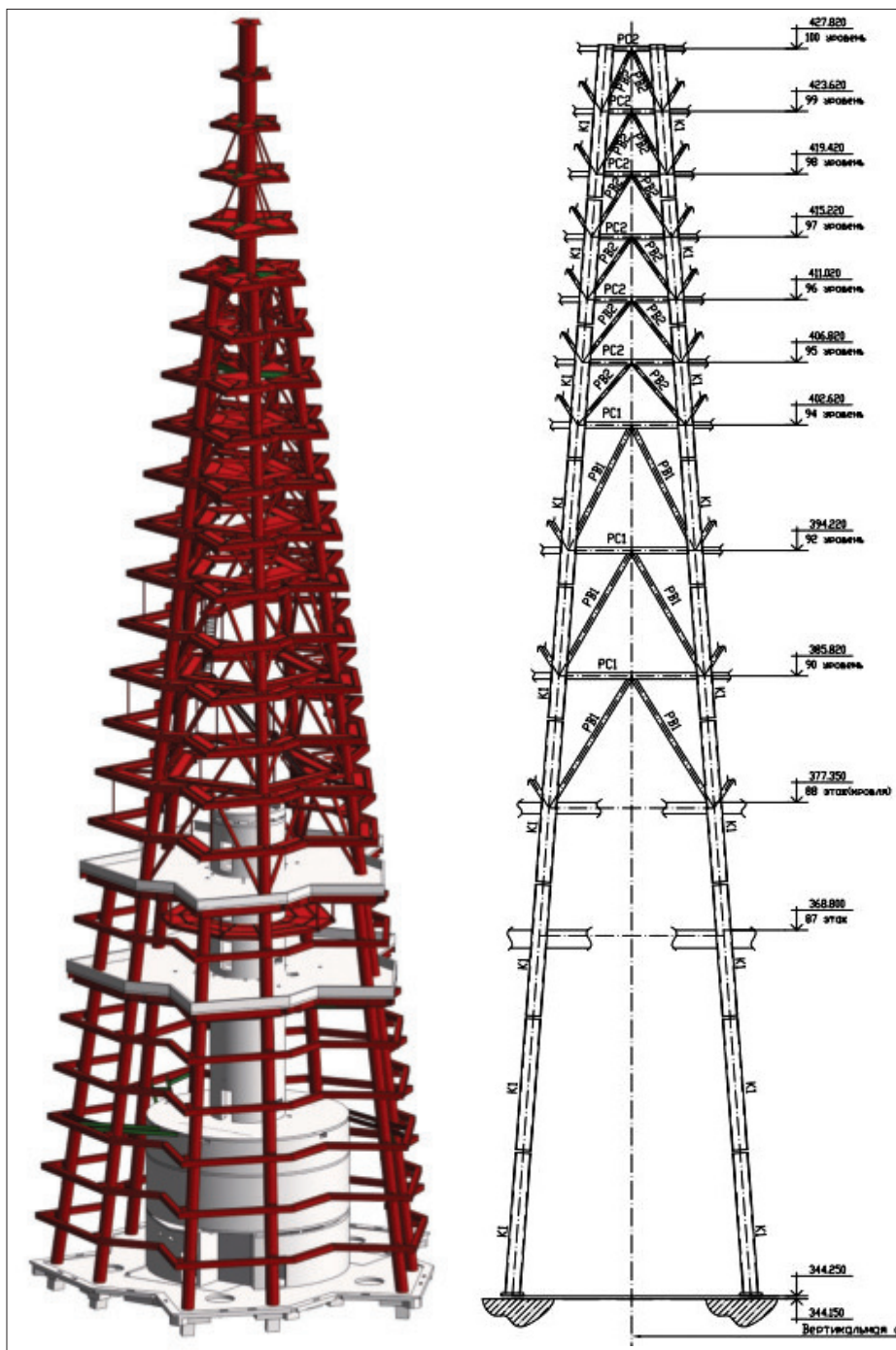
- tehnični neogrevani del nad koto 87. etaže, ki ima ograjo v obliki jeklene mreže.

Zgornji, stožčasti del je zasnovan v obliki peterokotne piramide, zgrajene okoli osrednjega armiranobetonskega jedra, in se opira na medetažno ploščo na koti 344.400 na mestih, kjer so stebri. Višina stožčastega dela je okoli 118 metrov,

dolžina osnovnega roba piramide pa okoli 16,3 metra.

Stebri zgornjega stožčastega dela so na nivoju 83. etaže podprti s stebri po oseh preseka in so v navpični ravnini nagnjeni proti osi nebotičnika.

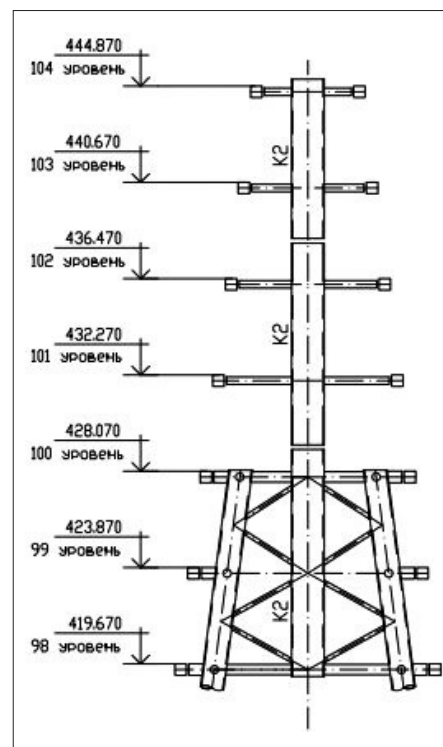
Na koti 87. etaže (368.800) je medetažna plošča, na kateri je nameščena oprema za



Slika 51 • Konstrukcija stožčastega dela nebotičnika.

vzdrževanje fasade, na koti 88. nivoja pa medetažna plošča, ki ločuje spodnji ogrevani del piramide od zgornjega neogrevanega tehničnega dela. Nad koto 377.350 so stebri piramide povezani med seboj s sistemom trikotnih vertikalnih povezav. Stabilnost celotne konstrukcije zgornjega stožčastega dela je zagotovljena z jedrom kot tudi s sistemom vertikalnih povezav med stebri (nad koto 88. nivoja 377.350).

Stebri, razpirala in vertikalne povezave so izdelani iz okroglih cevi. Konica stožčastega dela nebotičnika je izdelana iz jeklene cevi premera 1420 mm, v notranjosti katere so lestve za dostop do zgornje točke stolpnice (slika 52). Montažne povezave elementov konstrukcije stožčastega dela so izvedene z visokotrdnimi strižnimi vijaki in z montažnimi zvari.



Slika 52 • Konstrukcija vrha stožčastega dela nebotičnika.

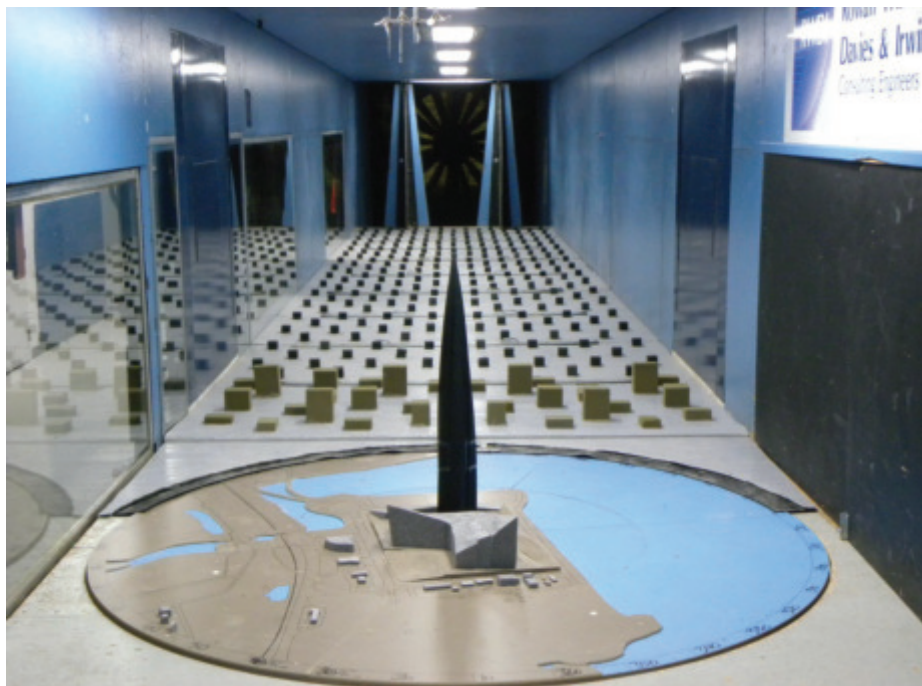
### 3 • IZRAČUNI GRADBENIH KONSTRUKCIJ

Osnovni izračuni gradbenih konstrukcij za Lakhta Center so bili izvedeni v programu Lira SAPR in preverjeni v programu Sofistik. Skupno število končnih elementov v modelu je znašalo 524.000. Togost pilotnega temel-

ja pod škafkastim temeljem je bila opredeljena z določitvijo paličnih končnih elementov s togostjo, ki ustreza togosti posameznih pilotov. V procesu izračunavanja je bila togost vseh 264 pilotov ponovno preverje-

na z metodo iteracij. Za določitev togosti armiranobetonskih in sovprežnih elementov konstrukcije je bil uporabljen povprečni modul elastični.

Vertikalne obremenitve nebotičnika so bile vzete v skladu z veljavnimi normami projektiranja in projektno nalogo. Zanimivo je, da lastna teža vseh konstrukcij in stalne obtežbe (nenosilni materiali in konstrukcije)



Slika 53 • Model stolpnice Lakhta Center v aerodinamični cevi, RWDI.

predstavljajo 84 % od celotne karakteristične teže 4.930.000 kN (z upoštevanjem teže škatlatega temelja). Pri izračunu konstrukcije stolpnice je bila poleg gravitacijskih obtežb odločilna obtežba vetra. Raziskavo modela stolpnice Lakhta Center v aerodinamični cevi je opravila družba RWDI (slika 53) (Stoyanoff, 2015).

Vsota vseh horizontalnih sil od izračunane obtežbe vetra je znašala 48.360 kN, in sicer 30.790 kN (64%) ob srednji hitrosti vetra in 17.580 kN (36 %) ob sunkih vetra. Vrednost momenta od delovanja sile celotnega izračunanega vetra na nivoju vrha spodnje plošče škatlatega temelja je 9.379.000 kNm (6.282.000 kNm ob srednji hitrosti vetra in 3.097.000 kNm ob sunkih vetra) (slika 54).

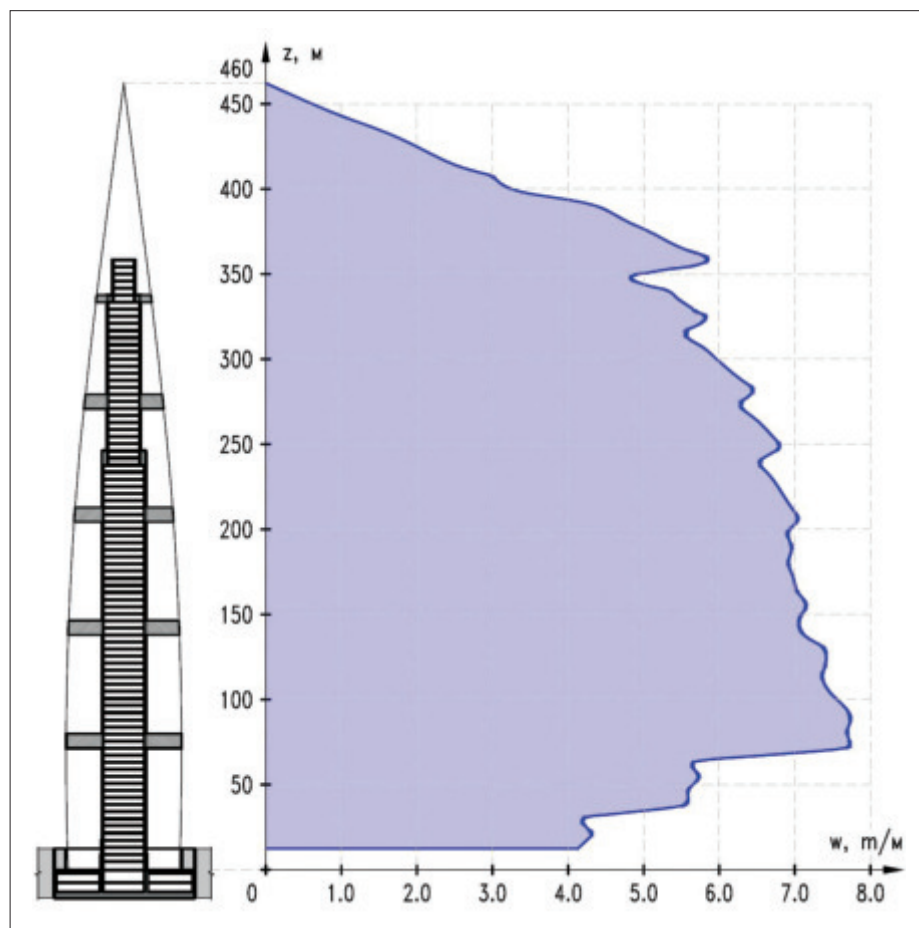
Modeliranje pilotnega temelja pod škatlstim temeljem je bilo izvedeno z linijskimi končnimi elementi z različnimi materialnimi lastnostmi. Za modeliranje armiranobetonske medetažne plošče podzemnega dela stolpnice in armiranobetonske stene, vključno z zunanjimi in notranjimi stenami jedra, so bili uporabljeni ploskovni končni elementi, za nosilne stebre in nosilce (medetažnih konstrukcij) pa linijski končni elementi. Za modeliranje medetažne konstrukcije nazemnega dela stolpnice so bili izbrani naslednji končni elementi: za nosilce linijski elementi, za plošče na profilirani pločevini pa ploskovni končni elementi. Za analizo napetostnega

stanja v osrednjem jedru ter preverjanje nosilnosti preklad so v zunanjih stenah

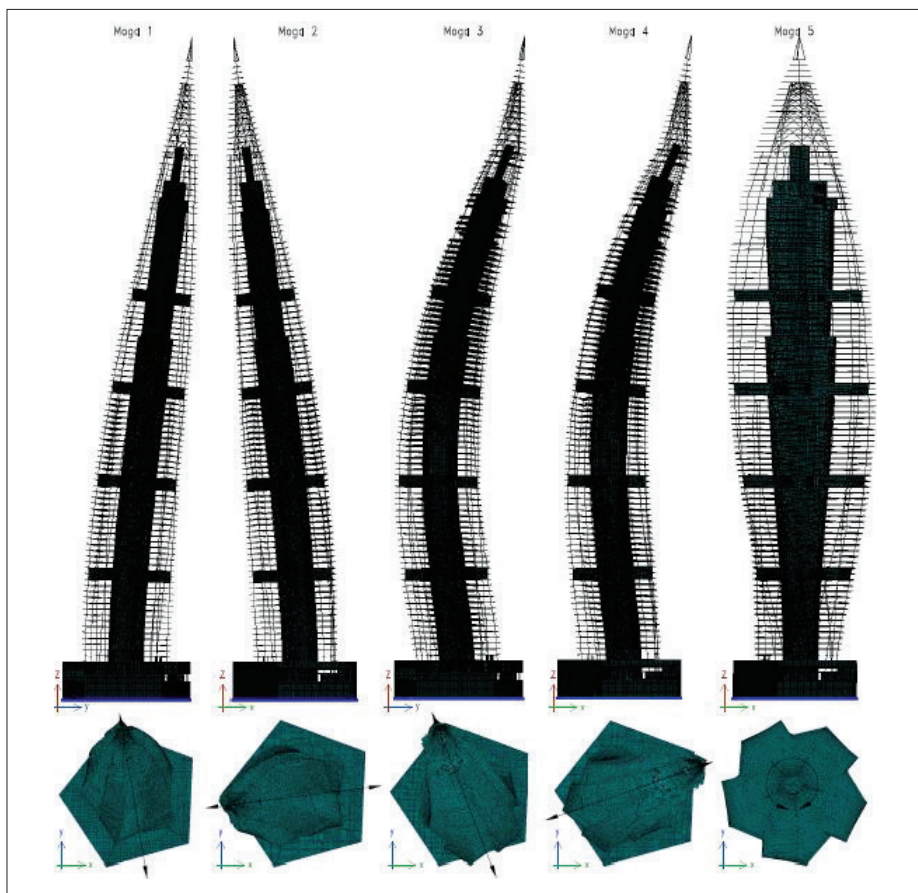
upoštevane odprtine. Računski model stene je bil razdeljen na končne elemente velikosti 1 m. Jeklene konstrukcije nadzemnega dela stolpnice (stebri, nosilci medetažnih plošč) so modelirani kot linijski končni elementi. Modeliranje sovprežnih stebrov je bilo izvedeno z linijskimi končnimi elementi z določeno togostjo. Prečniki so bili modelirani kot ploskovni končni elementi, katerih togost ne upošteva montažnega jeklenega paličja, ker je togost monolitne stene debeline 1200 mm precej večja od togosti paličja.

Za izračun lastnih frekvenc zgradbe so bile vzete karakteristične trajne vrednosti vertikalnih obtežb brez upoštevanja varnostnega faktorja  $\gamma_n$ . Vrednost frekvenc osnovnih lastnih nihajnih oblik, katerih modalna masa največ prispeva k dinamičnemu delovanju stavbe, je prikazana v preglednici 6.2. Tako je skupna modalna masa prvih osmih lastnih nihajnih oblik znaša ca. 75 % celotne modalne mase. Modalna analiza je upoštevala okoli 100 lastnih nihajnih oblik.

Za oceno udobja bivanja v zgornjih etažah stolpnice so ključni kazalniki vrednosti hori-



Slika 54 • Diagram porazdelitve obtežbe vetra po višini stolpnice za projektne srednje hitrosti vetra.



Slika 55 • Oblike lastnih nihanj nebotičnika Lakhta Center.

zontalnih pomikov vrha stolpnice in pospešek nihanja medetažnih plošč pri sunkih vetra (preglednica 1).

bil izračunan na podlagi prvih 14 lastnih frekvenc, ki so manjše od mejne vrednosti (preglednica 2).

Nivo	Višina $H$ , m	Normativni pomiki		Vsota $\Delta_n$ , mm	Relativni pomik vrha zgradbe $\Delta_n/H$
		pri srednji hitrosti vetra $\Delta_n^m$ , MM	pri sunkih vetra $\Delta_n^g$ , MM		
Medetažna plošča zgornje etaže, kjer se nahajajo pisarne	340,05	191	102	293	1/1176
Medetažna plošča razgledne ploščadi	356,85	204	109	313	1/1155
Niz zgornjega stožčastega dela stolpnice	428,07	301	161	462	1/937

Opomba: Za določitev višine niza stolpnice je bila vzeta kota vrha škattastega temelja: -4.650.

Preglednica 1 • Vrednosti horizontalnih pomikov vrha konstrukcije stolpnice ob obtežbi vetra.

Vrednost horizontalnega pomika vrha stolpnice je skoraj dvakrat manjša od vrednosti, ki je določena z normami:

$$\Delta_n/H = 1/937 \leq [1/500]$$

Pospešek od delovanja dinamične komponente obtežbe vetra (sunki vetra) je

Pospešek  $a_d = a_x$  se izračuna po formuli:

$$a_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=14} (0.7 \cdot \omega_i^2 \cdot \Delta_{xi})^2},$$

kje  $\omega_i = 2\pi f_i$  – krožna frekvenca, ki izhaja iz modalne analize,  $\Delta_{xi}$  – pomik točke, za

katero se izračuna pospešek od delovanja normativne dinamične komponente obtežbe vetra (pri sunkih vetra).

Pospešek nihanja, ki je bil določen za medetažno ploščo zgornje etaže, kjer so pisarne, znaša  $0,0486 \text{ m/s}^2$ , kar je 1,65-krat nižje od mejne vrednosti pospeška nihanja medetažnih plošč zgornjih etaž  $0,08 \text{ m/s}^2$ , ki je določena z zahtevami STU (Posebni tehnični pogoji) za projektiranje stolpnice Lakhta Center.

Št. nihajne oblike	Krožna frekvenca $\omega_i$ , rad/s	Pomik $\Delta_{xiv}$ , mm	$0.7 \cdot \omega_i^2 \cdot \Delta_{xiv}$ , mm/s <sup>2</sup>
1	0,70	2,4	0,82
2	0,72	94,3	34,22
3	3,11	0	0
4	3,29	0,4	3,03
5	4,69	0	0
6	6,21	0,2	5,40
7	6,69	0,6	18,80
8	8,33	0	0
9	10,89	0	0
10	11,69	0	0
11	12,26	0	0
12	12,42	0	0
13	14,21	0,2	28,27
14	15,80	0	0
Končni pospešek $a_x =$			48,61

Preglednica 2 • Rezultati izračuna pospeška nihanja zgornje etaže.



## 4 • FAZE GRADNJE

Gradnja nebotičnika Lakhta Center se je začela oktobra 2012. Temeljna konstrukcija stolpnice leži na 264 uvrtnih pilotih, postavljenih s površine temeljnih tal. Premer pilotov je 2 metra, dolžina pa 55 m in 65 m (oz. 72 m in 82 m z upoštevanjem globine vrtnja) (slika 56). Nato je bila izvedena zaščitna konstrukcija gradbene jame z uporabo obodnih vkopanih sten in monolitnih armiranobetona-

za škatlasti temelj je znašala 46.000 m<sup>3</sup>. Količina betona za spodnjo ploščo škatlastega temelja debeline 3,6 metra je znašala približno 19.624 m<sup>3</sup>. Ta številka je bila vpisana v Guinnessovo knjigo rekordov kot največja količina betona pri neprekinjenem betoniranju.

Pri gradnji nadzemnega dela stolpnice so bile aktivno uporabljene napredne

konstrukcij kovinskih jeder sovprežnih stebrov in kovinskih nosilcev medetažnih plošč (slika 59) je sledilo opaževanje, armiranje in betoniranje sovprežnih stebrov in medetažnih plošč.

Montaža konstrukcije zgornjega stožčastega dela nebotičnika (slika 60) višine 118 m se je začela z nivoja 83. etaže (kota 344.400). Vrh stožčastega dela stolpnice je na koti 462 m. Montaža zgornjega stožčastega dela stolpnice je bila zaključena na začetku leta 2018.



Slika 56 • Vstavljanje armaturne kletke uvrtnega pilota.



Slika 57 • Zaščita gradbene jame.

skih plošč po metodi »od zgoraj navzdol« (angl. semi-top-down) (slika 57).

Naslednji pomembni korak je bila izgradnja škatlastega temelja (slika 58), ki vključuje dve podzemni etaži. Skupna količina betona

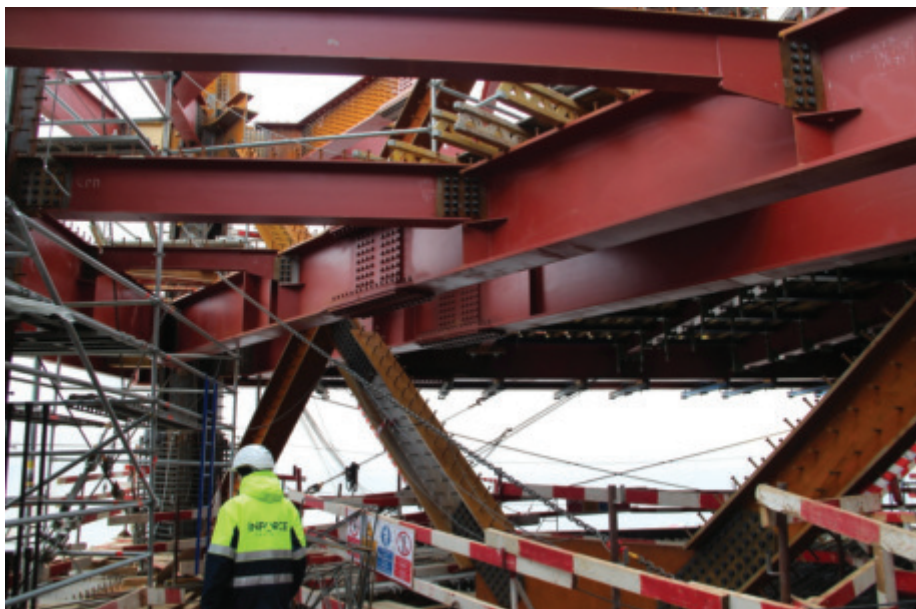
tehnologije. Najprej se je začela gradnja armiranobetonskega jedra (slika 58). Z zamikom je potekala gradnja etažnih plošč, tako da je gradnja osrednjega jedra prehitevala gradnjo plošč za 5–7 nivojev. Montaži



Slika 58 • Armiranje škatlastega temelja.



Slika 59 • Gradnja prvih etaž stolpnice.



Slika 60 • Postavitev jeklenih konstrukcij etažnih plošč.



Slika 61 • Montaža konstrukcije koničastega vrha stolpnice (Foto: V. Gusik).

## 5 • ZAKLJUČEK

Nebotičnik Lakhta Center (slika 62) je produkt dela številnega tima projektantov, gradbincev in predstavnikov investitorja. Nebotičnik Lakhta Center je postal rekorder po dosežkih v

gradbeništvu. Lakhta Center je najvišja stavba v Evropi in najvišja stavba na svetu, ki ima zasukano obliko, ki jo omogočajo nagibi nosilnih stebrov, ne pa samo nagib fasadne lupine.

Pri polaganju temeljne plošče je bil dosežen rekord po obsegu neprekinjenega betoniranja, ki je bil tudi vpisan v Guinnessovo knjigo rekordov. Realizacija tega projekta je dvignila nivo in kompetence gradbene industrije ter prispevala k nastanku novih norm projektiranja, na primer »Pravilnik o projektiranju sovprežnih konstrukcij. Osnove projektiranja.«.



Slika 62 • Stolpnica Lakhta Center (Foto: V. Suhorukov).



Slika 63 • Lakhta Center ponoči.

## 6 • ZAHVALA

Avtor članka se iskreno zahvaljuje prof. dr. Janezu Duhovniku za urejanje in pomoč pri prevodu, Svetlani Stamač za prevod in Mikhailu Desyatkinu za pomoč pri pripravi članka.

## 7 • LITERATURA

Shakhvorostov, A., Timofeevich, A., Desyatkin, M. Nebotičnik Lakhta Center v Sankt Peterburgu. Načrt gradbenih konstrukcij, Inforceproject LLC, Moskva, 2016.

Stoyanoff, S., Thompson, G., Cui, J., Jiang, Y., Lakhta Center, Wind load report, RWDI, Guelph, Ontario, 2015.

CTBUH, The Global Tall Building Database, [www.skyscrapercenter.com/building/lakhta-center/12575](http://www.skyscrapercenter.com/building/lakhta-center/12575), pridobljeno 19. 3. 2019.

# TEMPERATURNO-VLAŽNOSTNA POŽARNA ANALIZA LESENIH PREČNIH PREREZOV Z UPOŠTEVANJEM OGLENENJA

## TEMPERATURE-MOISTURE FIRE ANALYSIS OF TIMBER CROSS-SECTIONS EXPOSED TO FIRE

**izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.**

simon.schnabl@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo

in kemijsko tehnologijo,

Večna pot 113, 1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

**prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.**

goran.turk@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK 614.84:624.011.1(-047.58)

**Povzetek** | V članku je predstavljeno modeliranje obnašanja lesenih nosilcev, obremenjenih s požarom z ene ali več strani. V ta namen smo razvili računalniški program za napoved dvodimenzionalnega prehoda toplote in vlage v lesenih nosilcih, izpostavljenih požaru. Matematični model povezanega prehoda toplote in vlage predstavljata parcialni diferencialni enačbi s pripadajočimi robnimi pogoji. Model vključuje tudi oglenenje lesenih nosilcev, in sicer kot funkcijo njihove temperature, vlažnosti in gostote. Zaradi nelinearnosti osnovnih enačb smo rešitev dobili z numerično metodo končnih diferenc. Dobljene rezultate primerjamo z analitičnimi in eksperimentalnimi rešitvami, predstavljenimi v dostopni literaturi.

Ključne besede: požar, les, oglje, metoda končnih diferenc, vlaga

**Summary** | This paper describes the modelling of timber beam behaviour when one or more faces are exposed to fire. A computer program for the prediction of two-dimensional temperature and water content distribution in timber beams exposed to fire has been developed. The model consists of differential equations for coupled heat and moisture transfer with the corresponding boundary conditions. Furthermore, the model also predicts the char formation in wood beam as a function of its temperature, moisture and density. Owing to non-linear system of governing equations, the solution is obtained by numerical procedures such as finite difference method. Results obtained by numerical model are compared to the analytical solutions and experimental results published in the literature.

Key words: fire, timber, char, finite difference method, moisture

## 1 • UVOD

Človek uporablja les kot konstrukcijski material vse od njegovih prazgodovinskih začetkov. Dandanes se les kot konstrukcijski material uporablja v različnih industrijskih panogah. Zaradi njegovih izrednih lastnosti ga veliko uporabljajo arhitekti in oblikovalci sodobnih stavb. Sposobnost napovedati obnašanje lesa, ko je izpostavljen požaru, postaja s stališča požarne varnosti konstrukcij vse pomembnejša.

Namen pričujočega članka je študij in razumevanje oglečenja lesa z uporabo predstavljenega modela in primerjava rezultatov le-tega z rezultati enodimenzionalnih modelov oglečenja in eksperimentalnimi rezultati, predstavljenimi v literaturi. Pri numerični analizi mehanskega obnašanja lesenih nosilcev v primeru požara predstavljajo deformacije zaradi krčenja in nabrekanja, spremembe temperature, viskoznega lezenja in mehanosorptivnih vplivov zelo pomembno vlogo. Razvoj vseh omenjenih deformacij je tesno povezan z

dejanskim stanjem temperature in vlažnosti v lesenih nosilcih. Posledično predstavlja prostorska in časovna določitev temperature in vlažnosti po elementu skladno z robnimi pogoji okolja prvo zelo pomembno fazo v analizi lesenih nosilcev pri požaru ((Fredlund 1993), (Schnabl, 2007)).

Les je gorljiv material. Izpostavljen požaru je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi. Piroliza je kompleksen pojav. Predstavlja medsebojno ali vzajemno delovanje raznih kemijskih procesov s procesom prehoda toplote in vlage. Posledica toplotne degradacije lesa je, da ta razpade na oglje in različne pline (ogljikov dioksid, ogljikov hidrat). Posledično se spremenijo lastnosti lesa, na primer njegova gostota ter toplotna prehodnost. Piroliza ali toplotna degradacija lesa se prične, ko temperatura lesa doseže neko mejno vrednost, ki je odvisna od vrste lesa in je običajno okoli 300 °C ((Janssens 2004), (Lawson, 1952), (White, 1992)).

Pomembnost in zahtevnost toplotne degradacije lesa je tudi vzrok velikemu številu člankov na temo toplotne degradacije in oglečenja lesa kot poroznega materiala, a natančen pregled literature ni namen pričujočega dela. Čeprav eksperimentalna opažanja potrjujejo vzajemno delovanje gradientov temperature in vlage v lesu, je to le redko upoštevano v analizi obnašanja oglečenja lesa med požarom. V članku je predstavljen časovno spremenljiv povezan prehod toplote in vlage v lesenih nosilcih, izpostavljenih standardnim pogojem požara.

Predpostavka o homogenosti temperature in vsebnosti vlage vzdolž nosilca nam omogoča, da upoštevamo le dvodimenzionalne Luikove (Luikov, 1966) enačbe prečnega prereza lesenega nosilca. Pravokotnost prereza nam omogoča, da uporabimo metodo končnih diferenc z ekvidistantno mrežo diferencnih točk po prerezu obravnavanega lesenega nosilca. Integracija po prostoru je izvedena s simetričnimi formulami, osnovanimi na kvadratnih oblikovnih funkcijah, medtem ko so za časovno integracijo izbrane linearne oblikovne funkcije ((Gams, 2003), (Turk, 1987)).

## 2 • TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Osnovne enačbe prevajanja toplote in vlage

Osnovne enačbe povezanega prevajanja toplote in vlage v kapilarno poroznih snoveh, kot je na primer les, je podal že Luikov (Luikov, 1966). Povezano prevajanje toplote in vlage torej opisujeta dve nelinearni parcialni diferencialni enačbi drugega reda. Izpeljani sta z uporabo zakona o ohranitvi energije in mase infinitezimalno majhnega dela snovi. Z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- les in oglje sta homogena in ortogonalno anizotropna,
  - gravitacijske sile so veliko manjše od sil, ki nastopajo v kapilarah,
  - lastnosti lesa in oglja so odvisne od temperature in vlage,
  - krčenje in nabrekanje lesa ter oglja sta zanemarljivi,
  - masa plinov oziroma hlapov je zanemarljiva, masni tok je sestavljen le iz toka kapljevine,
  - hitrost pretoka kapljevine skozi les je zanemarljiva,
- se omenjeni enačbi glasila

$$\frac{\partial(\rho c_q T)}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \mathbf{k}_q + \frac{\varepsilon_m \lambda_e \mathbf{k}_m \delta}{c_m} \right) \nabla T + \varepsilon_m \lambda_e \mathbf{k}_m \nabla w \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \frac{\mathbf{k}_m \delta}{c_m} \right) \nabla T + \mathbf{k}_m \nabla w \right], \quad (2)$$

kjer je  $T$  temperatura (°C),  $w$  je potencial vlage (°M),  $\rho$  je gostota snovi (kg/m<sup>3</sup>),  $c_q$  je specifična toplota snovi (J/kgK),  $c_m$  je specifična toplota vlage (J/kg °M),  $t$  je čas (s),  $\varepsilon_m$  je delež vlage v plinastem stanju,  $\lambda_e$  je izparilna toplota snovi (J/kg),  $\mathbf{k}_q$  je simetrični tenzor toplotne prevodnosti (W/mK),  $\mathbf{k}_m$  je tenzor prevodnosti vlage (kg/ms °M),  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  je operator nabra.

Enačba (1) je enačba prevajanja toplote skozi snov. Toplota se ne prevaja samo zaradi gradientov temperature (Fourierjev zakon), temveč tudi zaradi latentne toplote izparevanja in spremembe potenciala vlage (Dufourjev efekt). Slednji je običajno v primeru lesa zanemarljiv. Podobno enačba (2) predstavlja enačbo pretoka mase skozi snov. Masa, v našem primeru je to vlaga, se ne prenaša samo zaradi

gradientov vlage (Fickov zakon), ampak tudi zaradi gradientov temperature (Soretov efekt). Enačbi (1)–(2) predstavljata torej enačbi za potenciala temperature in vlage. To pomeni, da dobimo rezultate, izražene s potencialoma °C in °M. Običajno je vlažnost lesa  $V$  v praksi definirana kot delež vode glede na maso suhega vzorca lesa, torej ima enoto (kg/kg). Vlažnost lesa  $V$  pa je s potencialom vlage  $w$  povezana preko linearne zveze (Luikov, 1966)  $V = c_m w$ . (3)

Enačbi (1)–(2) lahko enolično rešimo, če poznamo ustrezne začetne in robne pogoje. Začetni pogoji predpisujejo temperaturo in potencial vlage po prečnem prerezu ob začetnem času  $t=0$

$$T(y, z, t=0) = T_0(x, y), \quad (4)$$

in

$$w(y, z, t=0) = w_0(x, y). \quad (5)$$

Robni pogoji, upoštevani v članku, so dveh tipov, in sicer:

- predpisana toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in potencialom vlage na robu in v okolici (naravna in prisiljena konvekcija),
- predpisana toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in potencialom vlage na robu in v okolici.

Robni pogoj toplotnega prehoda dodatno upošteva vpliv latentne toplote izparevanja, vlažnostni robni pogoj pa vpliv temperaturnega gradienta. Robni pogoji na izpostavljenih zunanjih površinah izenačujejo toplotni pretok s prevajanjem in vlažnostni pretok po elementu s pretokom, ki je posledica radiacije in konvekcije toplote oziroma konvekcijo vlage med prečnim prerezom in okolico. Robni pogoji se glasijo

$$-k_q \nabla T n = h_q (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon_m) \lambda_v h_m (w - w_A), \quad (6)$$

$$-k_m (\nabla w + \delta \nabla T) n = h_m (w - w_A), \quad (7)$$

kjer je  $n$  zunanja normala na mejno ploskev,  $h_q$  je toplotni prestopni koeficient ( $W/m^2K$ ),  $h_m$  je vlažnostni prestopni koeficient ( $kg/sm^2 \cdot ^\circ M$ ),  $T_A$  in  $w_A$  sta temperatura in potencial vlažnosti okolice (ambienta),  $\varepsilon_R$  je efektivna površinska emisivnost zunanlega roba prečnega prereza in  $\sigma$  je Stephan-Boltzmannova konstanta radiacije ( $\sigma = 5.671 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ ). Enačbe (1)–(7) tvorijo začetni robni problem povezanega dvodimenzionalnega prehoda toplote in vlage po lesenem prečnem prerezu, ki je izpostavljen požaru.

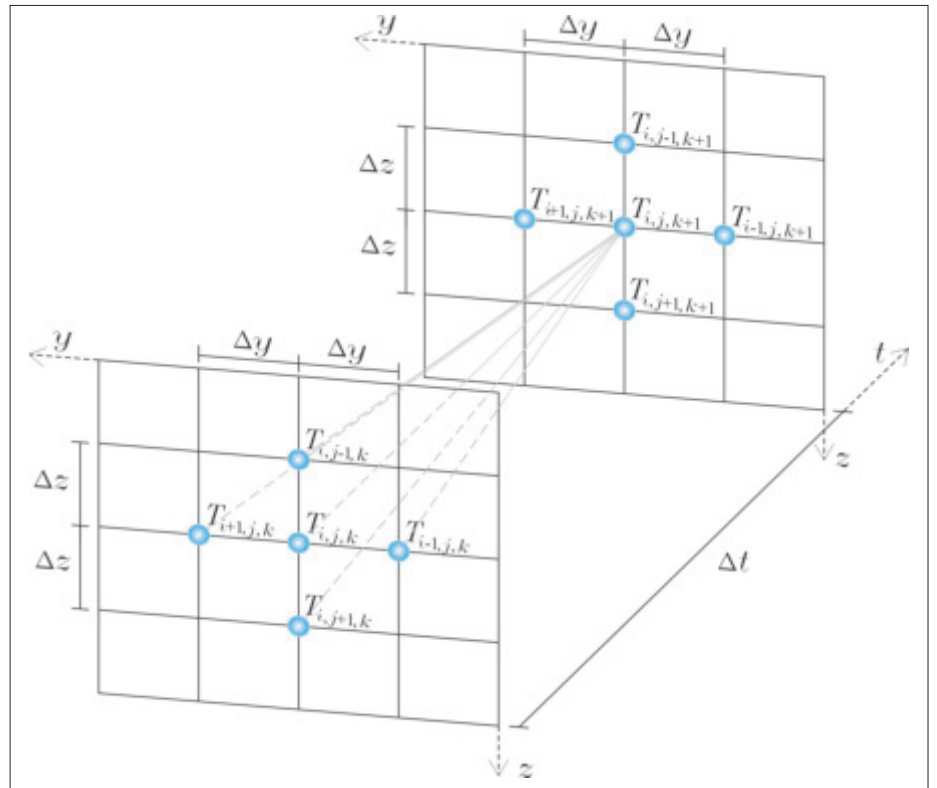
## 2.2 Diskretizacija – metoda končnih diferenc

V naravi so problemi povezanega prehoda toplote in vlage praviloma vedno nelinearni in nestacionarni. To je še bolj izrazito v primeru požara. Analitične rešitve enačb (1)–(7) torej v takih primerih niso mogoče. Reševanje je v takih primerih možno le z uporabo ustrezne numerične metode. V članku v ta namen uporabimo metodo končnih diferenc. Pri tej metodi zvezni problem povezanega prehoda toplote in vlage, ki ga opisujeta enačbi (1) in (2), ter robne pogoje (6)–(7) diskretiziramo tako, da neznane funkcije in njihove odvode aproksimiramo z množico točkovnih vrednosti v znanih vnaprej izbranih točkah diferenčne mreže. Potek med posameznimi točkami pa interpoliramo z izbiro ustreznih oblikovnih funkcij. V konkretnem primeru je izbira oblikovnih funkcij relativno preprosta. Izberemo kvadratni potek temperature in potenciala vlage po kraju in linearni potek teh količin po času. Z znanimi oblikovnimi funkcijami lahko temperaturo in potencial vlage v poljubni točki zapišemo kot vsoto njunih vrednosti v diskretnih točkah izbrane diferenčne mreže. V našem primeru temperaturo in potencial vlage zapišemo z naslednjima enačbama

$$T(x, y, t) = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=k}^{k+1} T_{l,m,n} N_{l,m} M_k, \quad (8)$$

$$w(x, y, t) = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=k}^{k+1} w_{l,m,n} N_{l,m} M_k, \quad (9)$$

kjer so  $T_{l,m,n}$  in  $w_{l,m,n}$  točkovne vrednosti temperature in potenciala vlage v točkah diferenčne mreže,  $N_{l,m}$  so krajevne in  $M_k$  časovne oblikovne funkcije. Indeks  $i$  označuje koordinato  $y$ , indeks  $j$  koordinato  $z$  ter indeks  $k$  čas (slika 1).



Slika 1 • Oznake temperatur v izbranih točkah diferenčne mreže pri dveh različnih časih.

V enačbah (1)–(7) nastopajo prvi in drugi odvodi neznanih funkcij. Z upoštevanjem odvodov izbranih oblikovnih funkcij in brezdimenzijskih koordinat (Gams, 2003) lahko aproksimirane izraze, ki jih potrebujemo v enačbah (1)–(7), v razviti obliki zapišemo na naslednji način:

$$T = (1 - t_b) T_{i,j,k} + t_b T_{i,j,k+1}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k+1} - T_{i-1,j,k+1}), \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta z} (T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{2\Delta z} (T_{i,j+1,k+1} - T_{i,j-1,k+1}), \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}) +$$

$$+ \frac{t_b}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i-1,j,k+1}), \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{\Delta z^2} (T_{i,j+1,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i,j-1,k+1}), \quad (14)$$

$$w = (1 - t_b) w_{i,j,k} + t_b w_{i,j,k+1}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta y} (w_{i+1,j,k} - w_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta y} (w_{i+1,j,k+1} - w_{i-1,j,k+1}), \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta z} (w_{i,j+1,k} - w_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{2\Delta z} (w_{i,j+1,k+1} - w_{i,j-1,k+1}), \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (w_{i+1,j,k} - 2w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{\Delta y^2} (w_{i+1,j,k+1} - 2w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1}), \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (w_{i,j+1,k} - 2w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{\Delta z^2} (w_{i,j+1,k+1} - 2w_{i,j,k+1} + w_{i,j-1,k+1}), \quad (19)$$

$$\rho = (1-t_b)\rho_{i,j,k} + t_b\rho_{i,j,k+1}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial y} = \frac{(1-t_b)}{2\Delta y} \left( (k_y)_{i+1,j,k} - (k_y)_{i-1,j,k} \right) + \frac{t_b}{2\Delta y} \left( (k_y)_{i+1,j,k+1} - (k_y)_{i-1,j,k+1} \right), \quad (21)$$

$$\frac{\partial k_z}{\partial z} = \frac{(1-t_b)}{2\Delta z} \left( (k_z)_{i+1,j,k} - (k_z)_{i-1,j,k} \right) + \frac{t_b}{2\Delta z} \left( (k_z)_{i+1,j,k+1} - (k_z)_{i-1,j,k+1} \right). \quad (22)$$

V izrazih (10)–(22) smo s  $t_b \in [0,1]$  označili brezdimenzijski čas kot prosti parameter. Diferenčna metoda s prostim parametrom  $t_b$  se imenuje splošna diferenčna metoda. Glede na izbiro  $t_b$  se diferenčna metoda deli na: *čisto eksplicitno* ali *Eulerjevo* metodo ( $t_b=0$ ), *Crank-Nicolsonovo* metodo ( $t_b=0,5$ ), *Galerkinovo* metodo ( $t_b=0,67$ ) in *čisto implicitno* metodo ( $t_b=1$ ). Z vstavitvijo izrazov (10)–(22) v enačbe (1)–(7) dobimo enačbe za izračun neznanih točkovnih vrednosti temperature in potenciala vlage v točkah diferenčne mreže prereza (slika 2). Izrazi so zelo obsežni, zato jih v članku ne prikazujemo.

robne in vogalne točke izpeljemo z uporabo simetričnih ali nesimetričnih formul ((Turk 1987), (Gams, 2003)).

### 2.3 Modeli oglelenja

Les je vnetljiv in gorljiv material. Izpostavljen požaru oziroma visokim temperaturam je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi. Piroliza lesa je izjemno kompleksen proces. Predstavlja vzajemno delovanje raznih kemijsko-fizikalnih procesov s procesom prehoda toplote in vlage. Les pri visokih temperaturah požara poka, se krči in postane črn. Pravimo, da ogleni. Pri temperaturi nekje med 270 in 300 °C se vname. To temperaturo imenujemo vnetišče lesa.

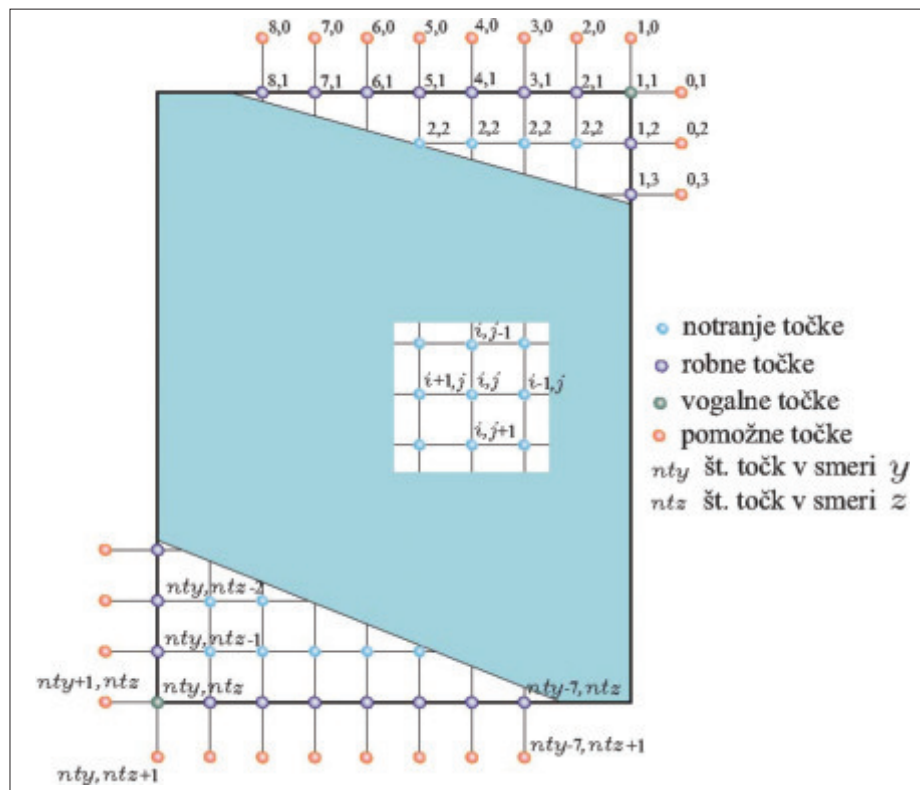
V literaturi obstaja kar nekaj modelov za opis obnašanja lesa pri visokih temperaturah. Delijo se na empirične in numerične modele oglelenja. Empirični modeli temeljijo na eksperimentalnih rezultatih lesenih elementov pri požaru. Dobljene empirične formule za določitev debeline oglja oziroma hitrosti

notranjost nosilca, izpostavljenega požaru. V veliki večini primerov imajo empirični modeli oglelenja lesa splošno obliko

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx a^n, \quad (23)$$

kjer pomeni  $\frac{\partial x}{\partial t}$  hitrost oglelenja,  $x$  je debelina oglja,  $t$  je čas izpostavljenosti požaru,  $a$  in  $n$  pa sta regresijski konstanti, ki ju določimo s kalibracijo z eksperimentalnimi rezultati. Se pa empirični modeli delijo tudi glede na vrsto požarne obtežbe. Tako obstajajo empirični modeli za standardne požare ((Lawson, 1952), (Schaffer, 1965), (AS, 1990), (White, 1992), (SIST, 2005)) ter nestandardne požare in požare s konstantno temperaturo ((Shaffer, 1965), (Leceister, 1983), (Mikkola, 1990), (Lau, 1999)). Alternativno lahko namesto empiričnih uporabimo numerične/matematične modele oglelenja. V literaturi je najti zelo malo matematičnih modelov za opis oglelenja lesa. Le-ti pa se razlikujejo glede na stopnjo opisa fizikalnih in kemijskih procesov, ki potekajo v lesu med požarom. Večina modelov upošteva samo prehod toplote brez upoštevanja vlage (Takeda, 2003), nekateri tudi vlago ((Janssens, 2004), (Pečenko, 2015)), medtem ko drugi poleg prehoda toplote in mase (vlaga, plini, smole itd.) upoštevajo še koncentracijo kisika v zraku in krčenje oglja (Fredlund, 1993).

V članku predlagani matematični model za opis oglelenja ni tako splošen, kot je model Fredlunda (Fredlund, 1993). Zanemari namreč vpliv tlaka in konvekcijskega dela toka tekočine (vlage in drugih produktov pirolize). Upošteva pa lahko temperaturno in vlažnostno odvisne termomehanske lastnosti lesa pri povišanih temperaturah požara. Ker pa je te podatke težko pridobiti iz literature ali pa jih sploh ni, smo v članku prikazali izpeljanko modela, ki v procesu pirolize upošteva le dve materialni fazi, to sta les in oglje. Temperatura vnetišča lesa je v tem primeru 300 °C. To pomeni, da do te temperature rešujemo enačbe (1)–(7) za les, nad to temperaturo pa za oglje. V nadaljevanju prikazujemo rezultate.



Slika 2 • Oznake vozlišč izbrane diferenčne mreže glede na lego v prerezu.

Enačbama (1)–(2) moramo zadostiti tudi v robnih točkah. To pomeni, da moramo izraze (10)–(20) zapisati v robnih točkah. V ta namen moramo vpeljati pomožna vozlišča diferenčne mreže z namišljenimi vrednostmi temperature in potenciala vlage. Enačbe za

oglenjenja so lahko odvisne od različnih parametrov, kot so vsebnost vlage, gostota lesa, vrsta lesa, tip požarne obtežbe, temperatura vnetišča lesa itd. Ogleenje lesa navadno opišejo s hitrostjo zmanjševanja mase lesa (g/s) ali s hitrostjo širjenja oglja (mm/s) v

### 3 • NUMERIČNI PRIMERI

#### 3.1 Enodimenzionalno oglenenje

##### 3.1.1 Primerjava z empiričnimi modeli

V literaturi obstajajo predvsem empirični modeli za opis enodimenzionalnega oglenjenja lesa s konstantnimi materialnimi lastnostmi pri standardnem požaru. Zato izberemo za primerjavo v članku predlaganega matematičnega modela primer enodimenzionalnega gorenja smrekovega nosilca debeline  $d$ , ki je izpostavljen standardnemu požaru (ISO, 1999). Materialne podatke obravnavanega smrekovega nosilca sta podala Chang in Weng (Chang, 2000) in so naslednji:

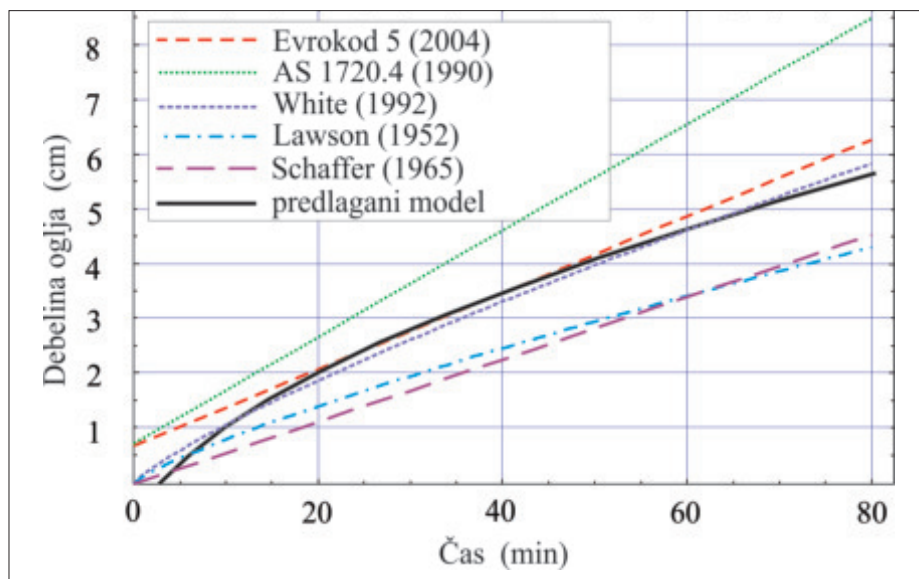
$$T_0 = 20^\circ\text{C}, w_0 = 13^\circ\text{M}, w_A = 4^\circ\text{M}, \rho^{\text{les}} = 370 \text{ kg/m}^3, \rho^{\text{ogljje}} = 110 \text{ kg/m}^3, k_q^{\text{les}} = 0,12 \text{ W/mK},$$

$$k_q^{\text{ogljje}} = 0,15 \text{ W/mK}, k_m^{\text{les}} = k_m^{\text{ogljje}} = 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg/ms}^\circ\text{M}, c_q^{\text{les}} = 1530 \text{ J/kgK}, c_q^{\text{ogljje}} = 1050 \text{ J/kgK},$$

$$c_m^{\text{les}} = c_m^{\text{ogljje}} = 0,01 \text{ kg/kg}^\circ\text{M}, h_q^{\text{les}} = h_q^{\text{ogljje}} = 22,5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_m^{\text{les}} = h_m^{\text{ogljje}} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}^\circ\text{M},$$

$$\varepsilon_m = 0,3, \delta = 2,0^\circ\text{M} / \text{K}, \varepsilon_R = 0,9, d = 0,3 \text{ m}.$$

Primerjava rezultatov je prikazana na sliki 3.



Slika 3 • Primerjava predlaganega modela oglenjenja z izbranimi empiričnimi modeli.

Vidimo, da večina empiričnih modelov predlaga konstantno hitrost oglenjenja ((Schaffer, 1965), (SIST, 2005), (AS, 1990)). Upoštevanje konstantne hitrosti oglenjenja je pripravno, a ne odraža dejanskega poteka oglenjenja lesa. Nelinearni model enodimenzionalnega oglenjenja so predlagali Lawson s sodelavci (Lawson, 1952) ter White in Nordheim (White, 1992). Iz primerjave rezultatov je razvidno, da se v večini primerov razlike med posameznimi modeli s časom povečujejo. Razlika v debelini oglja, ki jo

predlagata avstralski standard AS 1720.4 (AS, 1990) in Shaffer (Shaffer, 1965), je po 80 minutah skoraj 100%. Opaziti je dobro ujemanje predlaganega modela z modeloma, ki ju predlagajo (SIST, 2005) ter White in Nordheim (White, 1992). S slike 3 se tudi vidi, da empirični modeli, ki jih primerjamo, predpostavljajo začetek oglenjenja takoj ob nastopu požarne obtežbe. To seveda ne predstavlja dejanskega stanja. V predlaganem modelu je upoštevano, da les začne ogleneti, ko doseže temperaturo vnetišča, to je  $300^\circ\text{C}$ . To se zgodi približno 3 minute po začetku požara.

##### 3.1.2 Primerjava z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati

Rezultate predlaganega modela smo primerjali tudi z rezultati švedskega raziskovalca Fredlunda (Fredlund, 1993), ki je eksperimentalno in numerično obravnaval primer smrekovega nosilca z začetno vrednostjo vlage 14,5%. Pri numeričnih izračunih je uporabil temperaturno odvisne termomehanske lastnosti lesa pri visokih temperaturah. Te lastnosti je določil z eksperimenti. Te tem-

peraturno odvisne lastnosti lesa smo upoštevali tudi v predlaganem matematičnem modelu. Primerjava rezultatov je podana na sliki 4.

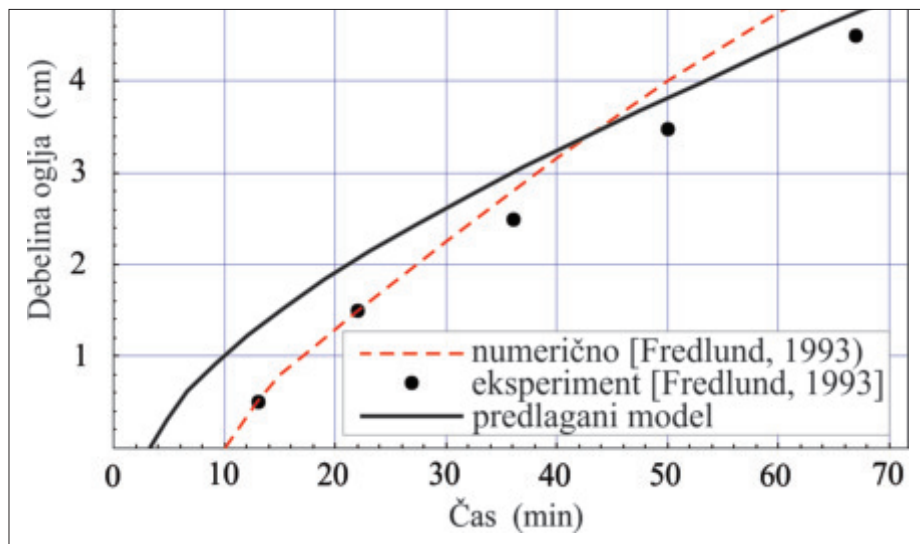
Primerjava pokaže, da se modela razlikujeta predvsem glede časa, ko les začne ogleneti, kar je lahko posledica različno uporabljene definicije oglenjenja. V (Fredlund, 1993) je nastanek oglja definiran kot stanje, ko specifična gostota lesa pade pod  $300 \text{ kg/m}^3$ , medtem ko v predlaganem modelu oglje nastane, ko les doseže temperaturo  $300^\circ\text{C}$ . Vidimo, da se razlika med modeloma s časom zmanjšuje do približno 45 minut, ko je debelina oglja v obeh primerih enaka. Primerjava obeh modelov z eksperimentalnimi rezultati je v obeh primerih v okviru inženirske natančnosti relativno dobra. Na začetku je model Fredlunda (Fredlund, 1993) bližje rezultatom eksperimenta, po 45 minutah pa se rezultati v članku predlaganega modela tem rezultatom bolj prilagajajo. Fredlundov model v tem časovnem območju precenjuje hitrost oglenjenja.

##### 3.1.3 Parametrična študija

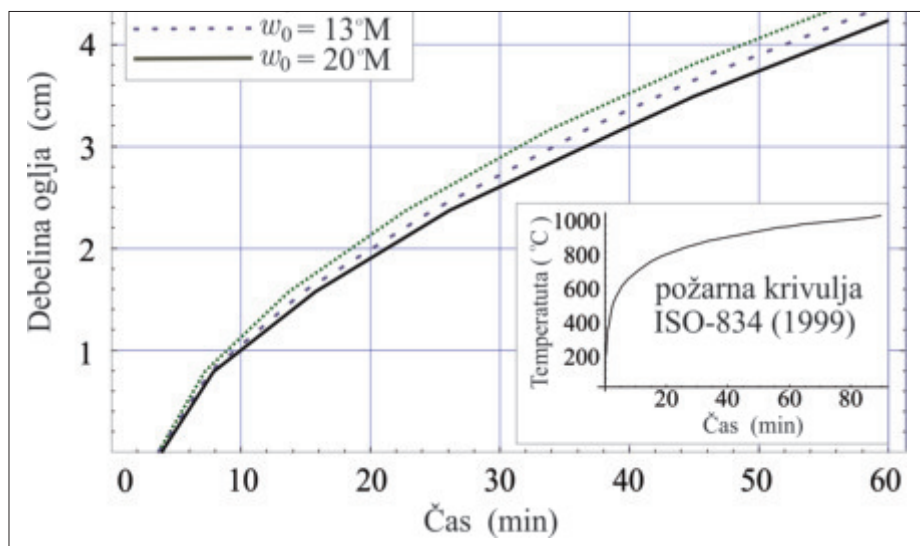
V članku predstavljeni numerični model za oglenenje lesa smo uporabili v parametrični študiji, s katero smo želeli ugotoviti vpliv začetne vlažnosti  $w_0$  in specifične gostote lesa  $\sigma^{\text{les}}$  na obnašanje lesenih prerezov pri standardnem požaru. V ta namen smo za različne vrednosti začetne vlage in specifične gostote lesa izračunali debelino oglja pri različnih časih požara. Drugi podatki lesenega prečnega prereza so bili enaki kot v primeru 3.1.1. Vpliv začetne vlažnosti na debelino oglja je prikazan na sliki 5.

S slike 5 je razvidno, da se z večanjem začetne vlažnosti lesa hitrost oglenjenja zmanjšuje, medtem ko je vpliv začetne vlažnosti lesa na začetek oglenjenja zanemarljiv. Hitrost oglenjenja je tako pričakovano najvišja v primeru suhega lesa ( $w_0=5^\circ\text{M}$ ). Razlika debelin oglja v primeru suhega lesa in lesa začetne vlažnosti  $w_0=20^\circ\text{M}$  znaša po približno eni uri 0,4 cm. Vpliv vlage je najbolj izrazit v prvih 30 minutah. Čas, potreben za dosego določene debeline oglja, je v primeru različnih vlažnosti zelo različen. Tako za enako debelino oglja, na primer 3 cm, potrebuje suh les okoli 8 minut manj kot les z začetno vlažnostjo  $20^\circ\text{M}$ . Omenjeni časovni zamik namreč bistveno vpliva na nosilnost lesenih elementov. Zaključimo lahko, da ima začetna vlažnost pomemben vpliv na oglenenje lesa.





Slika 4 • Primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov debeline oglja.



Slika 5 • Vpliv začetne vlažnosti lesa na debelino oglja pri standardnem požaru.

Vpliv specifične gostote lesa na oglenenje lesenega prereza pri standardnem požaru prikazuje slika 6.

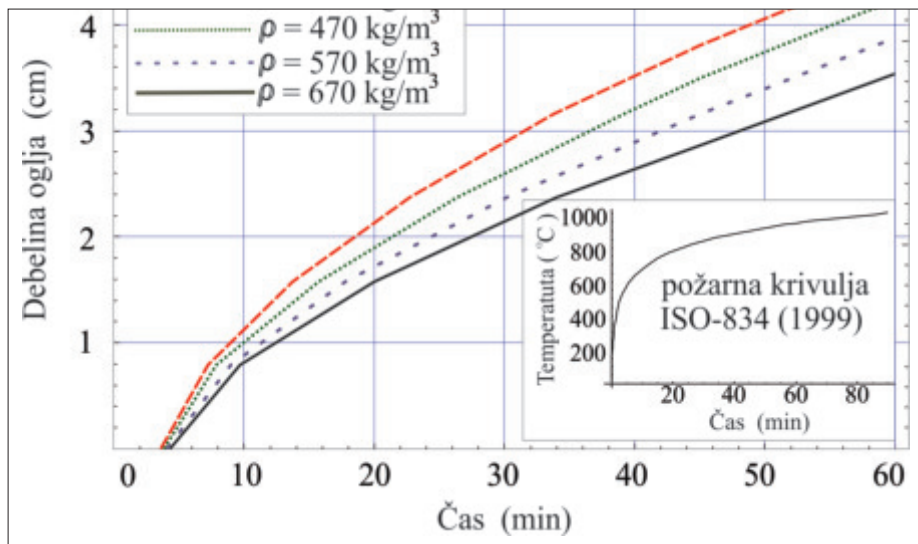
Vidimo, da ima specifična gostota lesa velik vpliv na oglenenje le-tega. Les z višjo gostoto začne ogleneti pozneje in ogleni počasneje kot les z nižjo gostoto. Razlike v debelini oglja se v primeru različnih specifičnih gostot lesa s časom povečujejo. Pri času 60 min. je debelina zoglenelega lesa z  $\rho \approx 370 \text{ kg/m}^3$  približno za 35 % večja kot v primeru, ko je  $\rho \approx 670 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.2 Dvodimenzionalno oglenenje

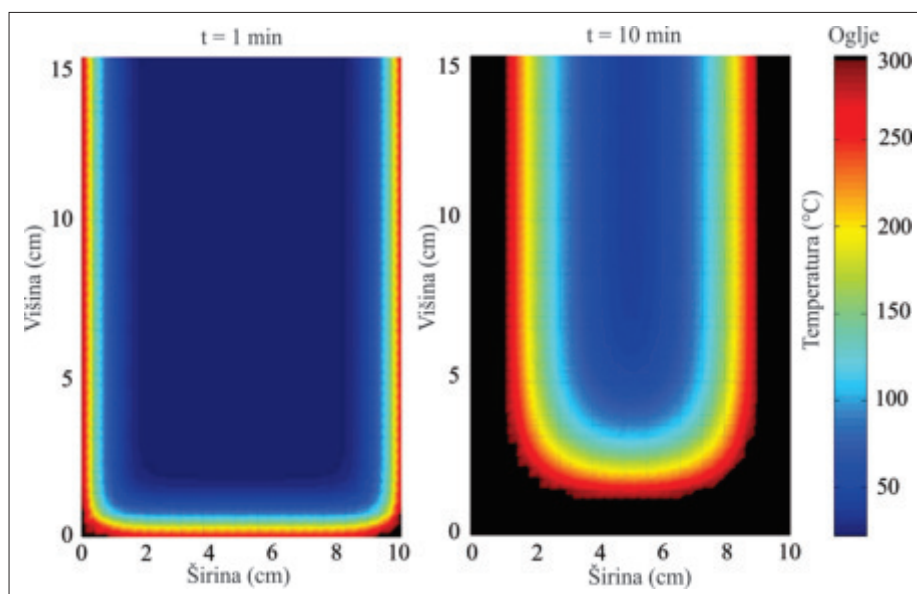
V tem primeru obravnavamo oglenenje homogenega lesenega prečnega prereza, ki je izpostavljen standardnemu požaru (ISO, 1999) s treh strani, medtem ko je zgornji rob prečnega prereza toplotno in vlažnost-

no izoliran. Začetni prečni prerez nosilca je pravokotne oblike dimenzij  $b \times h = 10 \times 15 \text{ cm}$ . Prečni prerez diskretiziramo z ekvidistantno diferenčno mrežo točk. Pri izračunu uporabimo enake materialne lastnosti kot pri enodimenzionalnem primeru. Rezultati simulacije izpostavljenosti pri časih 1, 10, 20 in 30 minut so prikazani na slikah 7 in 8.

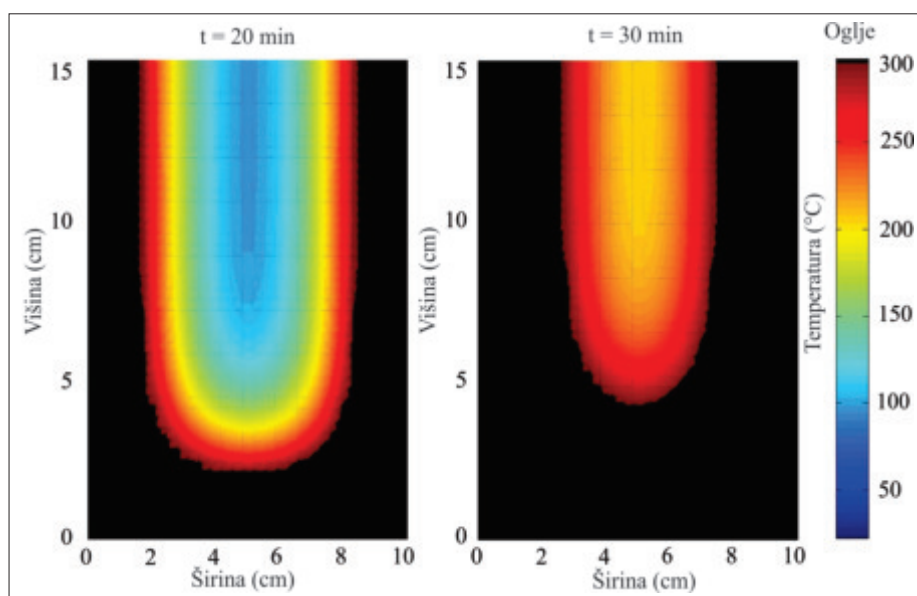
S slike 7 se vidi, da so vogali prečnega prereza izpostavljeni prehodu toplote z dveh strani. Posledično je oglenenje najhitrejše v vogalih prečnega prereza. Tam se namreč tudi vedno začne. Pojavi se tako imenovani zaokrožitveni efekt, ki ima za posledico spreminjanje oblike aktivnega prečnega prereza. Tako začetno pravokoten prečni prerez kmalu po začetku gorenja lesa ni več pravokoten.



Slika 6 • Vpliv specifične gostote lesa na debelino oglja pri standardnem požaru.



Slika 7 • Porazdelitev temperature po prečnem prerezu smrekovega nosilca in degradacija lesa v oglje pri 1. in 10. minuti požara.



Slika 8 • Porazdelitev temperature po prečnem prerezu smrekovega nosilca in degradacija lesa v oglje pri 20. in 30. minuti požara.

## 4 • SKLEP

V članku smo predstavili nov matematični model povezanega prehoda toplote in vlage skozi les, ki je izpostavljen požaru. Model smo uporabili tudi za simulacijo oglenenja lesa. Rezultate predlaganega matematičnega modela smo primerjali z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati v dostopni literaturi. Prišli smo do naslednjih zaključkov:

1. Debelina oglja oziroma hitrost oglenenja se dobro ujema z rezultati Evrokoda 5 (SIST,

2005) in raziskovalcev Whita in Nordheima (White, 1992).

2. Rezultati se prav tako v okviru inženirske natančnosti relativno dobro ujemajo z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati švedskega raziskovalca Fredlunda (Fredlund, 1993). Največje odstopanje zasledimo pri času začetka oglenenja, kar je verjetno posledica različne definicije začetka oglenenja.

3. Rezultati potrjujejo pričakovanje, da začetna vlažnost in specifična gostota lesa vplivata na debelino oglja in hitrost oglenenja. Z večanjem začetne vlažnosti in specifične gostote lesa se hitrost oglenenja manjša in posledično tudi debelina nastalega oglja. Zanimivo je tudi, da je vpliv začetne vlažnosti in gostote lesa na začetek oglenenja praktično zanemarljiv.
4. Matematični model je uporaben za analizo dvodimenzionalnega oglenenja lesenih prečnih prereзов.

## 5 • ZAHVALA

Predstavljeni rezultati so pridobljeni v sklopu dela programske skupine Mehanika konstrukcij (P2-0260), ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za finančno pomoč se ji iskreno zahvaljujemo.

## 6 • LITERATURA

AS 1720.4, Timber structures – Fire resistance of structural timber members, 1990.

Chang, W. J., Weng, C. I., An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3621–3632, 2000.

Fredlund, B., Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire, *Fire Safety Journal*, 20, 39–69, 1993.

Gams, M., Povezan prenos vlage in toplote v poroznem materialu, Diplomski naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, 2003.

ISO 834, Fire-resistance test – Elements of building construction – Part 1. General requirements. ISO 834-1, International organization for standardization, Geneva, Switzerland, 1999.

Janssens, M. L., Modelling of thermal degradation of structural wood members exposed to fire, *Fire and Materials*, 28, 199–207, 2004.

Lau, P. W. C., White, R., Van Zeeland, I., Modelling of charring behaviour of structural lumber, *Fire and Materials*, 23, 209–216, 1999.

Lawson, D. I., Webster, C. T., Ashton, L. A., Fire endurance of timber beams and floors, *Journal of Structural Engineering*, 30(2), 27–34, 1952.

Lecester, R. H., Fire resistance of timber, Part 1 – Performance of timber structures in fire. Workshop on Timber Engineering, Melbourne, Australia, 2-20 May, 1983.

Luikov, A. V., Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Pergamon Press, Oxford, 1966.

Pečenko, R., Svensson, S., Hozjan, T., Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87, 598–605, 2015.

Schaffer, E. L., Charring rate of selected woods-transverse to grain, Research paper FPL-69, USDA Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin, USA, 1967.

Schnabl, S., Mehanska in požarna analiza kompozitnih nosilcev, Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, 2007.

SIST EN 1995-1-2:2005, Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij, 1.–2.del: Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, 2005.

Takeda, H., A model to predict fire resistance of wood-stud walls, *Fire and Materials*, 27, 19–39, 2003.

Turk, G., Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa, Diplomski naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer, 1987.

White, R. H., Nordheim, E. V., Charring rate of wood for ASTM E119 exposure, *Fire Technology*, 28(1), 5–30, 1992.

## 29. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2018



• Udeleženci 29. Mišičevega vodarskega dne v dvorani Narodnega doma Maribor.

V Mariboru so se 6. decembra 2018 že devetindvajsetič srečali vodarji na strokovnem posvetu Mišičev vodarski dan. V Narodnem domu se je zbralo 257 udeležencev, ki se ukvarjajo s problemi vodarstva ali jih razpisane teme kakorkoli zanimajo.

Pozdravni nagovor je v imenu soorganizatorja VGP Drava Ptuj, d. o. o., podala Agata Suhadolnik, ki je predstavila problemska izhodišča in teme posveta.

Zbrane udeležence so nagovorili državni sekretar za področje okolja na MOP RS Simon Zajc, direktor Direkcije RS za vode Tomaž Prohinar in predstavnik Inženirske zbornice Slovenije Franci Avšič.

Teme 29. Mišičevega vodarskega dne so odražale aktualne probleme s področja varstva voda, varstva pred vodami in urejanja voda. Glede na dejstvo, da so velike škode zaradi hidroloških ekstremov, ki se vse pogosteje

pojavi, posledica neustreznih posegov v prostor ter neizvajanja preventivnih posegov v vodni režim, sta bili vodilni temi namenjeni poplavni ogroženosti urbanih območij z meteornimi vodami in urejanju povirij kot ukrep za zmanjšanje erozijske in poplavne ogroženosti.

V prispevkih v okviru prve teme so bili prikazani primeri stanja in načrtovanih ukrepov za zmanjšanje poplavne ogroženosti naselij pred zalednimi vodami, podzemnimi vodami in lastnimi padavinskimi vodami. Osnovna načela upravljanja odtokov padavinskih voda na urbanih območjih so predstavili prof. dr. Jovana Despotovića in kolegi z Građevinske fakultete v Beogradu.

Na temo erozijske in poplavne ogroženosti zaradi nezadostnega urejanja in vzdrževanja povirnih odsekov vodotokov je prispelo 10 prispevkov, od katerih so bili predstavljeni trije.

Obrađnavana je bila problematika zemeljskih plazov, prođonosnosti in transporta plavja v hudourniških vodotokih.

V okviru tretjega sklopa je bilo od 22 prejetih prispevkov podanih 6 referatov s predstavitvijo aktualnih projektov s področja upravljanja in urejanja voda.

Po zaključku posameznih sklopov je potekala zanimiva diskusija med udeleženci posveta, ki so jo morali moderatorji večkrat zaključiti zaradi omejenega časa.

Vsi pisni prispevki so objavljeni v zborniku posveta in dostopni na spletni strani organizatorjev posveta VGB Maribor, d. o. o. (<http://www.vgb.si/p/si/srecanja-in-dogodki/mi-sicev-vodarski-dan.php>), in VGP Drava Ptuj, d. o. o. (<http://www.vgp-drava.si/29-misicev-vodarski-dan-2018/>).

**Predsednik Organizacijskega odbora MVD  
mag. Smiljan JUVAN, univ. dipl. inž. grad.**



• Pozdravni govor Agate Suhadolnik.



• Nagovor državnega sekretarja MOP RS Simona Zajca.



• Direktor Direkcije RS za vode Tomaz Prohinar.



• Predstavniki IZS Franci Avšič.



• Vabljeni predavatelj prof. dr. Jovan Despotović.

# SIBIM 2018 »DOBRODOŠLA PRIHODNOST«

[http://sibim.si/dogodki/siBIM\\_2018](http://sibim.si/dogodki/siBIM_2018)

Združenje SiBIM je 22. 11. 2018 na Brdu pri Kranju izvedlo četrto konferenco z naslovom Dobrodošla, prihodnost! z najštevilčnejšo udeležbo doslej (120 udeležencev). Tradicionalno se konference udeležujejo strokovnjaki s področja uporabe in razvoja Informacijskega modeliranja gradenj (BIM) na področju grajenega okolja (gradbeništvo, strojništvo, elektrotehnika, arhitektura, IT, ekonomija in pravo).

Program konference je bil razdeljen v štiri vsebinske sklope. V prvem sklopu (Sistemska implementacija BIM-pristopa) je bila glavna tema Akcijski načrt uvedbe digitalizacije na področju grajenega okolja v Republiki Sloveniji, ki ga je pripravil MGRT skupaj s SiBIM. Akcijski načrt vsebuje celostno strategijo uvedbe BIM v Sloveniji do leta 2023. Podpore sistemski uvedbi BIM v Sloveniji sta izrazila oba govornika iz tujine, g. Aidan

specifikacije za prometno infrastrukturo. Sklop je smiselno zaključil g. Jurij Mlinar (MOP) s predstavitvijo platforme eGraditev, ki ima možnost razširitve za predajo projektov, kjer je zahtevan BIM.

V sklopu »BIM-rešitve za učinkovito načrtovanje« so udeleženci uvodoma poudarili pomen oddaje projektne dokumentacije v modelni obliki. Predavanje »Blockchain v gradbeništvo: med modo in priložnostjo«, ki ga je izvedel prof. dr. Žiga Turk (FGG), je prikazalo uporabne možnosti povezave tehnologije Blockchain z digitalno podprtimi procesi v gradbeništvo. Naslednji predavitvi, »BIM ali kako izboljšati uporabniško izkušnjo arhitektov z JUB-om« (JUB) in »Deltabloc BIM solutions for safety barriers« (Deltabloc), sta pozitivno presenetili, ker predstavljata novo aplikacijo BIM na področju gradbenih materialov in izdelkov. Predavanje »BIM – Digitalni dvojček realnih prostorov – Digital twins« (Špica international) so bili refleksija na pomembne koncepte digitalne družbe (digitalni dvojček, internet stvari) in prednosti, ki jih prinaša (testiranje zapletenih proizvodnih procesov v virtualnem svetu).

Sklop »Primeri uporabe BIM-pristopa« je uravnoteženo prikazal uporabo BIM na področju infrastrukturnih projektov (mostovi, podzemne gradnje, stanovanjska gradnja, projektiranje električnih inštalacij). Sklop je zaključil predstavnik BIM Alijanse (Združenje za BIM iz BiH).

Sklop »Programska BIM-orodja« je postregel s komercialnimi predstavivami uspešnih primerov uporabe programskih orodij za BIM (ViewPoint, AllPlan, Bixel manager).

**doc. dr. Andrej Tibaut, univ. dipl. inž. rač in inf.**



Uvodoma sta udeležence pozdravila predsednik SiBIM dr. Andrej Tibaut (UM FGPA) in g. Jernej Salecl, predstavnik častnega pokrovitelja Ministrstva za gospodarski razvoj in tehnologijo RS. Oba sta izrazila podporo aktivnostim SiBIM, ki pomembno prispeva k uporabi BIM-pristopa za javne in zasebne investicije kot potrební pogoj za povečanje kakovosti in učinkovitosti na področju grajenega okolja v ekonomskih, okoljskih in energetskih pogledih.

Mercer (direktor marketinga, BuildingSMART International) in ga. Birgitta Schock (vodja BuildingSMART Switzerland). V nadaljevanju sklopa je dr. Samo Medved (Lineal) podrobno predstavil akcijski načrt. Pričakuje se, da bi Vlada RS čim prej potrdila izvajanje aktivnosti iz akcijskega načrta. BIM-pristop zahteva uporabo poenotениh klasifikacij za gradbene aktivnosti, sisteme, elemente in materiale, zato je ga. Ksenija Marc (DRI) predstavila tehnične



# NOVI DIPLOMANTI

## I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Simon Krnc**, Projekt organizacije gradnje enodružinske hiše v Trnovem, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=106353>

## I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

**Kaja Cipot**, Analiza izbranega krožnega križišča v Murski Soboti in predlog za izboljšanje stanja, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor mag. Simon Detellbach; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=106361>

**Filip Gruden**, Analize izračunanih energetske izkaznic različnih stavb, mentor izr. prof. dr. Roman Kunič, somentor asist. David Božiček; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=106364>

**Anja Opara**, Bazaltna armatura za ojačenje betonskih konstrukcij, mentor doc. dr. Drago Saje; <https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=106366>

## I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Alen Bevc**, Ponudbeni predračun za gradnjo poslovno-stanovanjske stavbe s podporo programa za gradbene kalkulacije, mentorica doc. dr. Nataša Šuman, somentor asist. dr. Zoran Pučko; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=73107>

## I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

Študij je z diplomskim izpitom zaključila:

**Karmen Kolarič**

## II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVA

**Mitja Furman**, Izdelava BIM-modela lesene montažne hiše in povezljivost s CNC-stroji, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorja asist. Damjan Maučec in Željko Vene; <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=73080&lang=eng>

Rubriko ureja • Eva Okorn, [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net)

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge  
za objavo na e-naslov: **gradb.zveza@siol.net**