

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Nikola Oreb

**ANALIZA ODRŽIVE GRADNJE PONOVNOM
UPOTREBOM ČELIČNIH PLATFORMI
TORANJSKIH SKELA ZAGREBAČKE
KATEDRALE**

Zagreb, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Katedri za metalne konstrukcije, Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Davora Skejića, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Proizvodnja čelika i čeličnih proizvoda	1
1.2. Održiva gradnja	2
1.3. Obnova Grada Zagreba nakon potresa	5
1.3.1. Potresi u Zagrebu i Petrinji	5
1.3.2. Obnova nakon potresa	6
2. HIPOTEZA I CILJ ISTRAŽIVANJA	9
3. METODE ISTRAŽIVANJA	11
4. ŽIVOTNI CIKLUS ČELIKA.....	13
4.1. Procjena životnog ciklusa	13
4.2. Ponovna upotreba čelika	16
4.3. Primjeri iz prakse.....	18
4.3.1. Primarna transformatorska stanica Brent Cross Town.....	18
4.3.2. Obnova centra Elephant and Castle Town.....	20
4.3.3. Uredska zgrada Holbein gardens	21
5. ANALIZA RJEŠENJA KONSTRUKCIJE ČELIČNE GRAĐEVINE	23
5.1. Općenito o građevini	23
5.1.1. Varijantna rješenja građevine	23
5.1.2. Građevina od novih elemenata	23
5.1.3. Ponovna upotreba dijela platforme skele Zagrebačke katedrale ..	24
5.2. Analiza opterećenja	29
5.2.1. Analiza opterećenja za Zagreb	29
5.2.2. Analiza opterećenja za Pag	33
5.3. Primjer dimenzioniranja glavnih konstrukcijskih elemenata građevine	38
5.4. Slučaj 1 – Proračun konstrukcije nove građevine (Zagreb).....	51

5.4.1. Unutarnje sile u elementima	51
5.4.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti	52
5.4.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti	53
5.4.4. Utrošak materijala.....	53
5.5. Slučaj 2 – Proračun konstrukcije građevine – ponovna upotreba (Zagreb)	55
5.5.1. Unutarnje sile u elementima	55
5.5.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti	57
5.5.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti	60
5.5.4. Utrošak materijala.....	60
5.6. Slučaj 3 – Proračun konstrukcije građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Zagreb).....	63
5.6.1. Unutarnje sile u elementima	63
5.6.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti	65
5.6.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti	67
5.6.4. Utrošak materijala.....	68
5.7. Slučaj 4 – Proračun konstrukcije nove građevine (Pag).....	70
5.7.1. Unutarnje sile u elementima	70
5.7.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti	72
5.7.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti	73
5.7.4. Utrošak materijala.....	74
5.8. Slučaj 5 – Proračun konstrukcije građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Pag).....	75
5.8.1. Unutarnje sile u elementima	75
5.8.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti	78
5.8.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti	80
5.8.4. Utrošak materijala.....	80

5.9. Rezime rezultata analiziranih slučajeva	83
6. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA RJEŠENJA GRAĐEVINE	84
6.1. LCA građevine – novi elementi (Zagreb), Slučaj 1	84
6.1.1. Modul A.....	84
6.1.2. Modul B	85
6.1.3. Modul C	85
6.1.4. Modul D	86
6.2. LCA građevine – ponovna upotreba (Zagreb), slučaj 2	87
6.2.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale.....	87
6.2.2. Modul A.....	88
6.2.3. Modul C	89
6.2.4. Modul D	90
6.3. LCA građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Zagreb), slučaj 3. 91	
6.3.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale.....	91
6.3.2. Modul A.....	91
6.3.3. Modul C	93
6.3.4. Modul D	94
6.4. LCA nove građevine (Pag), slučaj 4	95
6.4.1. Modul A.....	95
6.4.2. Modul C	96
6.4.3. Modul D	97
6.5. LCA građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Pag), slučaj 5.....	98
6.5.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale.....	98
6.5.2. Modul A.....	98
6.5.3. Modul C	100
6.5.4. Modul D	101

7.	USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA	102
7.1.	Usporedba rješenja konstrukcije građevine locirane u Zagrebu	102
7.1.1.	Utrošak materijala konstrukcijskih rješenja	102
7.1.2.	Iskoristivost elemenata kod različitih konstrukcijskih rješenja	104
7.1.3.	Rezultati LCA.....	106
7.2.	Usporedba rješenja konstrukcije građevine locirane na Pagu	109
7.2.1.	Utrošak materijala konstrukcijskih rješenja	109
7.2.2.	Iskoristivost elemenata konstrukcijskih rješenja	111
7.2.3.	Rezultati LCA.....	112
7.3.	Usporedba rješenja optimalizacije ponovne upotrebe u Zagrebu i na Pagu (slučajevi 3 i 5)	115
7.3.1.	Usporedba iskoristivosti elemenata platforme skele i emisija CO ₂ uslijed transporta.....	115
7.3.3.	Usporedba razlike količine čelika za građevine u Zagrebu i na Pagu	117
7.4.	Rezime prikazanih rezultata	118
8.	ZAKLJUČAK.....	120
8.1.	Zaključci iz provedenih analiza.....	120
8.2.	Preporuke za daljnja postupanja i istraživanja	123
	ZAHVALE.....	124
	POPIS LITERATURE.....	125
	POPIS SLIKA.....	128
	POPIS TABLICA	130
	SAŽETAK.....	133
	SUMMARY	135

1. UVOD

1.1. Proizvodnja čelika i čeličnih proizvoda

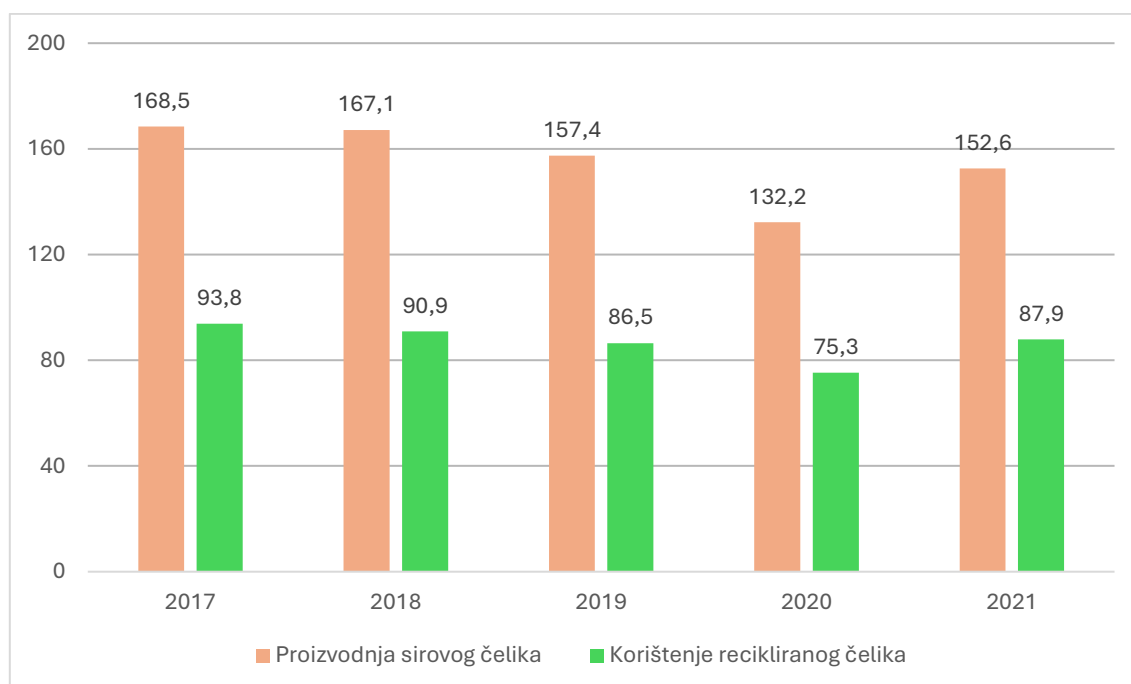
Povoljna svojstva i širok izbor proizvoda svrstavaju čelik u nezaobilazan materijal u području graditeljstva, strojarstva, brodogradnje, elektrotehnike i drugih područja. U građevinarstvu čelik ima jako širok spektar primjene, a neke od najvažnijih konstrukcija u kojima se upotrebljava su: hale, zgrade, mostovi, stupovi dalekovoda, silosi i rezervoari [1]. Čelik kao materijal pokazuje odlične karakteristike u pogledu ekonomičnosti, fleksibilnosti i utjecaja na okolinu. Čelični elementi pokazuju povoljan odnos čvrstoće i težine, a ukupno vrijeme izgradnje čeličnih konstrukcija je kratko (uključujući izradu elemenata i njihovu montažu). Nadalje, već izgrađene konstrukcije mogu se jednostavno održavati, obnavljati ili modificirati. Jednom kad konstrukcija, ili njezin dio, više nije potrebna na postojećoj lokaciji, može se ponovno koristiti na drugom mjestu [2].

Prema IEA (*International Energy Agency*) [3] jedna tona novoproducenog čelika danas rezultira prosječno 1,4 tone emisije ugljikovog dioksida. Međutim, jedna od velikih prednosti čelika kao materijala je višestruka mogućnost reciklaže, odnosno proizvodnja novog čelika iz otpadnog čelika. Koristeći otpadni čelik pri proizvodnji, emisije ugljikovog dioksida manje su za oko 58% u odnosu na proizvodnju čelika iz rude, uz dodatnu prednost – smanjenje upotrebe prirodnih resursa. Zagađivanje zraka smanjeno je za oko 86%, a uz to se pri proizvodnji koristi i 40% manje vode [4].

Iz navedenih podataka zaključuje se da korištenje recikliranog čelika može imati značajne pozitivne utjecaje na okoliš. Prema BIR – u (eng. *Bureau of International Recycling*) [5], zadnjih godina se u državama članicama Europske unije uočava trend porasta količine recikliranog čelika u ukupnoj proizvodnji novog čelika, što je prikazano u tablici 1.1 te ilustrirano na grafu na slici 1.1. Količine su prikazane u milijunima tona.

Tablica 1.1 – Količina proizvodnje čelika iz rude i količina recikliranog čelika u EU [5]

-	2017	2018	2019	2020	2021
Proizvodnja sirovog čelika	168,5	167,1	157,4	132,2	152,6
Korištenje recikliranog čelika	93,8	90,9	86,5	75,3	87,9
Omjer reciklirani/sirovi u %	55,5	54,4	55,0	57,0	57,6



Slika 1.1 – Usporedba odnosa proizvodnje iz recikliranog čelika i iz rude [5]

1.2. Održiva gradnja

Značaj održive gradnje i utjecaja svih faza građevinarstva na okoliš zadnjih godina je značajno porastao. Održiva gradnja podrazumijeva gradnju koja zadovoljava potrebe sadašnjih generacija bez ugrožavanja budućih naraštaja, odnosno njihove mogućnosti da zadovolje svoje potrebe [6]. Ipak, građevinski sektor je u 2023. godini bio odgovoran za 37% ukupne emisije CO₂. Dosada se najviše pažnje pridavalo smanjenju emisija nastalih zbog grijanja, hlađenja i električne energije, koje su se proteklih desetljeća smanjile sa 75% na 50%. Međutim, smanjivanje emisija nastalih

zbog proizvodnje i korištenja građevinskih materijala je u odnosu na te brojke značajno manje. Razlozi tomu su kompleksni i uključuju jako puno faktora [7]. Glavna metoda za smanjivanje tih emisija je prelazak sa linearnog na kružno gospodarstvo, čije faze su prikazane na slici 1.2.



Slika 1.2 – Prikaz faza kružnog gospodarstva [6]

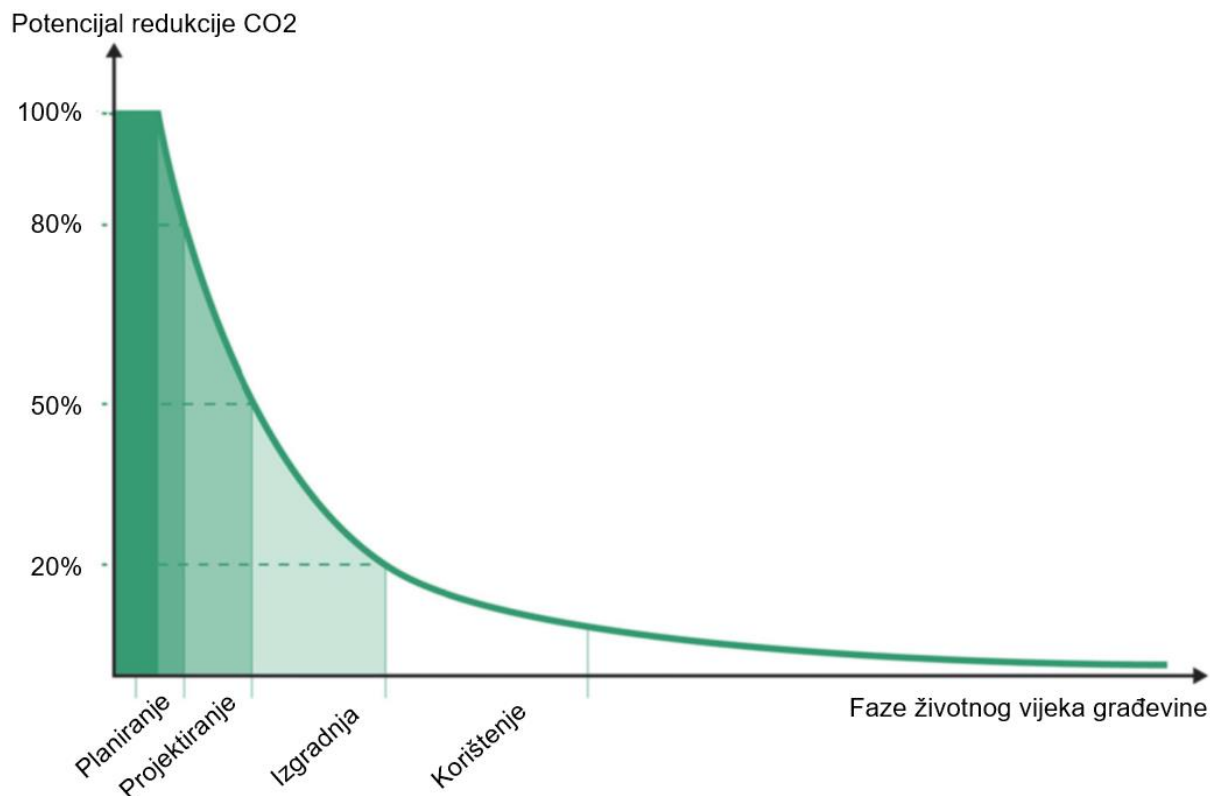
Primarni cilj kružnog gospodarstva je koristiti postojeće proizvode što je dulje moguće. Na primjeru građevine, taj cilj se može ostvariti koristeći 4 strategije [8]:

- koristiti građevinu što je dulje moguće (uz propisano održavanje)
- ojačati ili rekonstruirati građevinu in-situ (ukoliko dođe do prenamjene ili promjene minimalnih uvjeta na građevinu)
- demontirati dio, ili cijelu građevinu te ponovno iskoristiti njezine elemente
- reciklirati materijal i od njega proizvesti nove elemente

Koliko će neka od navedenih strategija biti učinkovita ovisi o samom projektnom zadatku, uvjetima koje je potrebno ispuniti i parametrima koje primarno želimo optimizirati. Nijedna od strategija nije idealna, te se često najbolje rješenje može dobiti korištenjem više njih istovremeno.

Nadalje, nije moguće jednako utjecati na smanjivanje emisija ugljikovog dioksida u svim fazama životnog vijeka konstrukcije. Najveći utjecaj moguće je ostvariti u fazi planiranja građevine, međutim daljnjim fazama (projektiranje, izgradnja,

korištenje i održavanje) mogućnost smanjivanja emisija eksponencijalno pada, što se može vidjeti na grafu na slici 1.3 koji daje Institut inženjera građevinarstva (eng. *The Institution of Structural Engineers*) [9].



Slika 1.3 – Odnos potencijala redukcije CO₂ i faza životnog vijeka građevine [9]

Dakle, adekvatnim planiranjem i pažljivim projektiranjem moguće je značajno smanjiti emisije ugljikovog dioksida, a ta mogućnost ubrzano pada već u odmaklim koracima projektiranja. Ulaženjem u proces izgradnje građevine smatra se da je ta mogućnost ispod 50 %, a jednom kada konstrukcija krene u fazu korištenja ispod 20%.

1.3. Obnova Grada Zagreba nakon potresa

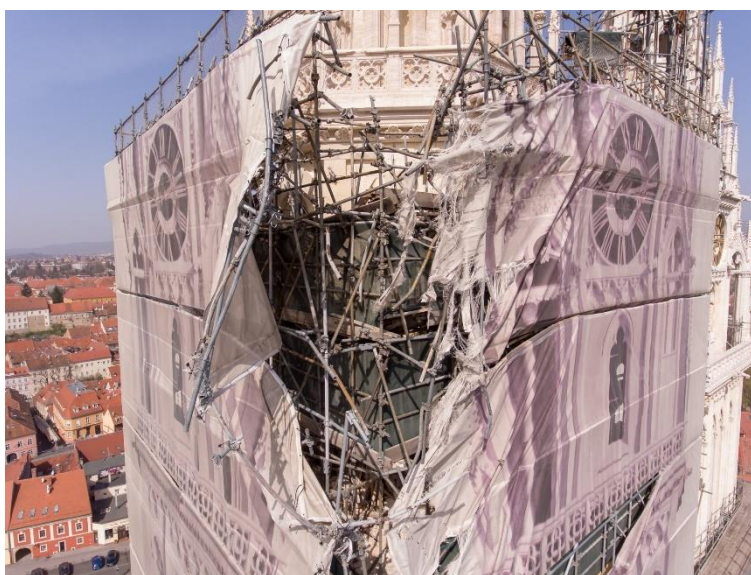
1.3.1. Potresi u Zagrebu i Petrinji

Grad Zagreb je 22. ožujka 2020. godine pogodio potres magnitude 5.5 po Richteru. Epicentar potresa bio je na Markuševcu. Potres je uzrokovao oštećenja na mnogim građevinama, a osobito u području jezgre grada (slika 1.4).



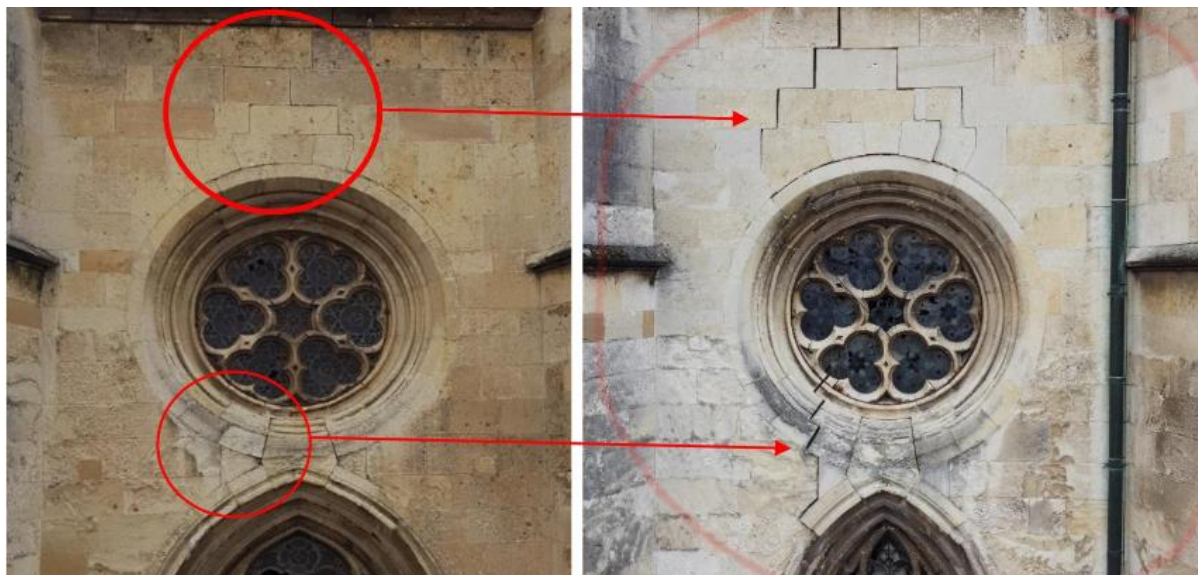
Slika 1.4 – Oštećenja zgrada u potresu [10, 11]

Potres je također uzrokovao teška oštećenja na Zagrebačkoj katedrali. Izazvao je rušenje kamenog vrha južnog tornja, a lom se dogodio u visini lanterne na 92 metra. Također je srušen dio zvonika visine 10,30 metara na čijem vrhu se nalazio pozlaćeni križ. Odlomljeni kameni elementi oštetili su tadašnju postojeću skelu katedrale (slika 1.5), a oštećen je i dio treće galerije te krovne katedrale [12].



Slika 1.5 – Oštećenje tadašnje skele katedrale u potresu [13]

Krajem iste godine, preciznije 29.12.2020. u 12 sati i 19 minuta razoran potres magnitude 6,2 prema Richteru pogodio je okolicu Petrinje. Od potresa je stradalo sedmero ljudi te je došlo do značajne materijalne štete u Petrinji, Sisku, Glini i okolnim mjestima [14]. Potres je također izazvao dodatna oštećenja na Zagrebačkoj katedrali, a povećanje oštećenja uslijed petrinjskog potresa može se vidjeti na slici 1.6 [13].



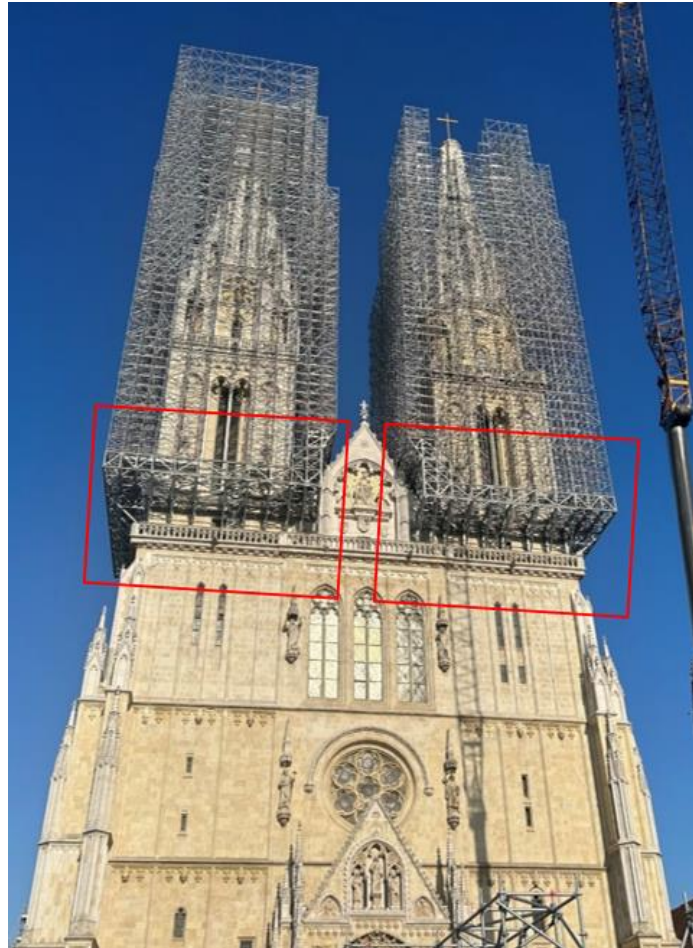
Slika 1.6 – Povećanje pukotina na sjeveroistočnoj strani apside nakon potresa u Petrinji [13]

Katedrala je, kao i brojne druge građevine, poslije ovih potresa zatvorena za javnost, te je morala biti urgentno obnovljena.

1.3.2. Obnova nakon potresa

Obnova nakon potresa pred građevinsku struku postavila je mnoge izazove. U prelaženju preko tih izazova čelik se pokazao kao odličan i zahvalan materijal, jer široka paleta čeličnih proizvoda omogućuje prilagodbu gotovo svim zahtjevima rekonstrukcije građevine. Vrlo je bitna i činjenica da primjena čelika, pogotovo kod povijesnih građevina, predstavlja gotovo jedino rješenje koje omogućava uklanjanje elementa bez oštećivanja postojeće građevine. Sanacije se kod zidanih i armiranobetonskih građevina mogu izvoditi npr. korištenjem čeličnih prstenova ili traka, kutnika ili C –profila [15]. Zbog brojnih prednosti čelika prilikom rekonstrukcija građevina, broj privremenih konstrukcija kao što su skele značajno je porastao u obnovi. Skela se definira kao pomoćna konstrukcija koja služi za izradu ili održavanje

građevina, a danas se najčešće upotrebljavaju metalne skele [16]. Pritom se u obnovi na monumentalnim građevinama posebnog značaja ili oblika, često uz standardne dijelove skele zahtijevaju i dijelove posebne geometrije i namjene.



Slika 1.7 – Skela tornjeva zagrebačke katedrale [17]

Primjer takve skele je ona za obnovu Zagrebačke katedrale. U podnožju tornjeva katedrale nalaze se platforme za oslanjanje, na slici 1.7 označene crvenom bojom, a na njima su postavljene dvije modularne cijevne skele. Modularne cijevne skele pravi su primjer ponovne upotrebe čeličnih konstrukcija.

Platforme za toranjske skele za katedralu su pričvršćene konzolnim okvirima koji se sastoje od stupa, konzolnog nosača i podupirača, pri čemu svaki dio čini jednu sastavnu jedinicu. U platformi se nalazi 25 konzolnih okvira, a svaki okvir je usidren na tri mjesta u konstrukciju katedrale od kamena [18]. Na slici 1.8 detaljnije je prikazana je platforma toranjske skele.



Slika 1.8 – Konstrukcija platforme toranjske skele Zagrebačke katedrale [18]

Osim broja skela, u obnovi je porastao i broj konstrukcija za ojačanja i podupiranja dijelova zgrade. Primjer takve konstrukcije je čelična konstrukcija za podupiranje Nadbiskupskog dvora uz Zagrebačku katedralu, na Kaptolu, a prikazana je na slici 1.9.



Slika 1.9 – Čelična konstrukcija za podupiranje Nadbiskupskog dvora na Kaptolu

2. HIPOTEZA I CILJ ISTRAŽIVANJA

Građevinska struka susreće se s brojnim izazovima. Zadnjih godina naglašava se značaj održive gradnje i razmišljanja o budućnosti tijekom projektiranja, a građevinarstvo prednjači po količini emisije CO₂. Još jedan primjer izazova s kojima se građevinska struka svakodnevno suočava su izvanredni događaji, koji iako se pojavljuju rijetko, mogu imati velike posljedice na socijalnu i ekonomsku stabilnost društva. Stoga obnova građevina nakon izvanrednih događaja predstavlja opsežan pothvat, koji se treba provesti kvalitetno i u što kraćem roku. Prilikom obnove koristi se mnogo privremenih konstrukcija te se postavlja pitanje mogu li se te konstrukcije iskoristiti i poslije obnove. Stoga je cilj ovog rada ujediniti ova dva izazova i kroz primjer čelične platforme skele za obnovu tornjeva Zagrebačke katedrale od potresa analizirati kako se ponovnom upotrebom čeličnih konstrukcija može pozitivno utjecati na okoliš te smanjiti emisije CO₂ i građevinskog otpada.

U radu će se istražiti različiti slučajevi pri projektiranju i izgradnji nove čelične konstrukcije te utjecaji tih slučajeva na okoliš. Pritom je krovna konstrukcija nove građevine (približno) jednaka u svim slučajevima, te je projektirana od novoproduzvenih elemenata. Ostatak građevine različit je od slučaja do slučaja, a promatrani slučajevi navedeni su u nastavku:

1. Izgradnja čelične konstrukcije od novoproduzvenog čelika u Zagrebu
2. Izgradnja čelične konstrukcije ponovnom upotrebom elemenata platforme skele katedrale u Zagrebu
3. Izgradnja čelične konstrukcije optimizacijom ponovne upotrebe elemenata platforme skele katedrale u Zagrebu
4. Izgradnja čelične konstrukcije od novoproduzvenog čelika na Pagu
5. Izgradnja čelične konstrukcije optimizacijom ponovne upotrebe elemenata platforme skele katedrale na Pagu

Cilj rada je sagledati izazove kod ponovne upotrebe čelika za izradu novih konstrukcija te usporediti utjecaje različitih rješenja istog zadatka. U radu su se također promatrane dvije različite lokacije nove građevine – u gradu Zagrebu i na otoku Pagu. Dvije lokacije odabrane su kako bi se usporedila rješenja konstrukcije koja je izložena različitom opterećenju – većim opterećenjem snijegom u Zagrebu, odnosno većim

vjetrom na Pagu. Zbog različitih lokacija također će se usporediti drukčiji zahtjevi transporta. LCA analizom svakog projektnog rješenja usporediti će se njihovi utjecaji na okoliš, a također će se usporediti ekonomičnost svakog rješenja. S obzirom da je jako puno građevina Grada Zagreba trenutno u obnovi od potresa, cilj rada je također dati preporuke za postupanje s pomoćnim, privremenim konstrukcijama nakon obnove i pokazati kako se ponovnom upotrebom čeličnih elemenata i sklopova mogu dobiti efikasna rješenja, koja se uz to poklapaju sa globalnim ciljevima prelaska građevinarstva s linearnog na kružno gospodarstvo.

Ponovna upotreba čelika jednostavnija je i optimalnija ukoliko se čelični elementi ponovno koriste u istom tipu konstrukcije (npr. ponovna upotreba elemenata hale u novoj konstrukciji hale). Slični tipovi i skupine elemenata, kao što su stupovi, elementi vezova za stabilizaciju hale ili podrožnice projektiraju se određenih duljina i dimenzija na način da konstrukcija koju čine zadovolji uvjete dane projektom. Ukoliko se ti elementi žele ponovno koristiti u nekoj novoj hali, oni će imati više – manje istu funkciju i samim time ih je jednostavno uklopiti u novu konstrukciju. Značajno je teže ponovno koristiti čelične elemente koji će u novoj konstrukciji imati drukčiju funkciju, jer za tu funkciju nisu projektirani. Obnova Grada Zagreba je trenutno u tijeku, a njome raste broj čeličnih elemenata u privremenim konstrukcijama koje su trenutno potrebne za stabilizaciju građevina i broj skela, međutim završetkom obnove te konstrukcije potencijalno postaju građevinski otpad. Zbog težine zadatka ponovne upotrebe privremenih konstrukcija, u radu su analizirane studije slučaja upravo jedne takve konstrukcije, čelične platforme za toranjske skele Zagrebačke katedrale. Pritom će se čelične platforme ponovno upotrijebiti kao dio trajne građevine. Za svaki od pet analiziranih slučajeva napraviti će se proračun konstrukcije i procjena životnog ciklusa konstrukcije te usporediti dobiveni rezultati. Tako će se na primjeru reprezentativne konstrukcije potresne obnove Grada Zagreba analizirati ekonomske i ekološke prednosti ponovne upotrebe čeličnih konstrukcija.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

U radu su analizirana različita rješenja projektnog zadatka nove čelične konstrukcije, te kako ona utječu na bitne izlazne parametre: utrošak materijala i utjecaj građevine na okoliš smanjivanjem emisija CO₂ i smanjivanjem količine građevinskog otpada. Kako bi se mogao odrediti utjecaj građevine na okoliš, prije samih rješenja dana je pozadina procjene životnog ciklusa (LCA – *life cycle assessment*) građevina te ponovne upotrebe čeličnih elemenata.

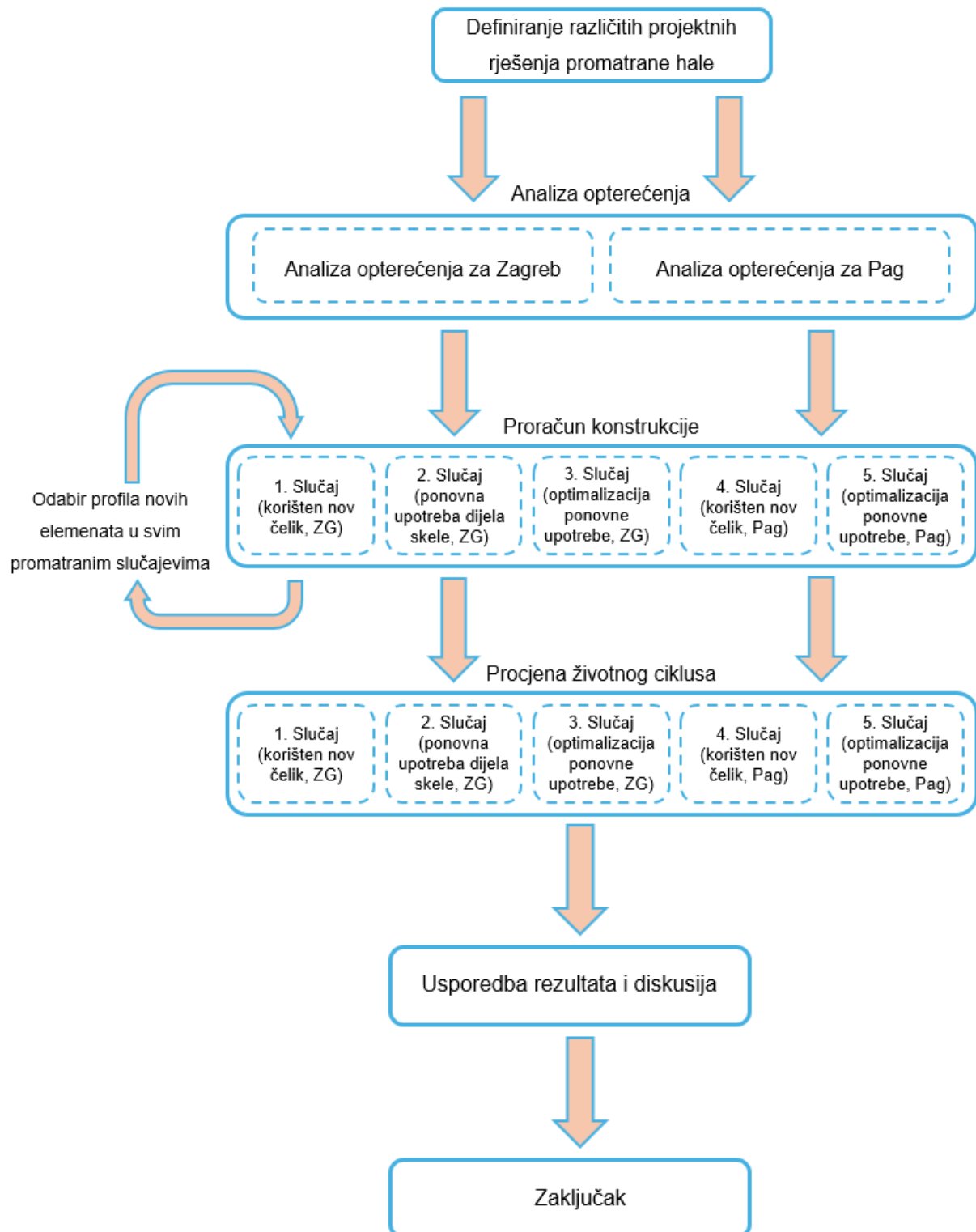
Definirani plan istraživanja podijeljen je u nekoliko koraka:

- 1) Na temelju proučene literature definirane su osnove procjene životnog ciklusa građevine i ponovne upotrebe čeličnih elemenata/sklopova.
- 2) Definirani su različiti slučajevi konstrukcija analizom kojih će se dobiti relevantni podaci o njihovom utjecaju na okoliš.
- 3) Za razmatrane slučajeve provedeni su proračuni mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcija te procjena njihovog životnog ciklusa.
- 4) Na temelju provedenih studija slučaja dobiveni su kvantitativni rezultati te je njihovom diskusijom i usporedbom donesen zaključak.

Struktura istraživanja prikazana je na slici 3.1. Nakon definiranja projektnih rješenja promatrane građevine i analize opterećenja, slijedi proračun konstrukcije. U svakom promatranom slučaju koriste se (u potpunosti ili u kombinaciji sa ponovno upotrijebljenim) novi elementi. Zato je proračun konstrukcije iterativan postupak u kojem se novi elementi odabiru na način da imaju optimalnu iskoristivost (slika 3.1). Zatim je napravljena procjena životnog ciklusa, a na kraju usporedba rezultata i diskusija te zaključak.

Nakon provedenog proračuna različitih rješenja građevine i LCA analize, dobiveni rezultati pokazati će ekonomske i ekološke prednosti ponovne upotrebe čelika odnosno prelaska na kružno gospodarstvo u građevinskoj industriji. Na primjeru ponovne upotrebe dijela čelične platforme skele Zagrebačke katedrale postaviti će se temelji odgovora na pitanja što čeka grad Zagreb nakon potresne obnove. Nadalje, pokazati će se na koji način je moguće spriječiti gomilanje građevinskog otpada koji

će se stvarati završetkom upotrebe privremenih konstrukcija, pritom značajno reducirajući emisije ugljikovog dioksida kojima građevinska industrija prednjači.



Slika 3.1 – Struktura istraživanja

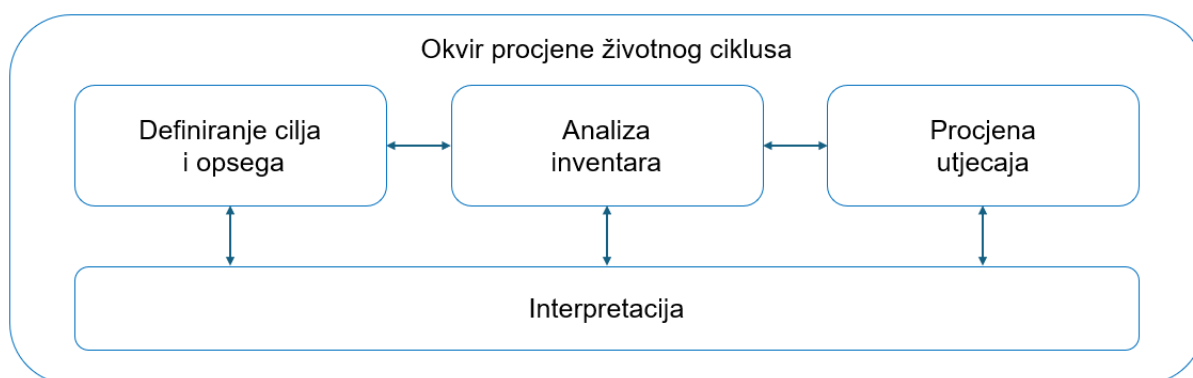
4. ŽIVOTNI CIKLUS ČELIKA

4.1. Procjena životnog ciklusa

Procjena životnog ciklusa (LCA – *life cycle assessment*) podrazumijeva „skupljanje i ocjenjivanje ulaznih veličina, izlaznih veličina i potencijalnih utjecaja na okoliš proizvodnog sustava kroz čitav njegov životni ciklus“ [19, str 14.]. Obuhvaća čitav životni ciklus proizvoda, od proizvodnje materijala iz sirovine i upotrebe, do prerade na kraju životnog vijeka i zbrinjavanja. Korektnom analizom mogu se otkriti i izbjeći mogući negativni utjecaji na okoliš u određenom razdoblju životnog vijeka materijala [19]. U građevinskoj industriji, LCA se najčešće koristi kako bi se procijenio utjecaj odabira materijala i projektnog rješenja na okoliš, usporedio utjecaj različitih proizvoda na okoliš ili procijenile prednosti upotrebe novih proizvoda i/ili projektnih rješenja. Rezultati analize mogu ukazati na dijelove konstrukcije koji imaju značajne utjecaje na okoliš [20]. Prema normi ISO 14040 [19], okvir procjene životnog ciklusa može se podijeliti u 4 faze:

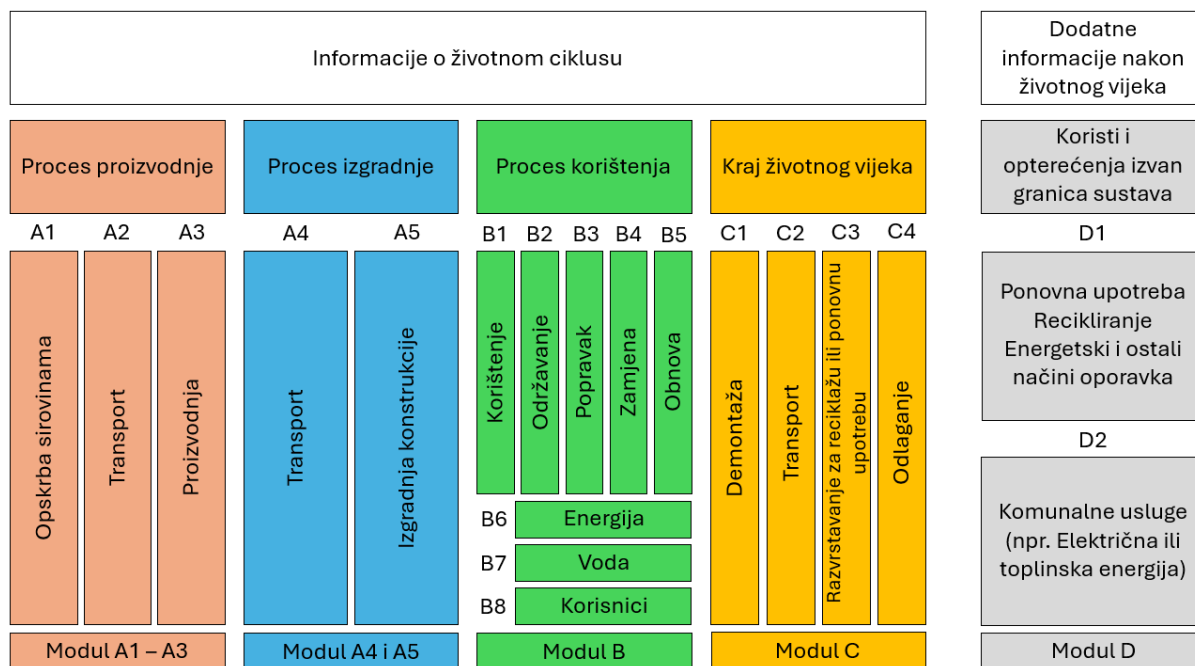
- definiranje cilja i opsega
- analiza inventara
- procjena utjecaja
- interpretacija

Navedene faze su međusobno ovisne, što znači da rezultati jedne faze utječu na ulazne podatke i rezultate drugih faza (slika 4.1).



Slika 4.1 – Okvir procjene životnog ciklusa [19]

Kako bi se opisao utjecaj građevine na okoliš, njezin životni ciklus potrebno je podijeliti u faze. Norma HRN EN 17472 [21] za LCA analizu dijeli životni ciklus građevine u 3 modula: Modul A, B i C. Modul D predstavlja utjecaj građevine na okoliš nakon njenog životnog vijeka, odnosno njezin potencijal za ponovnu upotrebu ili reciklažu materijala. Navedeni moduli i faze životnog vijeka prikazane su na slici 4.2, a detaljnije su objašnjene u nastavku.



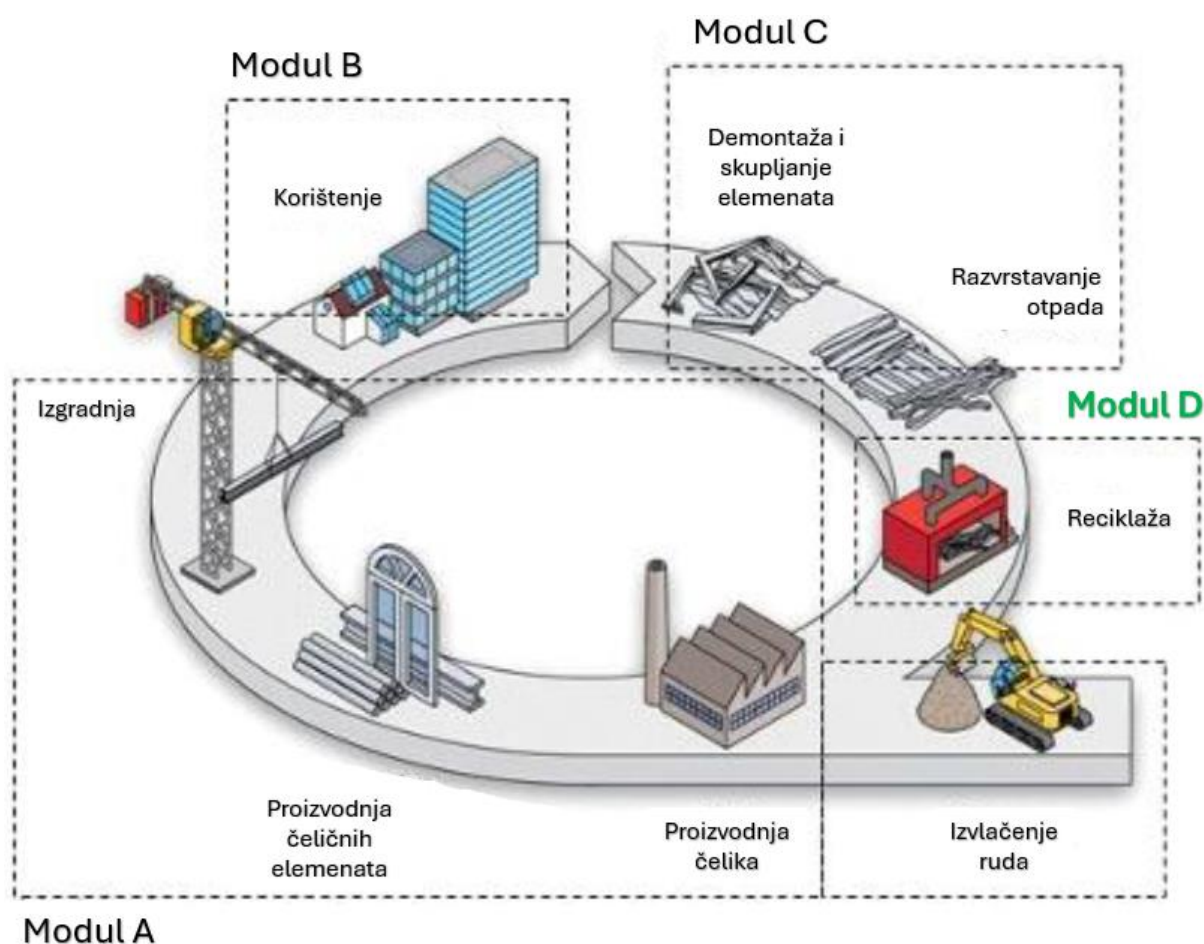
Slika 4.2 – Faze životnog ciklusa i moduli A – D [21]

Prva faza životnog vijeka predstavlja nabavljanje sirovina za proizvodnju, njihov transport do pogona za proizvodnju i proizvodnju samih elemenata (moduli A1 – A3). Faza izgradnje konstrukcije podrazumijeva transport elemenata do gradilišta te njihovo postavljanje, odnosno montažu na gradilištu (moduli A4 i A5).

Modulom B uzet je u obzir period korištenja građevine, koji podrazumijeva utjecaj ugrađenih elemenata koji se koriste (B1) te održavanje istih (B2), popravak (B3), ili zamjena (B4) dijelova koji su oštećeni ili su kraćeg uporabnog vijeka od ostatka građevine. Dio B5 predstavlja obnovu konstrukcije ili njezinih dijelova, naprimjer obnovu antikorozivne zaštite čeličnog elementa. Korištenje električne energije (npr. zbog upotrebe kрана) ili vode tijekom uobičajenog korištenja građevine uzeto je u obzir modulima B6 i B7, a utjecaj korisnika građevine B8.

Modul C predstavlja utjecaj građevine na okoliš na kraju njenog životnog vijeka, odnosno utjecaj zbog demontaže ili rušenja građevine (C1), transporta demontiranih elemenata ili otpada koji je nastao rušenjem na deponij otpadnih dijelova (C2), razvrstavanje građevinskog otpada za ponovnu upotrebu ili reciklažu (C3) te upravljanje deponijem (C4).

Modul D je dodatni dio procjene životnog ciklusa te se njime daju mogućnosti ponovne upotrebe ili recikliranja proizvoda ili elemenata koji su korišteni u građevini, što je jako bitno za čelične konstrukcije koje u tom pogledu imaju veliki potencijal [22]. Na slici 4.3 vidi se značaj čelika u modelu kružnog gospodarstva u građevinarstvu, ali i modula D u samoj procjeni životnog ciklusa, čiji podaci mogu biti jako korisni pri proizvodnji elemenata za novu konstrukciju.



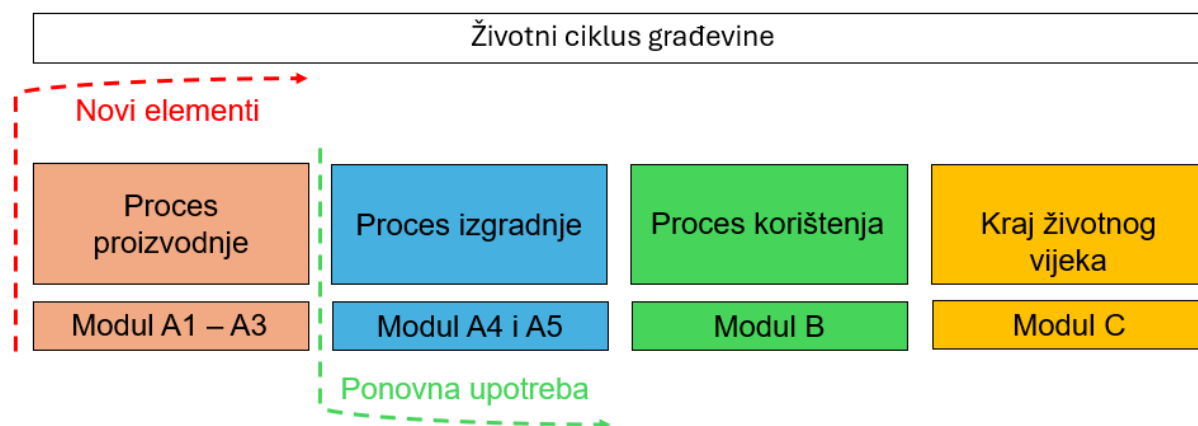
Slika 4.3 – čelik u kružnom gospodarstvu [22]

4.2. Ponovna upotreba čelika

Ponovna upotreba materijala ima značajan utjecaj u održivoj gradnji. Čelik u tom pogledu ima veliki potencijal jer se svojstva čeličnih elemenata u postojećoj konstrukciji tijekom vremena ne mijenjaju, ukoliko nisu izložena požaru, koroziji ili umoru [22]. Naravno, ukoliko se ponovno koriste u novoj konstrukciji, čelični elementi trebali bi zadovoljavati sva potrebna svojstva propisana normom HRN EN 1993. Prema Widenoja, Myhre i Kilvær, a kako navodi Brynhildsen [22], ako su elementi koji se ponovno koriste uzeti iz konstrukcije projektirane nakon 1970. onda bi materijalna svojstva čelika trebale biti slične današnjima.

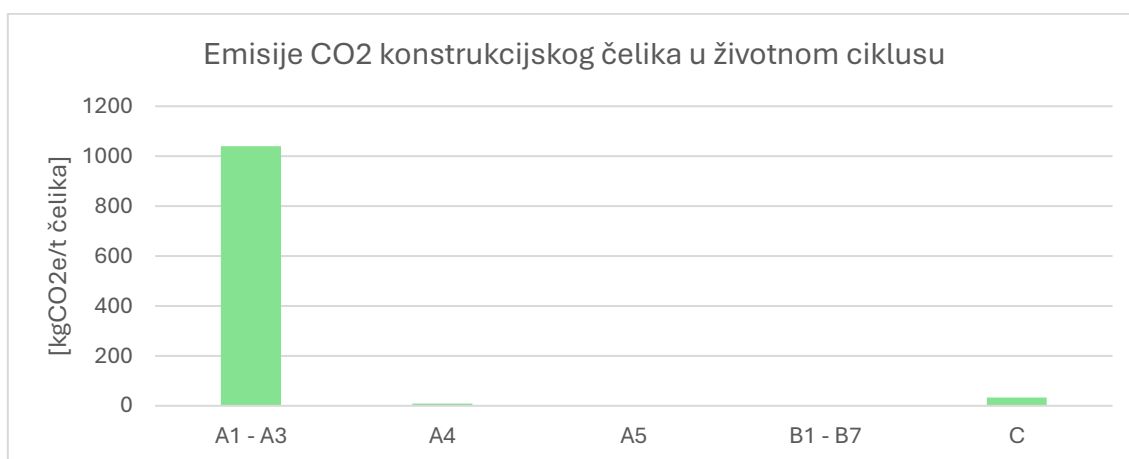
Trenutno je tržište za ponovno korištene čelične elemente maleno, ponajviše zato što su pojedini novi čelični elementi najčešće optimizirani na način da budu dobro iskorišteni u pojedinoj građevini određene geometrije. To znači da se teško mogu ponovno optimalno iskoristiti u budućoj konstrukciji. Stoga su, za sada, najuspješniji slučajevi ponovne upotrebe elemenata naprimjer premještanja cijelih građevina na drugu lokaciju [23]. Iako je ideja ponovne upotrebe elemenata još u ranim fazama, tek se razvija i nije još zaživjela, zbog velikih redukcija emisija ugljikovog dioksida i mogućnosti smanjenja građevinskog otpada koje se njome mogu postići, čini se da je ta ideja budućnost građevinske industrije. Kako bi ponovna upotreba čeličnih elemenata u potpunosti mogla zaživjeti, konstrukcije se prilikom projektiranja trebaju planirati na način da se mogu relativno jednostavno demontirati, što znači naprimjer potenciranje korištenja vijčanih spojeva u konstrukcijama [23].

Emisije ugljikovog dioksida uzrokovane isključivo nosivom čeličnom konstrukcijom u životnom vijeku građevine najviše se realiziraju prilikom proizvodnje čeličnih elemenata, što se u procjeni životnog ciklusa uzima u obzir modulima A1 – A3 (slika 4.4). Ponovnom upotrebom čeličnih elemenata nema emisija CO₂ zbog proizvodnje, stoga se može zaključiti da što je veći udio u ukupno utrošenom materijalu za izgradnju ponovno iskorišten, to će ukupne emisije CO₂ biti manje.



Slika 4.4 – utjecaj ponovne upotrebe elemenata na procjenu životnog ciklusa građevine

Na slici 4.5 prikazane su emisije ugljikovog dioksida koje su uzrokovane korištenjem konstrukcijskog čelika u životnom ciklusu građevine. Vrijednosti iz grafa korištene su u radu za provedbu procjene životnog ciklusa, a uzete su iz baze podataka za konstrukcijski čelik [24].



Slika 4.5 – Emisije CO₂ konstrukcijskog čelika u životnom ciklusu građevine prema korištenoj bazi podataka u radu [24]

Jasno je vidljivo da se velika većina ukupnih emisija ugljikovog dioksida konstrukcijskog čelika u životnom ciklusu građevine emitira upravo proizvodnjom čeličnih elemenata. Dakle, ponovna upotreba čelika može značajno pridonijeti u redukciji emisija u cilju prelaska građevinske industrije na kružno gospodarstvo, ali i u smanjivanju količina građevinskog otpada.

4.3. Primjeri iz prakse

4.3.1. Primarna transformatorska stanica Brent Cross Town

Primarna transformatorska stanica nalazi se u Brent Cross Townu, u Londonu . Projektirana je da osigura 80 MVA (Mega Volt – Ampera) električne snage kako bi mogla podržati razvoj 6700 novih domova, 3 milijuna metara kvadratnih uredskog prostora te nove trgovine i građevine za zabavu [25].



Slika 4.6 – Primarna transformatorska stanica Brent Cross Town, London [25]

Kako se može vidjeti na slici 4.6, transformatorska stanica, osim svoje funkcije, predstavlja i javno umjetničko djelo. Konstrukcija je visoka 21 metar, duljine 115 metara te ovalnog oblika, a izgrađena je od čelika [25].

U ovom projektu 45% utrošenog čelika čine ponovno korišteni čelični elementi. Ponovno korišteni čelični elementi (ukupno 33,46 tona) nabavljeni su od viška elemenata projekata naftovoda i plinovoda. Ponovno korišteni čelični elementi su korišteni kao nosivi stupovi strukture, dok su za potporu fasadi (slika 4.7) korišteni elementi od novoproducenog čelika [25].



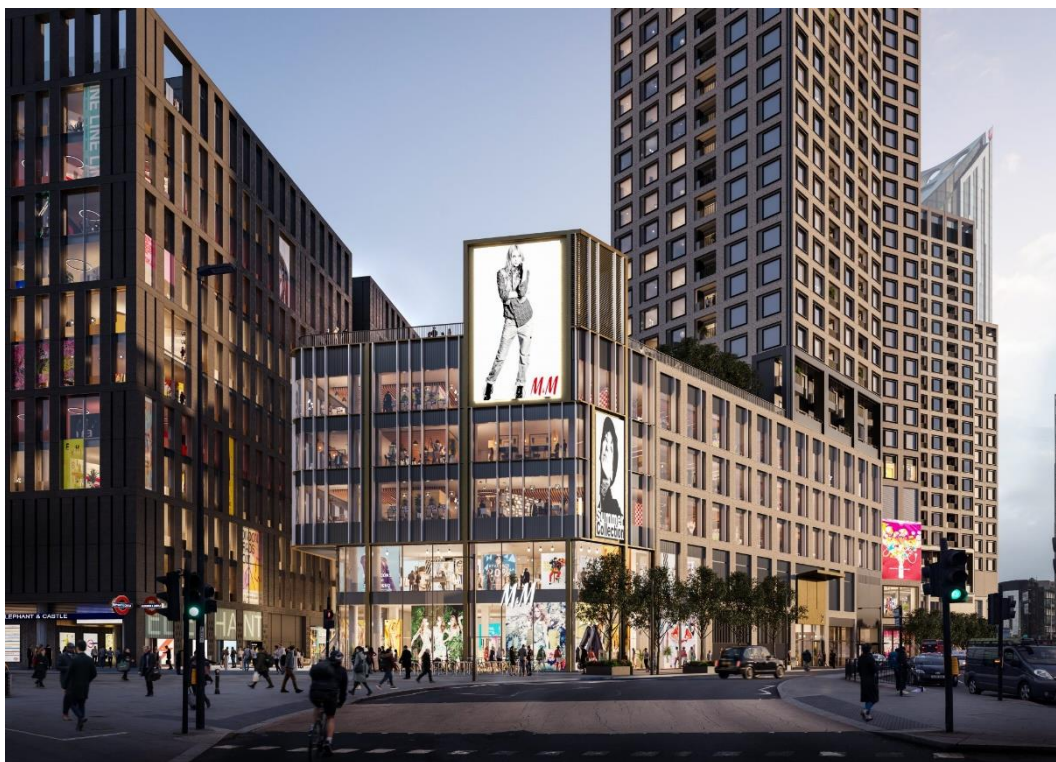
Slika 4.7 – Montaža fasadnih elemenata [26]

Usporedbom provedenih analiza, zaključeno je da su ponovnim korištenjem čeličnih elemenata proizvedeno 66 tona ugljikovog dioksida manje u odnosu na konstrukciju izvedenu u potpunosti od novoproducenog čelika [25]. Na taj način pokazana je predanost održivoj gradnji i kružnom gospodarstvu, a projekt se uklapa u ciljeve smanjenja emisija ugljikovog dioksida do 2030. godine.

Osim ekoloških prednosti, ponovna upotreba čelika u ovom projektu bila je i financijski bolje rješenje. Provedbom analize troškova zaključeno je da je cijena koštanja ponovno korištenog čelika 50% manja od novoproducenog. Nakon što se u obzir uzme i trošak ispitivanja uzoraka materijala, dodatnih radova kao npr. pripremanje površine, i transporta samih elemenata, cijena koštanja konstrukcije dijelom koristeći ponovno upotrjebljene čelične elemente je i dalje bila 25% manja od koštanja konstrukcije u potpunosti od novoproducenog čelika [25].

4.3.2. Obnova centra Elephant and Castle Town

Projekt obnove centra Elephant and Castle Town u Londonu (slika 4.8) započeo je 2022. godine te se predviđa da će radovi biti gotovi 2026. godine. Projekt predviđa izgradnju četiri zgrade, a u izgradnji tri primjenjuje se ponovno korišteni čelik [27].



Slika 4.8 – Elephant and Castle Town [28]

U zgradama će se kao materijal uz čelik koristiti i beton. Preliminarne pretpostavke su da će u projektu biti iskorišteno oko 372 tone čelika. Od toga će oko 26% to jest 96 tona biti ponovno korišteni čelik. Pritom je bitno naglasiti da se ponovno korišteni čelični elementi neće morati rezati ili prilagođavati novoj konstrukciji, što dodatno umanjuje troškove i emisije ugljikovog dioksida. Predviđa se da će se upotrebom ponovno korištenog čelika emisije ugljikovog dioksida prilikom životnog vijeka zgrada smanjiti za barem 160 tona, uz mogućnost daljnjeg smanjenja ovisno o tome kako se bude razvijala izgradnja [27].

Osim značajnog smanjivanja emisija, ponovna upotreba čelika u ovom projektu ne bi trebala utjecati na troškove projekta. Iako je određena sredstva potrebno uložiti u planiranje, koordiniranje i iterativno projektiranje, ponovno korišteni čelik jeftiniji je

od novoproducenog pa se, kada se sve sagleda, troškovi ne bi trebali povećati ponovnom upotrebom (dijela) čelika [27].

4.3.3. Uredska zgrada Holbein gardens

Projekt nadogradnje kata uredske zgrade (slika 4.9) na trgu Sloane u Londonu podrazumijevao je povećanje visine zgrade za 25%. Za nadogradnju je projektant odlučio koristiti čelik, a potrebna količina materijala iznosila je 70 tona. 34% toga (oko 24 tona) činio je ponovno korišteni čelik. Na taj način emitirano je 35 tona manje ugljikovog dioksida u odnosu na konstrukciju izvedenu od novoproducenog čelika [29].



Slika 4.9 – Uredska zgrada na trgu Sloane, London [29]

Provedbom modula A LCA analize predviđeno je da je ponovno upotrjebljeni čelik emitirao oko 0,3 kilograma ugljikovog dioksida (kgCO_2) po kilogramu ugrađenog čelika. Za usporedbu, korištenjem novoproducenog čelika emitiralo bi se oko 1,7 kilograma ugljikovog dioksida (kgCO_2) po kilogramu ugrađenog čelika, dakle značajno više.

Od 24 tone ponovno korištenog čelika, 9 tona uzeto je iz zgrada u vlasništvu investitora koje su bile srušene, dok je ostatak čelika kupljen. Zbog troškova rušenja i testiranja uzetih čeličnih elemenata ovo rješenje je financijski bilo zanemarivo skuplje u odnosu na korištenje u potpunosti novog čelika, međutim zbog značajnog smanjenja emisija ugljikovog dioksida izvedeno je financijski skuplje rješenje [29].

5. ANALIZA RJEŠENJA KONSTRUKCIJE ČELIČNE GRAĐEVINE

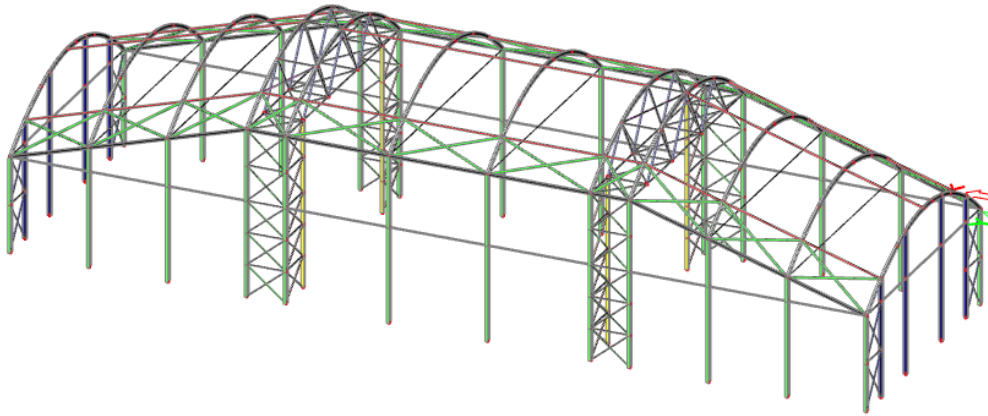
5.1. Općenito o građevini

5.1.1. Varijantna rješenja građevine

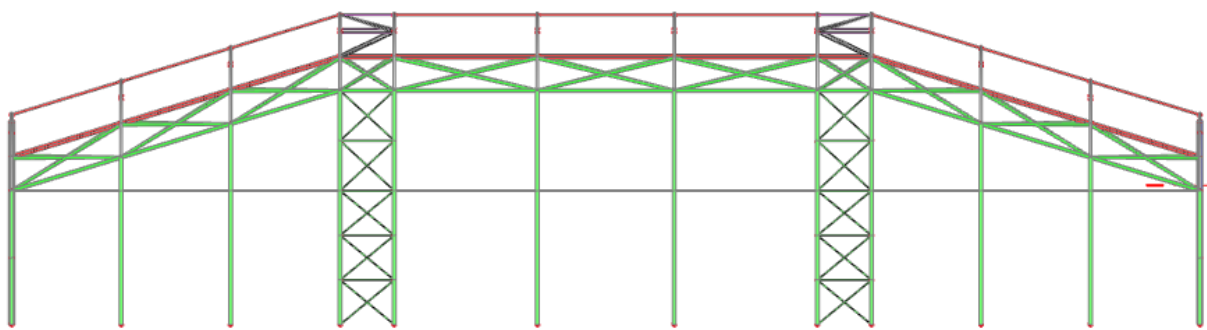
U radu je analizirano 5 slučajeva projektiranih rješenja čelične građevine, tri varijantna rješenja (1.; 2. i 3. slučaj) građevine locirane u Zagrebu i dva varijantna rješenja (4. i 5. slučaj) građevine locirane na Pagu. Prvi i četvrti slučaj predstavljaju tradicionalno projektirane građevine od novih čeličnih elemenata, a njihova geometrija detaljnije je objašnjena u poglavlju 5.1.2. Drugi slučaj je građevina u kojoj je jedino krovna podkonstrukcija i središnji dio građevine izrađeni od novih elemenata, dok su za ostatak građevine korištene platforme skele tornjeva Zagrebačke katedrale. Treći i peti slučaj optimiziraju ponovnu upotrebu platformi za skele, gdje su postignute značajne redukcije materijala na način da je donji dio platformi uklonjen i zamijenjen novim stupovima, a kako je detaljnije objašnjeno u poglavlju 5.1.3.

5.1.2. Građevina od novih elemenata

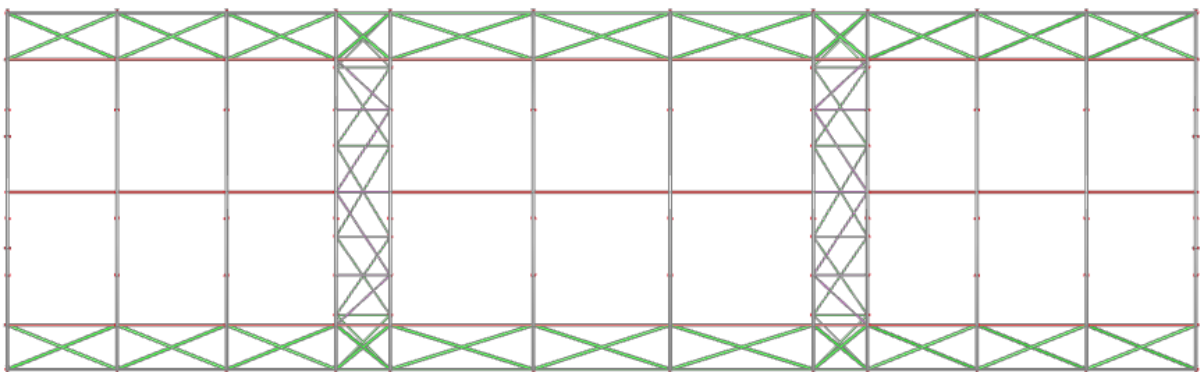
Kako bi usporedbe promatranih slučajeva u radu bile vjerodostojne, građevina projektirana od novih elemenata projektirana je sa jednakom krovnom podkonstrukcijom te jednakih dimenzija širine, duljine i visine kao i građevina projektirana ponovnom upotrebom elemenata platformi skele Zagrebačke katedrale. U cilju stabilizacije građevine u krovnu ravninu su postavljeni horizontalni uzdužni i horizontalni poprečni vezovi. Kako bi se postigla veća krutost građevine u poprečnom smjeru, uz vanjske vezove dodani su i unutarnji vertikalni poprečni vezovi, a predviđeni su i vertikalni uzdužni vezovi. U cilju smanjenja duljine izvijanja glavnih nosivih stupova i mogućnosti postavljanja fasadne obloge, horizontalna prečka postavljena je po čitavom obodu građevine, a ne samo u središnjem dijelu kako je to slučaj kod građevine projektirane ponovnom upotrebom čeličnih platformi za skele tornjeva Zagrebačke katedrale. Geometrija građevine od novih čeličnih elemenata prikazana je na slikama 5.1, 5.2 i 5.3.



Slika 5.1 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]



Slika 5.2 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]



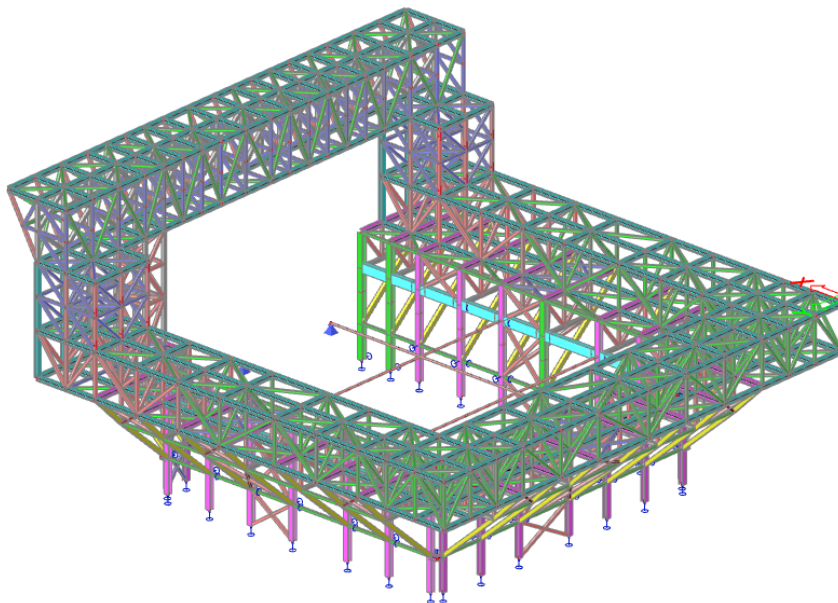
Slika 5.3 – Tlocrt građevine u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]

5.1.3. Ponovna upotreba dijela platforme skele Zagrebačke katedrale

Na slici 5.4 crvenom bojom označene su čelične platforme za toranjske skele Zagrebačke katedrale, a koje su u ovom radu ponovno korištene za konstrukciju nove čelične građevine. Slika 5.5 prikazuje model platforme skele u softveru Scia Engineer [30].



Slika 5.4 – Platforme skele Zagrebačke katedrale [13]



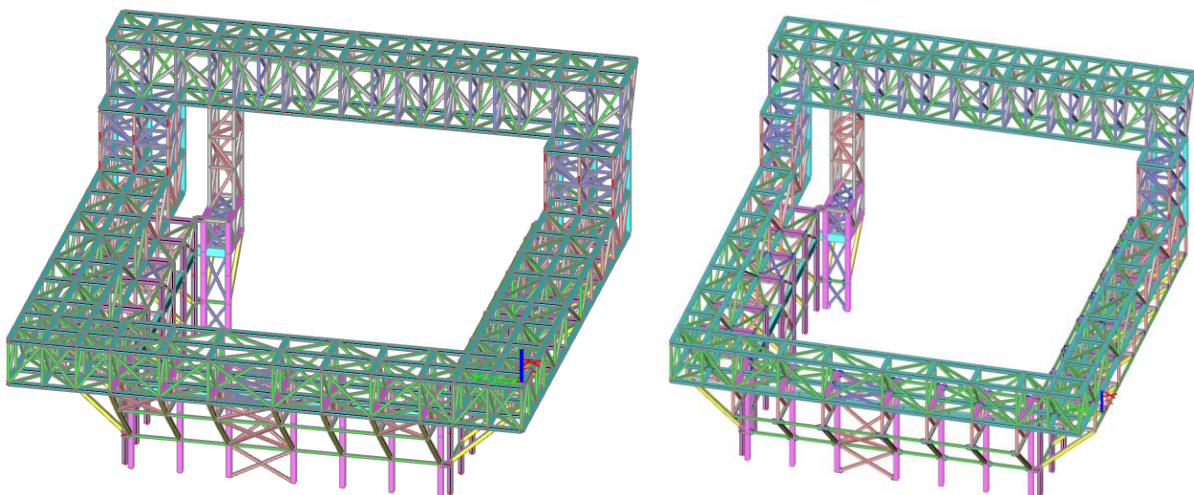
Slika 5.5 – Platforma skele u softveru Scia Engineer [30]

Platforme skele ponovno su iskorištene na način da se platforma svakog tornja u svom projektiranom obliku ponovno montira na novoj lokaciji, a platforme su međusobno udaljene 17 metara i okrenute „jedna prema drugoj“ kako bi se formirala nova građevina. Položaj platformi skele u novoj građevini prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6 – Platforme skele prikazane u novoj hali u softveru Scia Engineer [30]

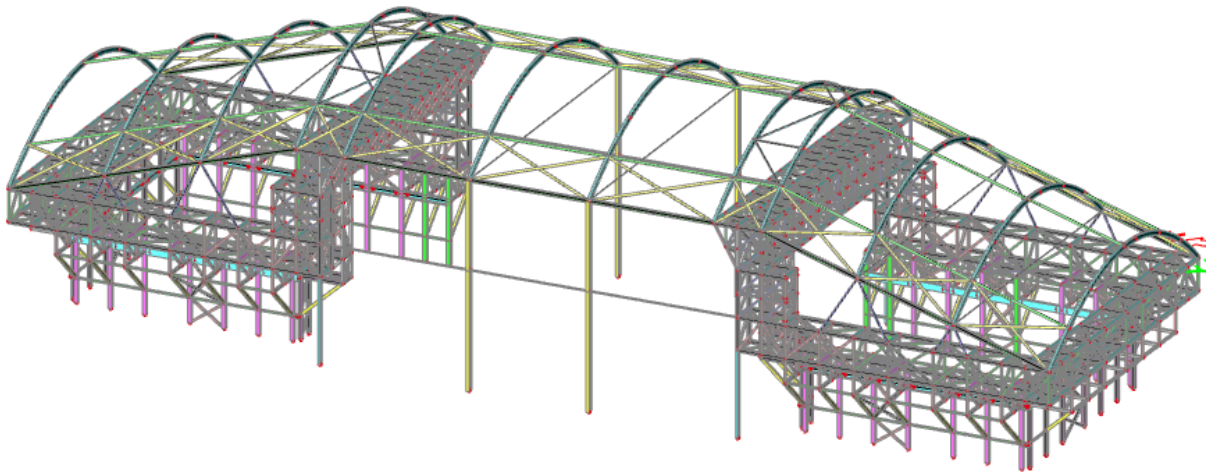
Zbog masivnosti platforme skele i količine čeličnih elemenata, a u cilju smanjivanja utroška materijala, odlučeno je da će se platforme skele ponovno upotrijebjavati bez „vanjskog rešetkastog prstena“ koji je uklonjen, a kako je prikazano na slici 5.7:



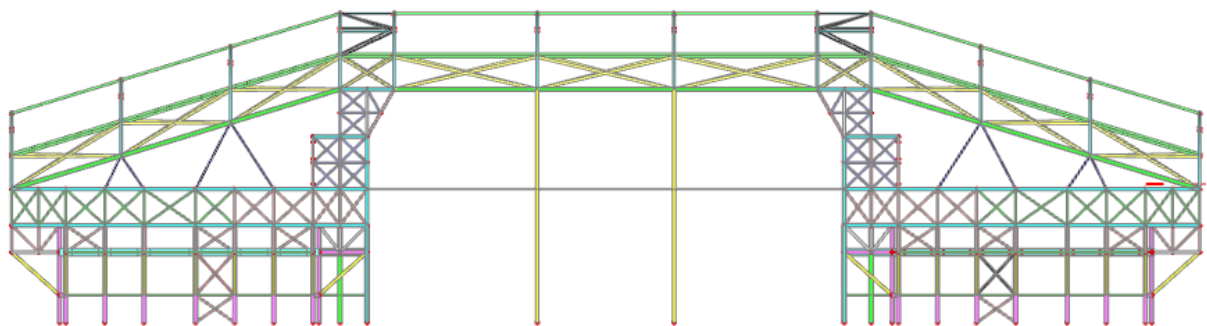
Slika 5.7 – Platforma skele sa vanjskim rešetkastim prstenom (lijevo) i bez istog (desno) prikazana u softveru Scia Engineer [30]

Kako platforme skele nisu dovoljne za formiranje cjelokupne konstrukcije građevine, dodatno je predviđena krovna podkonstrukcija izvedena u formi lukova na koju kao pokrov dolazi visoko profilirani čelični lim, zbog čega u krovnoj konstrukciji nisu postavljene podrošnice. U polovici raspona lukova postavljeni su dodatni tlačni elementi u cilju smanjenja duljine izvijanja lukova (kao bočno pridržanje). Kao stabilizacija krovne ravnine predviđeni su horizontalni uzdužni i poprečni vezovi. Horizontalni poprečni vezovi postavljeni su na mjestima iznad gornje rešetke platformi

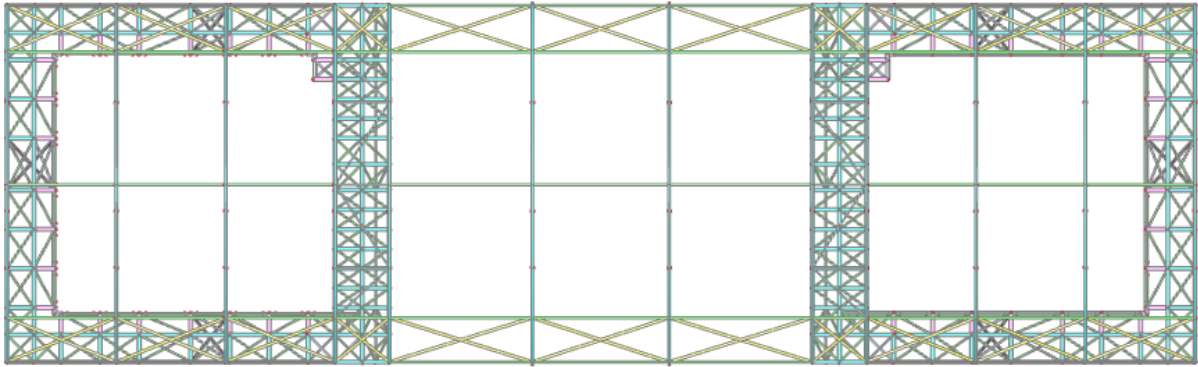
skele. Zbog preuzimanja horizontalne komponente sile iz lukova, lukovi su predviđeni sa vlačnim elementima – zategama. U središnjem dijelu građevine (područje između platformi skele) postavljeni su dodatni novi elementi (stupovi, horizontalna prečka) kako bi građevina mogla biti ispravno izvedena. Ukupne dimenzije građevine stoga iznose 47,75 m x 14,3 m, a građevina je na krajevima visine 5,35 metara, dok je u središnjem dijelu visine 9,35 metara (gledano u razini zidova građevine). Visina strelice krovnih lukova iznosi 3 metra te je građevina stoga u sredini lukova visine 12,35 metara. Opisana geometrija građevine prikazana je na slikama 5.8, 5.9 i 5.10.



Slika 5.8 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]

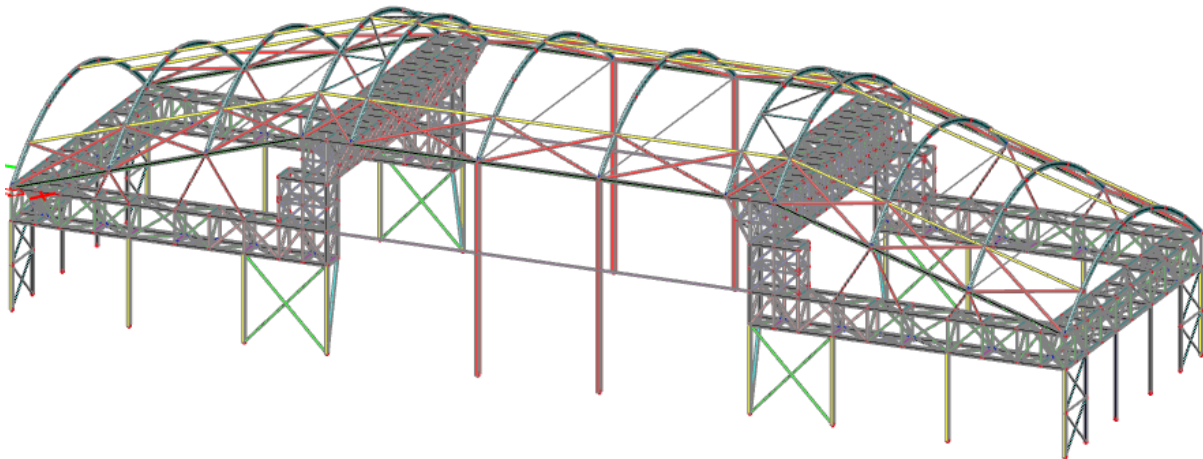


Slika 5.9 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]

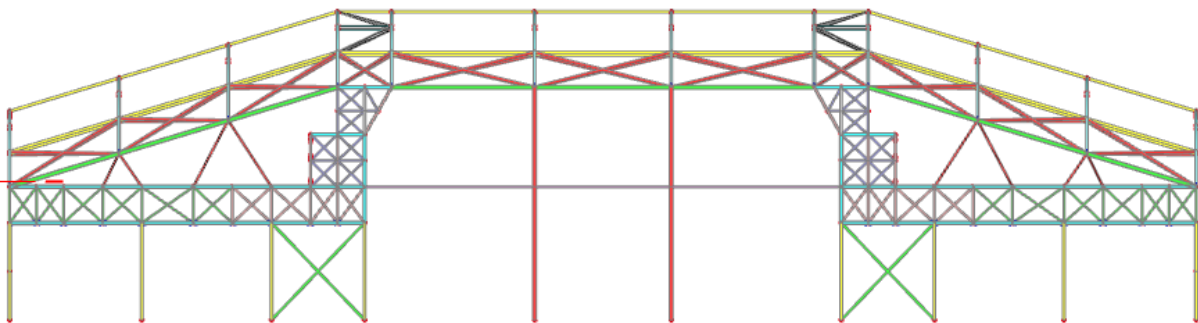


Slika 5.10 – Tlocrt građevine u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]

Prikazana geometrija građevine odnosi se na slučaj 2 ovog rada. U slučajevima 3 i 5, a kako se vidi na slikama 5.11 i 5.12, s ciljem redukcije količine korištenog materijala, uklonjeni su donji dijelovi platforme skele te su zamijenjeni novim stupovima. Dodatno su, zbog stabilizacije građevine, predviđeni vertikalni uzdužni i vertikalni poprečni vezovi te kosnici.



Slika 5.11 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučajevi 3 i 5) [30]



Slika 5.12 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučajevi 3 i 5) [30]

5.2. Analiza opterećenja

5.2.1. Analiza opterećenja za Zagreb

Stalno opterećenje

- Vlastita težina elemenata konstrukcije: uzima se u obzir u software – u
- Dodatno stalno opterećenje (opterećenje pokrova i instalacija):

$$g_{ds} = 0,50 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje snijegom (HRN EN 1991 – 1 – 3 + NA) [31]

Opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema izrazu:

$$s = s_k \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

Gdje je:

- s_k – karakteristično opterećenje snijegom na tlu
- μ_i – koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu, ovisi o tipu i nagibu krova
- C_e – koeficijent izloženosti, uzima u obzir uvjete puhanja vjetra

$$C_e = 1,0$$

- C_t – toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade

$$C_t = 1,0$$

Građevina se nalazi u III. području djelovanja snijega na nadmorskoj visini 200 m. Iz karte snjegova očitana je vrijednost karakterističnog opterećenja snijegom na tlu.

- Karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu: $s_k = 1,25 \text{ kN/m}^2$
- Koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu: $\mu_1 = 0,8$

Opterećenje snijegom na krovu:

$$s = s_k \cdot \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t = 1,25 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,0 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje vjetrom (HRN EN 1991-1-4 + NA) [32]

Osnovna brzina vjetra dobiva se prema izrazu:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

Gdje je:

- c_{dir} – faktor smjera vjetra
 $c_{dir} = 1,0$
- c_{season} – koeficijent godišnjeg doba
 $c_{season} = 1,0$
- $v_{b,0}$ – temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra određuje se iz Karte osnovne brzine vjetra prema HRN EN 1991-1-4 NA [32].

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra: $v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$

Osnovni tlak vjetra se određuje prema izrazu:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Gdje je:

- ρ – gustoća zraka
 $\rho = 1,25 \text{ kN/m}^3$

Osnovni tlak vjetra: $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 20^2 = 250 \text{ N/m}^2$

$$q_b = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

Vanjski tlak vjetra određuje se prema izrazu: $w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$

Unutrašnji tlak vjetra određuje se prema izrazu: $w_i = q_p(z_e) \cdot c_{pi}$

Gdje je:

$q_p(z_e)$ – tlak vjetra uslijed udara na visini z

$$q_p(z_e) = c_e(z) \cdot q_b$$

$c_e(z)$ – koeficijent izloženosti koji uzima u obzir neravnoću terena, topografiju i visinu iznad tla

c_{pe} ; c_{pi} – koeficijenti vanjskog i unutrašnjeg tlaka

Koeficijent izloženosti za kategoriju terena III: $c_e(z) = 1,9$

Unutrašnji tlak vjetra za $c_{pi} = -0,3$: $w_i = 0,25 \cdot 1,9 \cdot -0,3 = -0,14 \text{ kN/m}^2$

Unutrašnji tlak vjetra za $c_{pi} = 0,2$: $w_i = 0,25 \cdot 1,9 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ kN/m}^2$

Ukupno opterećenje vjetrom proračunalo se za 4 mjerodavna slučaja opterećenja vjetrom (slučajevi kada vjetar puše na uzdužnu ili poprečnu stranu građevine, te kada je za te slučajeve unutrašnji tlak pozitivan ili negativan). U Tablicama 5.1 – 5.4 prikazane su vrijednosti ukupnog opterećenja vjetrom na plohe građevine za sve navedene slučajeve.

Tablica 5.1 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = -0,3$) – Zagreb

Površina	Djelovanje vjetra w_e
površina A (zid)	$w_{k,A} = -0,71 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -0,52 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 0,23 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,34 \text{ kN/m}^2$
površina A (krov)	$w_{k,A} = -0,04 \text{ kN/m}^2$
površina B (krov)	$w_{k,B} = -0,33 \text{ kN/m}^2$
površina C (krov)	$w_{k,C} = -0,58 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.2 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Zagreb

Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -0,47 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -0,28 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 0,47 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,1 \text{ kN/m}^2$
površina A (krov)	$w_{k,A} = 0,2 \text{ kN/m}^2$
površina B (krov)	$w_{k,B} = -0,09 \text{ kN/m}^2$
površina C (krov)	$w_{k,C} = -0,34 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.3 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = -0,3$) – Zagreb

Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -0,71 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -0,52 \text{ kN/m}^2$
površina C (zid)	$w_{k,C} = -0,38 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 0,23 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,34 \text{ kN/m}^2$
površina F (krov)	$w_{k,F} = -0,66 \text{ kN/m}^2$
površina G (krov)	$w_{k,G} = -0,81 \text{ kN/m}^2$
površina H (krov)	$w_{k,H} = -0,57 \text{ kN/m}^2$
površina I (krov)	$w_{k,I} = -0,38 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.4 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Zagreb

Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -0,47 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -0,28 \text{ kN/m}^2$
površina C (zid)	$w_{k,C} = -0,14 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 0,47 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,1 \text{ kN/m}^2$
površina F (krov)	$w_{k,F} = -0,42 \text{ kN/m}^2$
površina G (krov)	$w_{k,G} = -0,57 \text{ kN/m}^2$
površina H (krov)	$w_{k,H} = -0,33 \text{ kN/m}^2$
površina I (krov)	$w_{k,I} = -0,14 \text{ kN/m}^2$

5.2.2. Analiza opterećenja za Pag

Stalno opterećenje

- Vlastita težina elemenata konstrukcije: uzima se u obzir u software – u
- Dodatno stalno opterećenje (opterećenje pokrova i instalacija):

$$g_{ds} = 0,50 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje snijegom (HRN EN 1991 – 1 – 3 + NA) [31]

Opterećenje snijegom na krovu dobiva se prema izrazu:

$$s = s_k \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

Gdje je:

- s_k – karakteristično opterećenje snijegom na tlu

- μ_i – koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu, ovisi o tipu i nagibu krova
- C_e – koeficijent izloženosti, uzima u obzir uvjete puhanja vjetra

$$C_e = 1,0$$

- C_t – toplinski koeficijent zbog zagrijavanja zgrade

$$C_t = 1,0$$

Građevina se nalazi u I. području djelovanja snijega na nadmorskoj visini 100 m. Iz karte snjegova očitana je vrijednost karakterističnog opterećenja snijegom na tlu.

- Karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlu: $s_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- Koeficijent oblika opterećenja snijegom na krovu: $\mu_1 = 0,8$

Opterećenje snijegom na krovu:

$$s = s_k \cdot \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje vjetrom (HRN EN 1991-1-4 + NA) [32]

Osnovna brzina vjetra dobiva se prema izrazu:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

Gdje je:

- c_{dir} – faktor smjera vjetra
 $c_{dir} = 1,0$
- c_{season} – koeficijent godišnjeg doba
 $c_{season} = 1,0$
- $v_{b,0}$ – temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra određuje se iz Karte osnovne brzine vjetra prema HRN EN 1991-1-4 NA [32].

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra: $v_{b,0} = 45 \text{ m/s}$

Osnovni tlak vjetra se određuje prema izrazu:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Gdje je:

– ρ – gustoća zraka

$$\rho = 1,25 \text{ kN/m}^3$$

Osnovni tlak vjetra: $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 45^2 = 1265,6 \text{ N/m}^2$

$$q_b = 1,27 \text{ kN/m}^2$$

Vanjski tlak vjetra određuje se prema izrazu: $w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$

Unutrašnji tlak vjetra određuje se prema izrazu: $w_i = q_p(z_e) \cdot c_{pi}$

Gdje je:

$q_p(z_e)$ – tlak vjetra uslijed udara na visini z

$$q_p(z_e) = c_e(z) \cdot q_b$$

$c_e(z)$ – koeficijent izloženosti koji uzima u obzir neravnoću terena, topografiju i visinu iznad tla

c_{pe} ; c_{pi} – koeficijenti vanjskog i unutrašnjeg tlaka

Koeficijent izloženosti za kategoriju terena I: $c_e(z) = 2,95$

Unutrašnji tlak vjetra za $c_{pi} = -0,3$: $w_i = 1,27 \cdot 2,95 \cdot -0,3 = -1,12 \text{ kN/m}^2$

Unutrašnji tlak vjetra za $c_{pi} = 0,2$: $w_i = 1,27 \cdot 2,95 \cdot 0,2 = 0,75 \text{ kN/m}^2$

Ukupno opterećenje vjetrom proračunalo se za 4 mjerodavna slučaja opterećenja vjetrom (slučajevi kada vjetar puše na uzdužnu ili poprečnu stranu građevine, te kada je za te slučajeve unutrašnji tlak pozitivan ili negativan). U Tablicama 5.5 – 5.8 prikazane su vrijednosti ukupnog opterećenja vjetrom na plohe građevine za sve navedene slučajeve.

Tablica 5.5 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = -0,3$) – Pag

Površina	Djelovanje vjetra w_e
površina A (zid)	$w_{k,A} = -5,62 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -4,12 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 1,76 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -2,73 \text{ kN/m}^2$
površina A (krov)	$w_{k,A} = -0,56 \text{ kN/m}^2$
površina B (krov)	$w_{k,B} = -2,62 \text{ kN/m}^2$
površina C (krov)	$w_{k,C} = -4,57 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.6 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Pag

Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -3,75 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -2,25 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 3,63 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,86 \text{ kN/m}^2$
površina A (krov)	$w_{k,A} = 1,31 \text{ kN/m}^2$
površina B (krov)	$w_{k,B} = -0,75 \text{ kN/m}^2$
površina C (krov)	$w_{k,C} = -2,7 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.7 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = -0,3$) – Pag

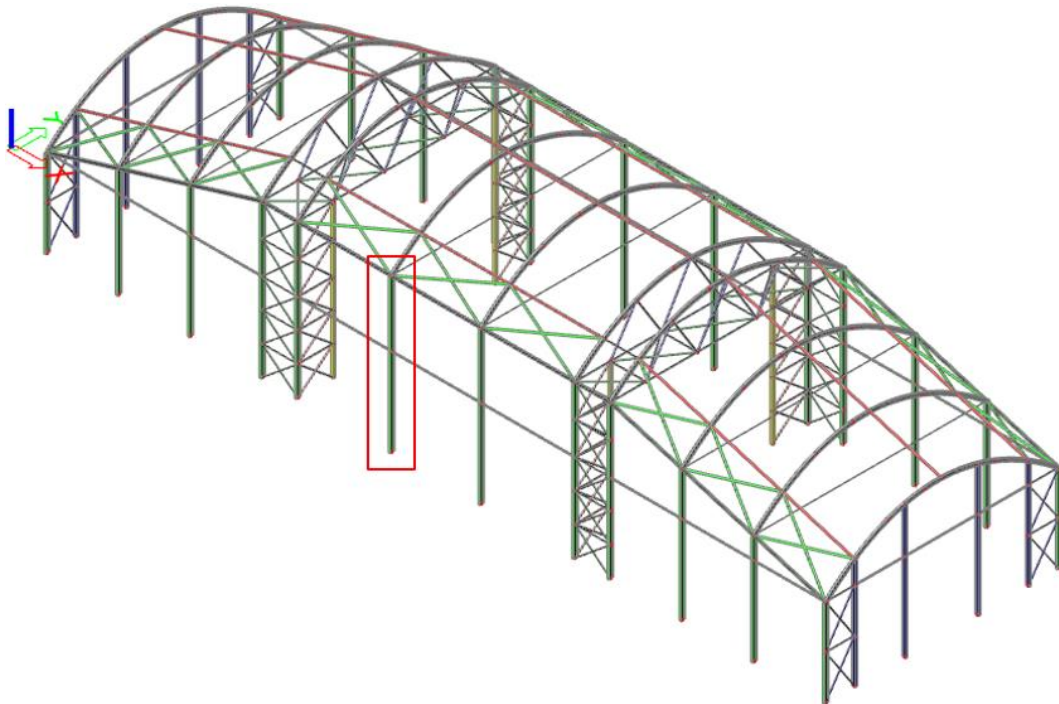
Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -5,62 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -4,12 \text{ kN/m}^2$
površina C (zid)	$w_{k,C} = -2,99 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 1,76 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -2,73 \text{ kN/m}^2$
površina F (krov)	$w_{k,F} = -5,24 \text{ kN/m}^2$
površina G (krov)	$w_{k,G} = -6,37 \text{ kN/m}^2$
površina H (krov)	$w_{k,H} = -4,49 \text{ kN/m}^2$
površina I (krov)	$w_{k,I} = -2,99 \text{ kN/m}^2$

Tablica 5.8 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Pag

Površina	Djelovanje vjetra w_k
površina A (zid)	$w_{k,A} = -3,75 \text{ kN/m}^2$
površina B (zid)	$w_{k,B} = -2,25 \text{ kN/m}^2$
površina C (zid)	$w_{k,C} = -1,12 \text{ kN/m}^2$
površina D (zid)	$w_{k,D} = 3,63 \text{ kN/m}^2$
površina E (zid)	$w_{k,E} = -0,86 \text{ kN/m}^2$
površina F (krov)	$w_{k,F} = -3,37 \text{ kN/m}^2$
površina G (krov)	$w_{k,G} = -4,5 \text{ kN/m}^2$
površina H (krov)	$w_{k,H} = -2,62 \text{ kN/m}^2$
površina I (krov)	$w_{k,I} = -1,12 \text{ kN/m}^2$

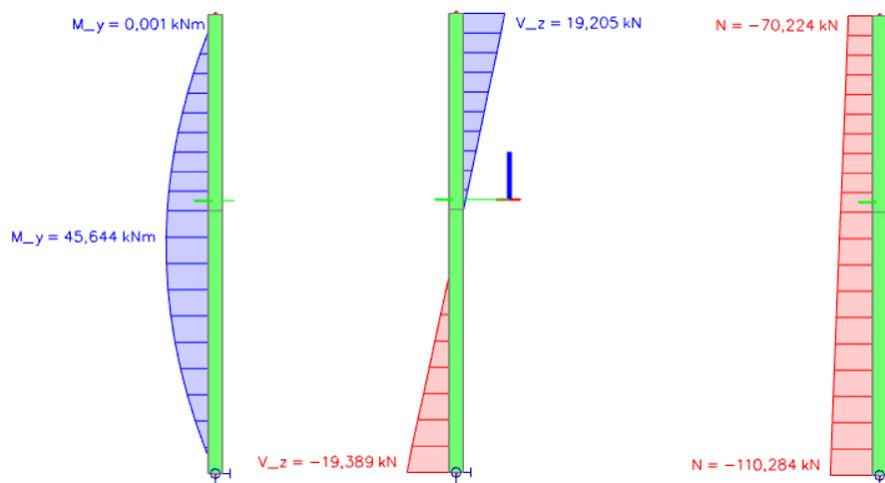
5.3. Primjer dimenzioniranja glavnih konstrukcijskih elemenata građevine

Dimenzioniranje elemenata provedeno je prema normi HRN EN 1993-1-1 [33]. Kao primjer proračuna elemenata građevine napravljene od novih čeličnih elemenata prikazat će se dimenzioniranje najopterećenijeg stupa (slika 5.13) za mjerodavnu kombinaciju djelovanja. Ostali elementi dimenzionirani su na jednaki način.



Slika 5.13 – Najopterećeniji stup za kombinaciju djelovanja ULS 8 [30]

Mjerodavna kombinacija za dimenzioniranje stupa je ULS 8. Vrijednosti unutarnjih sila prikazane su na slici 5.14.



Slika 5.14 – Vrijednosti unutarnjih sila u stupu za ULS 8 [30]

Odabrani poprečni presjek stupa: IPE 300

Karakteristike poprečnog presjeka

Tip poprečnog presjeka:	valjani
Površina poprečnog presjeka:	$A = 53,81 \text{ cm}^2$
Visina presjeka:	$h = 300 \text{ mm}$
Širina pojasnice:	$b = 150 \text{ mm}$
Debljina hrpta:	$t_w = 7,1 \text{ mm}$
Debljina pojasnice:	$t_f = 10,7 \text{ mm}$
Radius zaobljenja:	$r = 15 \text{ mm}$
Torzijska konstanta:	$I_t = 20,12 \text{ cm}^4$
Konstanta krivljenja:	$I_w = 125900 \text{ cm}^6$
Moment tromosti:	$I_y = 8356 \text{ cm}^4$ $I_z = 603,8 \text{ cm}^4$
Moment otpora:	$W_y = 557,1 \text{ cm}^3$ $W_z = 80,5 \text{ cm}^3$
Plastični moment otpora:	$W_{pl,y} = 628,4 \text{ cm}^3$ $W_{pl,z} = 125,2 \text{ cm}^3$
Kvaliteta materijala:	S 235

Klasifikacija poprečnog presjeka

Klasifikacija pojasnice:

$$\frac{c}{t} = \frac{b - t_w - 2 \cdot r}{t_f} = \frac{150 - 7,1 - 2 \cdot 15}{10,7} = 5,28$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1,0$$

$$5,28 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \cdot 1,0 = 9$$

Pojasnica je svrstana u klasu presjeka 1.

Klasifikacija hrpta:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r}{t_w} = \frac{300 - 2 \cdot 10,7 - 2 \cdot 15}{7,1} = 35,01$$

$$35,01 < 38 \cdot \varepsilon = 38 \cdot 1,0 = 38$$

Hrvat je svrstan u klasu presjeka 2.

Poprečni presjek svrstan je u klasu presjeka 2.

Otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu silu

$$N_{Ed} = 110 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{53,81 \cdot 23,5}{1,0} = 1265 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{110}{1265} = 0,087 < 1,0$$

Uvjet je zadovoljen uz iskoristivost presjeka 8,7 %.

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

$$M_{y,Ed} = 45,64 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd,y-y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628,4 \cdot 23,5}{1,0}$$

$$M_{c,Rd,y-y} = 14767 \text{ kNcm} = 148 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd,y-y}} \leq 1,0$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd,y-y}} = \frac{45,6}{148} = 0,309 < 1,0$$

Poprečni presjek zadovoljava na savijanje oko osi y – y uz iskoristivost 30,9 %.

Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

$$V_{z,Ed} = 19,4 \text{ kN}$$

Provjera opasnosti nastupanja izbočivanja hrpta:

$$\frac{h_w}{t_w} < 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 300 - 2 \cdot 10,7 = 278,6 \text{ mm}$$

$$\eta = 1,20$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{278,6}{7,1} = 39,2 < 72 \cdot \frac{1,0}{1,20} = 60$$

Nema opasnosti od izbočivanja hrpta IPE profila.

Djelotvorna posmična površina poprečnog presjeka:

$$A_{v,z} = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_{v,z} = 53,81 - 2 \cdot 15 \cdot 1,07 + (0,71 + 2 \cdot 1,5) \cdot 1,07 = 25,7 \text{ cm}^2$$

$$25,7 \text{ cm}^2 > 1,2 \cdot 27,86 \cdot 0,71 = 23,7 \text{ cm}^2$$

$$A_{v,z} = 25,7 \text{ cm}^2$$

Otpornost poprečnog presjeka na posmik:

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{25,7 \cdot (23,5 / \sqrt{3})}{1,0} = 349 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{19,4}{349} = 0,056 < 1,0$$

Poprečni presjek zadovoljava na posmik u smjeru osi z – z uz iskoristivost 5,6 %.

Otpornost poprečnog presjeka na M – N – V interakciju

Nema smanjenja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje zbog poprečne sile ako je zadovoljen slijedeći uvjet:

$$V_{z,Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,z,Rd}$$

$$19,4 \text{ kN} < 0,5 \cdot 349 = 174 \text{ kN}$$

Nema smanjenja otpornosti na savijanje oko osi y – y zbog utjecaja poprečne sile.

Nema smanjenja otpornosti poprečnog presjeka na savijanje zbog uzdužne sile ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \cdot N_{c,Rd} \rightarrow 110 \text{ kN} < 0,25 \cdot 1265 = 316 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \rightarrow 110 \text{ kN} \leq \frac{0,5 \cdot 27,86 \cdot 0,71 \cdot 23,5}{1,0} = 232 \text{ kN}$$

Nema smanjenja otpornosti na savijanje oko osi y – y zbog utjecaja uzdužne sile.

$$M_{y,Ed} = 45,6 \text{ kNm}$$

$$M_{c,V,N,Rd} = M_{c,Rd,y-y} = 148 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd,y-y}} \leq 1,0$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,V,N,Rd}} = \frac{45,6}{148} = 0,309 < 1,0$$

Poprečni presjek zadovoljava na M – N – V interakciju uz iskoristivost presjeka 30,9%.

Otpornost elementa na izvijanje zbog uzdužne sile

Efektivne duljine izvijanja stupa:

$$L_{i,y} = L = 935 \text{ cm}$$

$$L_{i,z} = 0,57 \cdot L = 0,572 \cdot 935 = 535 \text{ cm}$$

Za određivanje duljine izvijanja oko osi z duljina stupa pomnožena je sa 0,572 jer se na visini stupa 5,35 metara nalazi horizontalna prečka koja pridržava stup van ravnine.

Otpornost elementa na izvijanje oko osi y – y:

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 8356}{935^2} = 1981 \text{ kN}$$

Svedena vitkost $\bar{\lambda}_y$:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{23,5 \cdot 53,81}{1981}} = 0,799$$

Određivanje mjerodavne linije izvijanja:

Linija izvijanja elementa određuje se ovisno o debljini pojasnice poprečnog presjeka, odnosu visine i širine poprečnog presjeka i osi oko koje se element izvija:

$$t_f = 10,7 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$$

$$\frac{h}{b} = \frac{300}{150} = 2 > 1,2$$

Promatra se izvijanje oko osi y – y

Mjerodavna je linija izvijanja a, pa je faktor imperfekcije $\alpha = 0,21$

Pomoćna veličina Φ_y :

$$\Phi_y = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,799 - 0,2) + 0,799^2]$$

$$\Phi_y = 0,822$$

Faktor redukcije χ_y :

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,822 + \sqrt{0,822^2 - 0,799^2}}$$

$$\chi_y = 0,985$$

Otpornost elementa na uzdužnu silu uzimajući u obzir nepovoljne učinke izvijanja elementa oko osi y:

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,985 \cdot \frac{53,81 \cdot 23,5}{1,1} = 1132 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{110,28}{1132} = 0,097 < 1,0$$

Element zadovoljava na izvijanje oko osi y – y uz iskoristivost elementa 9,7 %.

Otpornost elementa na izvijanje oko osi z – z:

Eulerova kritična sila:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 603,8}{535^2} = 437 \text{ kN}$$

Svedena vitkost $\bar{\lambda}_z$:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{f_y \cdot A}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{23,5 \cdot 53,81}{437}} = 1,7$$

Određivanje mjerodavne linije izvijanja:

Linija izvijanja elementa određuje se ovisno o debljini pojasnice poprečnog presjeka, odnosu visine i širine poprečnog presjeka i osi oko koje se element izvija:

$$t_f = 10,7 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$$

$$\frac{h}{b} = \frac{300}{150} = 2 > 1,2$$

Promatra se izvijanje oko osi z – z

Mjerodavna je linija izvijanja b, pa je faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina Φ_z :

$$\Phi_z = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (1,7 - 0,2) + 1,7^2]$$

$$\Phi_z = 2,2$$

Faktor redukcije χ_z :

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1,7^2}}$$

$$\chi_z = 0,278$$

Otpornost elementa na uzdužnu silu uzimajući u obzir nepovoljne učinke izvijanja elementa oko osi z:

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,278 \cdot \frac{53,81 \cdot 23,5}{1,1} = 320 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{110,28}{320} = 0,345 < 1,0$$

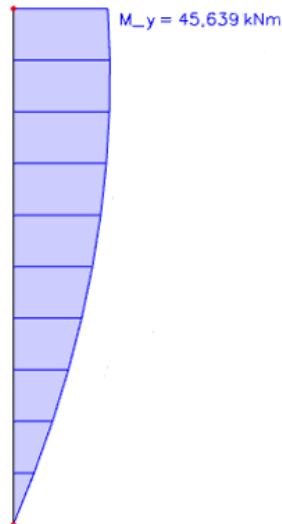
Element zadovoljava na izvijanje oko osi z – z uz iskoristivost elementa 34,5 %.

Otpornost elementa na savijanje

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

Vrijednosti faktora C_1 i C_2 ovise o obliku momentnog dijagrama između točaka bočnog pridržanja:



Slika 5.15 – Oblik momentnog dijagrama između točaka bočnog pridržanja [30]

Za očitavanje vrijednosti faktora C_1 i C_2 potrebno je odrediti omjer momenata na krajevima (Ψ) i omjer momenta uslijed poprečnog opterećenja i momenta na kraju (μ) [34]:

$$\Psi = \frac{0}{44,679} = 0$$

$$\mu = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot M} = 1,02$$

Očitano:

$$C_1 = 1,12$$

$$C_2 = 0,28$$

Faktori k i k_w ovise o uvjetima oslanjanja:

$$k = k_w = 1,0$$

Faktor z_g ovisi o mjestu unosa opterećenja u odnosu na centar posmika:

$$z_g = \frac{h}{2} = 15 \text{ cm}$$

Modul elastičnosti i modul posmika za čelik iznose:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2 = 21\,000 \text{ kN/cm}^2$$

$$G = 81\,000 \text{ N/mm}^2 = 8100 \text{ kN/cm}^2$$

$$C_2 \cdot z_g = 0,28 \cdot 15 = 4,2 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = 1,12 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 603,8}{535^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{125900}{603,8} + \frac{535^2 \cdot 8100 \cdot 20,12}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 603,8} + (4,2)^2} - 4,2 \right]$$

$$M_{cr} = 9927 \text{ kNcm} = 99,27 \text{ kNm}$$

Bezdimenzijska vitkost:

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{628,4 \cdot 23,5}{9927}} = 1,22$$

Određivanje mjerodavne linije izvijanja:

Linija izvijanja elementa određuje se ovisno o odnosu visine i širine poprečnog presjeka:

$$\frac{h}{b} = \frac{300}{150} = 2 \leq 2$$

Mjerodavna je linija izvijanja b, pa je faktor imperfekcije $\alpha = 0,34$

Pomoćna veličina Φ_{LT} :

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\overline{\lambda}_{LT} - 0,4) + 0,75 \cdot \overline{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (1,22 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,22^2] = 1,197$$

Faktor redukcije χ_{LT} :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - 0,75 \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,197 + \sqrt{1,197^2 - 0,75 \cdot 1,22^2}} = 0,568$$

Modificirani faktor redukcije:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$$

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - 0,97) \cdot [1 - 2,0 \cdot (1,265 - 0,8)^2] = 0,99$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,568}{0,99} = 0,574$$

Otpornost elementa na savijanje uzimajući u obzir nepovoljne učinke bočnog torzijskog izvijanja:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{b,Rd} = 0,574 \cdot \frac{628,4 \cdot 23,5}{1,1} = 7706 \text{ kNcm} = 77,06 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{45,644}{77,06} = 0,592$$

Element zadovoljava uz iskoristivost 59,2 %.

Otpornost elementa na M – N interakciju

Interakcijski faktori potrebni za dokaz elementa na interakciju momenta savijanja i uzdužne sile odrediti će se prema metodi 2, odnosno prema dodatku B norme HRN EN 1993-1-1 [33]. Iako je na mjestu najvećeg momenta savijanja uzdužna sila nešto

manja, kako bi se bilo na strani sigurnosti uzeta je maksimalna vrijednost uzdužne sile:

$$M_{y,Ed} = 45,644 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 110,284 \text{ kN}$$

Pri određivanju faktora C_{my} promatra se puni raspon nosača, dok je faktor C_{mLT} određen za oblik momentnog dijagrama između bočnih pridržanja (slika 5,3).

Određivanje interakcijskog faktora k_{yy} :

Kako je statički sustav stupa prosta greda, momenti na krajevima nosača su jednaki 0. Stoga je faktor $\Psi = 0$ i faktor C_{my} :

$$C_{my} = 0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h$$

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0$$

$$C_{my} = 0,95$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right)$$

$$C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,95 \cdot \left(1 + (0,799 - 0,2) \cdot \frac{110,28}{0,985 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} \right) = 1,01$$

$$C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,95 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{110,28}{0,985 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} \right) = 1,02$$

$$k_{yy} = 1,01$$

Određivanje interakcijskog faktora k_{zy} :

$$C_{mLT} = 0,2 + 0,8 \cdot \alpha_s$$

$$\Psi = 0$$

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{37,405}{44,679} = 0,837$$

$$C_{m,LT} = 0,2 + 0,8 \cdot 0,837 = 0,87 > 0,4$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{m,LT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(C_{m,LT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right)$$

$$\left(1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{m,LT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \left(1 - \frac{0,1 \cdot 1,7}{(0,87 - 0,25)} \cdot \frac{110,28}{0,278 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} \right) = 0,905$$

$$\left(1 - \frac{0,1}{(C_{m,LT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \left(1 - \frac{0,1}{(0,87 - 0,25)} \cdot \frac{110,28}{0,278 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} \right) = 0,944$$

$$k_{zy} = 0,944$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT,mod} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{110,28}{0,985 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} + 1,01 \cdot \frac{45,644}{0,574 \cdot \frac{147,67}{1,1}} = 0,696 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT,mod} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{110,28}{0,278 \cdot \frac{1264,5}{1,1}} + 0,944 \cdot \frac{45,644}{0,574 \cdot \frac{147,67}{1,1}} = 0,904 < 1,0$$

Element zadovoljava na M – N interakciju uz iskoristivost 90,4 %.

5.4. Slučaj 1 – Proračun konstrukcije nove građevine (Zagreb)

5.4.1. Unutarnje sile u elementima

U tablici 5.9 prikazane su unutarnje sile najiskorištenijeg elementa svake skupine elemenata građevine. Model građevine napravljen je u softveru Scia Engineer 24.0 [30], u kojem su dobivene i vrijednosti unutarnjih sila.

Tablica 5.9 – unutarnje sile u elementima nove građevine – Zagreb (slučaj 1)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Lukovi	23,4	18,8	40,8	- 124
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	-	-	60,3	- 48,1
Bočno pridržanje luka	-	-	69,721	- 58,478
Rubna podrožnica	0,290	0,351	57,4	- 38,1
Horizontalni poprečni vez u razini luka	-	-	16,8	- 13,4
Zatege lukova	-	-	87,2	-
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	-	-	21,9	- 8,45
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	-	-	52,0	- 25,7
Ispuna lukova	-	-	47,0	- 82,0
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	-	-	10,4	- 12,3
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	-	-	16,3	-17,6
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	-	-	43,1	- 44,4
Stupovi VPV – a	-	-	154	-164
Glavni stupovi	45,6	19,4	19,32	- 109
Zabatni stupovi	28,6	14,1	24,3	- 33,7

5.4.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti

U tablici 5.10 prikazani su odabrani poprečni presjeci, te iskoristivosti elemenata za mjerodavne kombinacije opterećenja za dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.

Tablica 5.10 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 1

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	RHS 200x100x5	ULS 1	81 %
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 101,6x3,6	ULS 9	80 %
Bočno pridržanje luka	CHS 88,9x3,2	ULS 9	86 %
Rubna podrožnica	IPE 140	ULS 2	91 %
Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 51x3,2	ULS 12	91 %
Zatege lukova	RD24	ULS 13	90 %
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 51x3,2	ULS 2	52 %
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 57x3,2	ULS 2	79 %
Ispuna lukova	CHS 70x3,6	ULS 9	72 %
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 42,4x3,2	ULS 8	75 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 48,3x3,2	ULS 7	80 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 60,3x3,2	ULS 3	93 %
Stupovi VPV – a	SHS 160x5,0	ULS 3	75 %
Glavni stupovi	IPE 300	ULS 8	90 %
Zabatni stupovi	IPE 240	ULS 7	74 %

5.4.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti

U tablici 5.11 prikazani su progibi elemenata izloženih savijanju te su uspoređeni sa dopuštenim progibima prema normi HRN EN 1990 NA [35]. Dopušteni progib prema normi iznosi $L/250$, gdje je L duljina elementa.

Tablica 5.11 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 1

Skupina elemenata	Mjerodavna kombinacija za GSU	Progib za mjerodavnu kombinaciju	Dopušteni progib [mm]	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	SLS 1	31,7 mm	$\frac{15860}{250} = 63,4$	50 %
Rubna podrožnica	SLS 3	14,2 mm	$\frac{5500}{250} = 22$	64,5 %
Glavni stupovi	SLS 4	22 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	58,8 %
Zabatni stupovi	SLS 12	23 mm	$\frac{8146}{250} = 32,6$	70,5 %

5.4.4. Utrošak materijala

Tablica 5.12 – utrošak materijala za građevinu od novih čeličnih elemenata - Zagreb (slučaj 1)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Lukovi	RHS 200x100x5	22,3	190,32	4244,1
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 88,9x3,2	6,76	195,87	1324,1
Bočno pridržanje luka	CHS 108x4	10,3	145,73	1501,0
Rubna podrožnica	IPE 140	12,9	89,16	1150,2
Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 51x3,2	3,77	41,68	157,1

Zatege lukova	RD24	3,55	85,70	304,2
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 51x3,2	3,77	102,65	387,0
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 57x3,2	4,25	57,14	242,9
Ispuna lukova	CHS 70x3,6	5,90	74,96	442,3
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 42,4x3,2	3,09	149,63	462,4
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 48,3x3,2	3,56	65,53	233,3
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 60,3x3,2	4,51	149,63	674,8
Stupovi VPV – a	SHS 160x5,0	24,1	37,4	901,3
Glavni stupovi	IPE 300	42,2	192,40	8119,3
Zabatni stupovi	IPE 240	30,7	59,61	1830,0
Horizontalna prečka	SHS 60x3,6	6,29	86,78	545,9
Ukupno [kg]:				22520
10% ukupne mase (vijci, varovi, limovi)				2252
Ukupna masa [kg]:				24772
Površina građevine [m ²]:				682,1
Volumen građevine [m ³]:				5623,1
Ukupno [kg/m²]:				36,32
Ukupno [kg/m³]:				4,41

5.5. Slučaj 2 – Proračun konstrukcije građevine – ponovna upotreba (Zagreb)

5.5.1. Unutarnje sile u elementima

U tablicama 5.13 i 5.14 prikazane su unutarnje sile najiskorištenijeg elementa svake skupine elemenata građevine. Model građevine napravljen je u softveru Scia Engineer 24.0 [30], u kojem su dobivene i vrijednosti unutarnjih sila.

Tablica 5.13 – unutarnje sile u novim elementima građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika – Zagreb (slučaj 2)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Lukovi	19,1	10,7	39,0	- 127
Horizontalni uzdužni spreg (HUS)	-	-	55,3	- 52,9
Bočno pridržanje luka	-	-	44,1	- 44,1
Rubna podrožnica	0,377	0,426	19,6	- 49,7
Zatege lukova	-	-	84,7	-
Horizontalni poprečni spreg u razini luka	-	-	6,49	- 7,69
Dijagonale (oslonci) za lukove	-	-	40,8	- 41,8
Horizontalna prečka	-	-	13,0	- 5,55
Stupovi (a)	34,9	14,9	22,2	- 25,2
Stupovi (b)	3,54	3,56	112	- 150

Tablica 5.14 – unutarnje sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika – Zagreb (slučaj 2)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	0,684	0,629	73,4	- 98,9
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	-	-	41,2	- 47,5
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	-	-	35,2	- 53,1
Gornja rešetka pojasevi	1,36	1,68	109	- 48,4
Gornja rešetka vertikale (a)	-	-	28,1	- 57,5
Gornja rešetka vertikale (b)	-	-	27,3	- 39,1
Gornja rešetka vertikale (c)	-	-	39,0	- 100
Gornja rešetka dijagonale	-	-	26,3	- 23,6
Gornja rešetka sekundarno (a)	2,53	2,87	21,8	- 16,1
Gornja rešetka sekundarno (b)	-	-	21,9	- 39,9
Konzole (a)	3,90	6,78	0,578	- 25,4
Konzole (b)	-	-	82,9	- 123
Konzole (c)	-	-	10,8	- 38,0
Konzole (d)	-	-	36,3	- 45,5
Konzole – stupovi (a)	3,27	2,99	153	- 130
Konzole – stupovi (b)	20,74	19,0	14,3	- 123

Rešetke stupova (a)	1,03	1,21	38,4	- 100
Rešetke stupova (b)	-	-	34,7	- 40,2
Rešetke stupova (c)	-	-	21,4	- 28,9
Rešetke stupova (d)	0,794	0,882	33,4	- 58,7
Vlačno tlačna stabilizacija	-	-	29,6	- 37,9
Stabilizacija konzola (a)	-	-	70,4	- 52,4
Stabilizacija konzola (b)	-	-	20,9	- 25,4
Stabilizacija konzola (c)	0,650	0,933	12,1	- 1,51
Stabilizacija konzola (d)	15,68	64,5	20,6	-35,7

5.5.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti

U tablicama 5.15 i 5.16 prikazani su odabrani poprečni presjeci, te iskoristivosti elemenata za mjerodavne kombinacije opterećenja za dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.

Tablica 5.15 – iskoristivosti novih elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 2

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	RHS 200x100x5,0	ULS 9	83 %
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 101,6x3,6	ULS 1	91 %
Bočno pridržanje luka	CHS 88,9x4,0	ULS 1	83 %
Rubna podrožnica	IPE 160	ULS 10	79 %
Zatege lukova	RD 24	ULS 13	92 %

Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 48,3x3,2	ULS 10	62 %
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 63,5x3,2	ULS 8	68 %
Horizontalna prečka	SHS 50x3,6	ULS 10	50 %
Stupovi (a)	IPE 270	ULS 2	68 %
Stupovi (b)	IPE 200	ULS 2	68 %

Tablica 5.16 – iskoristivosti ponovno korištenih elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 2

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	ULS 1	11 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	ULS 2	13 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	ULS 9	21 %
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	ULS 9	11 %
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	ULS 9	22 %
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	ULS 8	7 %
Gornja rešetka vertikale (c)	SHS 80x80x5	ULS 9	23 %

Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	ULS 2	4 %
Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	ULS 1	5 %
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	ULS 9	15 %
Konzole (a)	HEA 160	ULS 8	10 %
Konzole (b)	SHS 80x5,0	ULS 9	30 %
Konzole (c)	SHS 100x5,0	ULS 9	10 %
Konzole (d)	SHS 120x6,0	ULS 9	11 %
Konzole – stupovi (a)	HEA 160	ULS 2	13 %
Konzole – stupovi (b)	HEA 180	ULS 2	20 %
Rešetke stupova (a)	HEA 140	ULS 9	11 %
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	ULS 1	10 %
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	ULS 1	11 %
Rešetke stupova (d)	SHS 100x100x5	ULS 10	13 %
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	ULS 10	14 %
Stabilizacija konzola (a)	SHS 70x70x4	ULS 2	25 %
Stabilizacija konzola (b)	SHS 80x80x5	ULS 2	11 %
Stabilizacija konzola (c)	SHS 100x100x5	ULS 8	3 %
Stabilizacija konzola (d)	U (300x150x25)	ULS 10	8 %

5.5.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti

U tablici 5.17 prikazani su progibi elemenata izloženih savijanju te su uspoređeni sa dopuštenim progibima prema normi HRN EN 1990 NA [35]. Dopušteni progib prema normi iznosi $L/250$, gdje je L duljina elementa.

Tablica 5.17 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 2

Skupina elemenata	Mjerodavna kombinacija za GSU	Progib za mjerodavnu kombinaciju	Dopušteni progib [mm]	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	SLS 9	38,7 mm	$\frac{15860}{250} = 63,4$	61 %
Rubna podrožnica	SLS 2	3 mm	$\frac{4596}{250} = 18,4$	16,3 %
Glavni stupovi	SLS 4	16,4 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	43,9 %
Konzole – stupovi	SLS 9	1,5 mm	$\frac{3900}{250} = 15,6$	9,6 %

5.5.4. Utrošak materijala

Tablica 5.18 – utrošak materijala novih čeličnih elemenata za slučaj 2

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Lukovi	RHS 200x100x5,0	22,1	190,32	4206,1
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 101,6x3,6	8,70	195,87	1704,1
Bočno pridržanje luka	CHS 88,9x4,0	8,38	145,73	1221,2
Rubna podrožnica	IPE 160	15,8	89,16	1408,7
Zatege lukova	RD 24	3,55	85,70	304,2

Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 48,3x3,2	3,56	41,68	148,4
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 63,5x3,2	4,76	37,21	177,1
Horizontalna prečka	SHS 50x3,6	5,16	38,35	197,9
Stupovi (a)	IPE 270	36,1	37,4	1350,1
Stupovi (b)	IPE 200	22,4	13,44	301,1
Ukupno [kg]:				11019
10% ukupne mase (vijci, varovi, limovi)				1102
Ukupna masa [kg]:				12121

Tablica 5.19 – utrošak materijala ponovno korištenih čeličnih elemenata za slučaj 2

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	24,7	408,82	10 097,9
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	11,6	138,62	1608,0
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	8,18	364,41	2980,9
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	24,7	142,84	3528,1
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	8,18	64,60	528,4
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	14,6	64,60	943,2
Gornja rešetka vertikale (c)	SHS 80x80x5	11,6	74,44	863,5
Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	14,6	83,67	1221,6

Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	24,7	50,05	1236,2
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	8,18	458,40	3749,7
Konzole (a)	HEA 160	30,4	110,06	3345,8
Konzole (b)	SHS 80x80x5	11,6	253,08	2935,7
Konzole (c)	SHS 100x100x5	14,6	108,93	1590,4
Konzole (d)	SHS 120x120x6,0	21,2	129,18	2738,6
Konzole – stupovi (a)	HEA 160	30,4	171,6	5216,6
Konzole – stupovi (b)	HEA 180	35,5	23,4	830,7
Rešetke stupova (a)	HEA 140	24,7	29,86	737,5
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	11,6	90,40	1048,6
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	8,18	120,54	986,0
Rešetke stupova (d)	SHS 100x100x5	14,6	28,4	414,6
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	8,18	216,66	1772,3
Stabilizacija konzola (a)	SHS 70x70x4	8,18	310,95	2543,6
Stabilizacija konzola (b)	SHS 80x80x5	11,6	161,97	1878,9
Stabilizacija konzola (c)	SHS 100x100x5	14,6	6,29	91,8
Stabilizacija konzola (d)	U (300x150x25)	107,9	68,5	7391,2
Ukupna masa [kg]:				60280

Tablica 5.20 – ukupni utrošak materijala čeličnih elemenata za slučaj 2

Ukupna masa (novi čelični elementi) [kg]:	12121
Ukupna masa (ponovno korišteni čelični elementi) [kg]:	60280
Ukupna masa (cijela građevina) [kg]:	72401
Površina građevine [m ²]:	682,1
Volumen građevine [m ³]:	5623,1
Ukupno [kg/m²]:	106,1
Ukupno [kg/m³]:	12,88

5.6. Slučaj 3 – Proračun konstrukcije građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Zagreb)

5.6.1. Unutarnje sile u elementima

U tablicama 5.21 i 5.22 prikazane su unutarnje sile najiskorištenijeg elementa svake skupine elemenata građevine. Model građevine napravljen je u softveru Scia Engineer 24.0 [30], u kojem su dobivene i vrijednosti unutarnjih sila.

Tablica 5.21 – unutarnje sile u novim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Zagreb (slučaj 3)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Lukovi	23,9	19,1	-	- 127
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	-	-	55,8	- 55,0
Bočno pridržanje luka	-	-	44,5	- 50,2
Rubna podrožnica	1,87	3,32	63,0	- 33,4

Zatege lukova	-	-	85,2	
Horizontalni poprečni vez u razini luka	-	-	6,06	- 5,10
Dijagonale (oslonci) za lukove	-	-	18,3	- 47,7
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	-	-	24,8	- 40,4
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	-	-	29,8	-30,9
Kosnici	-	-	153	- 195
Horizontalna prečka	-	-	24,4	-7,16
Glavni stupovi (a)	50,1	21,3	22,3	- 115
Glavni stupovi (b)	8,52	8,43	85	- 217
Zabatni stupovi	3,77	5,04	31,5	- 29,7

Tablica 5.22 – unutarnje sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Zagreb (slučaj 3)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	0,824	2,38	148	- 193
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	-	-	0,511	- 85,4
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	-	-	35,3	- 71,0
Gornja rešetka pojasevi	5,92	7,98	123	- 97,6
Gornja rešetka vertikale (a)	-	-	47,1	-61,4

Gornja rešetka vertikalne (b)	-	-	95,7	- 142
Gornja rešetka vertikalne (c)	-	-	67,3	- 104
Gornja rešetka dijagonale	-	-	87,8	- 83,7
Gornja rešetka sekundarno (a)	3,21	4,18	29,1	- 27,1
Gornja rešetka sekundarno (b)	-	-	58,5	-72,3
Konzole	5,21	5,73	22,1	- 0,803
Rešetke stupova (a)	1,36	1,75	160	-228
Rešetke stupova (b)	-	-	69,4	-81,9
Rešetke stupova (c)	-	-	35,7	-38,3
Vlačno tlačna stabilizacija	-	-	63,5	- 72,6

5.6.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti

U tablicama 5.23 i 5.24 prikazani su odabrani poprečni presjeci, te iskoristivosti elemenata za mjerodavne kombinacije opterećenja za dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.

Tablica 5.23 – iskoristivosti novih elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 3

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	RHS 200x100x5	ULS 9	85 %
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 108x3,6	ULS 4	91 %
Bočno pridržanje luka	CHS 101,6x3,6	ULS 4	82 %
Rubna področnica	IPE 160	ULS 12	75 %

Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 51x3,2	ULS 10	35 %
Zatege lukova	RD24	ULS 8	88 %
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 76,1x3,6	ULS 4	59 %
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 88,9x3,6	ULS 8	92 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 60,3x3,2	ULS 2	83 %
Kosnici	SHS 110x4	ULS 2	80 %
Horizontalna prečka	SHS 70x3,6	ULS 11	70 %
Glavni stupovi (a)	IPE 300	ULS 3	76 %
Glavni stupovi (b)	IPE 220	ULS 3	83 %
Zabatni stupovi	IPE 140	ULS 2	67 %

Tablica 5.24 – iskoristivosti ponovno korištenih elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 3

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	ULS 3	26 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	ULS 4	21 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	ULS 9	24 %
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	ULS 3	14 %
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	ULS 4	23 %
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	ULS 3	26 %

Gornja rešetka vertikalne (c)	SHS 80x80x5	ULS 4	25 %
Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	ULS 10	16 %
Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	ULS 4	6 %
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	ULS 3	26 %
Konzole	HEA 160	ULS 3	7 %
Rešetke stupova (a)	HEA 140	ULS 3	29 %
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	ULS 3	20 %
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	ULS 3	17 %
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	ULS 2	26 %

5.6.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti

U tablici 5.25 prikazani su progibi elemenata izloženih savijanju te su uspoređeni sa dopuštenim progibima prema normi HRN EN 1990 NA [35]. Dopušteni progib prema normi iznosi $L/250$, gdje je L duljina elementa.

Tablica 5.25 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 3

Skupina elemenata	Mjerodavna kombinacija za GSU	Progib za mjerodavnu kombinaciju	Dopušteni progib [mm]	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	SLS 10	33,5 mm	$\frac{15860}{250} = 63,4$	53 %
Rubna podrožnica	SLS 4	2,2 mm	$\frac{5500}{250} = 22$	10 %
Glavni stupovi	SLS 11	27,5 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	73,5 %
Zabatni stupovi	SLS 2	4,2 mm	$\frac{8146}{250} = 32,6$	12,9 %

5.6.4. Utrošak materijala

Tablica 5.26 – utrošak materijala novih elemenata za građevinu projektiranu optimizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Lukovi	RHS 200x100x5	22,1	190,32	4206,1
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 108x3,6	9,27	195,87	1815,7
Bočno pridržanje luka	CHS 101,6x3,6	8,7	145,73	1267,9
Rubna področnica	IPE 160	15,8	89,16	1408,7
Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 51x3,2	3,77	41,68	157,1
Zatege lukova	RD24	3,55	85,70	304,2
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 76,1x3,6	6,44	37,21	239,6
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 88,9x3,6	7,57	43,27	327,6
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 60,3x3,2	4,51	55,45	250,1
Kosnici	SHS 110x4	13,1	16,20	212,2
Horizontalna prečka	SHS 70x3,6	7,42	38,35	284,6
Glavni stupovi (a)	IPE 300	42,2	37,40	1578,3
Glavni stupovi (b)	IPE 220	26,2	62,40	1634,9
Zabatni stupovi	IPE 140	12,9	31,20	402,5
Ukupno [kg]:				14089
10% ukupne mase (vijci, varovi, limovi)				1409
Ukupna masa [kg]:				15498

Tablica 5.27 – utrošak materijala ponovno korištenih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	24,7	408,82	10 097,9
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	11,6	138,62	1608,0
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	8,18	364,41	2980,9
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	24,7	142,84	3528,1
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	8,18	64,60	528,4
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	14,6	64,60	943,2
Gornja rešetka vertikale (c)	SHS 80x80x5	11,6	74,44	863,5
Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	14,6	83,67	1221,6
Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	24,7	50,05	1236,2
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	8,18	458,40	3749,7
Konzole	HEA 160	30,4	16,36	497,3
Rešetke stupova (a)	HEA 140	24,7	29,86	737,5
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	11,6	16,80	194,9
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	8,18	120,54	986,0
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	8,18	216,66	1772,3
Ukupna masa [kg]:				30946

Tablica 5.28 – ukupan utrošak materijala elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3)

Ukupna masa (novi čelični elementi) [kg]:	15498
Ukupna masa (ponovno korišteni čelični elementi) [kg]:	30946
Ukupna masa (cijela građevina) [kg]:	46444
Površina građevine [m ²]:	682,1
Volumen građevine [m ³]:	5623,1
Ukupno [kg/m²]:	68,1
Ukupno [kg/m³]:	8,26

5.7. Slučaj 4 – Proračun konstrukcije nove građevine (Pag)

5.7.1. Unutarnje sile u elementima

U tablici 5.29 prikazane su unutarnje sile najiskorištenijeg elementa svake skupine elemenata građevine. Model građevine napravljen je u softveru Scia Engineer 24.0 [30], u kojem su dobivene i vrijednosti unutarnjih sila.

Tablica 5.29 – unutarnje sile u elementima nove građevine – Pag (slučaj 4)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Lukovi	117	33,2	195	- 16,7
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	-	-	460	- 401
Bočno pridržanje luka	-	-	278	- 231
Rubna podrožnica	3,61	1,22	398	- 421

Unutarnji horizontalni poprečni vez u razini luka	-	-	41,0	- 27,7
Vanjski horizontalni poprečni vez u razini luka	-	-	159	- 75,5
Zatege lukova	-	-	44,0	-
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	-	-	53,0	- 60,1
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	-	-	48,8	- 185
Ispuna lukova	-	-	295	- 109
Horizontalna prečka	-	-	44,8	- 69,2
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	-	-	62,2	- 60,7
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	-	-	170	- 169
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	-	-	297	- 288
Stupovi VPV – a	-	-	1095	- 1184
Glavni središnji stupovi	379	162	149	- 106
Središnji stupovi	197	98	132	- 166
Zabatni stupovi	223	109	20,2	- 11,3

5.7.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti

U tablici 5.30 prikazani su odabrani poprečni presjeci, te iskoristivosti elemenata za mjerodavne kombinacije opterećenja za dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.

Tablica 5.30 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 4

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	RHS 260x180x8	ULS 2	91 %
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 193,7x6,3	ULS 2	94 %
Bočno pridržanje luka	CHS 114,3x4,5	ULS 2	90 %
Rubna podrožnica	HEA 200	ULS 2	74 %
Unutarnji horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 60,3x3,2	ULS 2	70 %
Vanjski horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 114,3x4,0	ULS 3	90 %
Zatege lukova	RD24	ULS 13	45 %
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 82,5x3,6	ULS 2	79 %
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 108x4	ULS 2	89 %
Ispuna lukova	CHS 114,3x4,5	ULS 2	88 %
Horizontalna prečka	SHS 80x3,6	ULS 4	79 %
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 70x3,2	ULS 12	86 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 108x4	ULS 3	87 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 139,7x4,5	ULS 3	84 %

Stupovi VPV – a	HEA 450	ULS 8	92 %
Glavni središnji stupovi	HEA 450	ULS 11	57 %
Središnji stupovi	HEA 320	ULS 8	65 %
Zabatni stupovi	HEA 320	ULS 7	68 %

5.7.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti

U tablici 5.31 prikazani su progibi elemenata izloženih savijanju te su uspoređeni sa dopuštenim progibima prema normi HRN EN 1990 NA [35]. Dopušteni progib prema normi iznosi $L/250$, gdje je L duljina elementa.

Tablica 5.31 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti za slučaj 4

Skupina elemenata	Mjerodavna kombinacija za GSU	Progib za mjerodavnu kombinaciju	Dopušteni progib [mm]	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	SLS 2	56,4 mm	$\frac{15860}{250} = 63,4$	89 %
Rubna podrožnica	SLS 3	14,2 mm	$\frac{5500}{250} = 22$	64,5 %
Glavni središnji stupovi	SLS 3	33,1 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	88,5 %
Glavni stupovi	SLS 3	32,6 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	87,2 %
Zabatni stupovi	SLS 2	25,9 mm	$\frac{8146}{250} = 32,6$	79,4 %

5.7.4. Utrošak materijala

Tablica 5.32 – utrošak materijala za građevinu od novih čeličnih elemenata – Pag (slučaj 4)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Lukovi	RHS 260x180x8	51,5	190,32	9801,5
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 193,7x6,3	29,1	195,87	5699,8
Bočno pridržanje luka	CHS 114,3x4,5	12,2	145,73	1777,9
Rubna področnica	HEA 200	42,3	89,16	3771,5
Unutarnji horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 60,3x3,2	4,51	41,68	188,0
Vanjski horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 114,3x4,0	10,9	83,27	907,6
Zatege lukova	RD24	3,55	85,70	304,2
Ispuna horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 82,5x3,6	7,0	102,65	718,6
Pojas horizontalnog poprečnog veza (HPV)	CHS 108x4	10,3	57,14	588,5
Ispuna lukova	CHS 114,3x4,5	12,2	74,96	914,5
Horizontalna prečka	SHS 80x3,6	8,55	107,73	921,1
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 70x3,2	5,27	149,63	788,6
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 108x4	10,3	65,53	675,0
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 139,7x4,5	15,0	149,63	2244,5
Stupovi VPV – a	HEA 450	140	37,4	5236
Glavni središnji stupovi	HEA 450	140	37,4	5236

Glavni stupovi	HEA 320	97,6	155	15128
Zabatni stupovi	HEA 320	97,6	59,61	5817,9
Ukupno [kg]:				60719
10% ukupne mase (vijci, varovi, limovi)				6072
Ukupna masa [kg]:				66791
Površina građevine [m ²]:				682,1
Volumen građevine [m ³]:				5623,1
Ukupno [kg/m²]:				97,92
Ukupno [kg/m³]:				11,88

5.8. Slučaj 5 – Proračun konstrukcije građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Pag)

5.8.1. Unutarnje sile u elementima

U tablicama 5.33 i 5.34 prikazane su unutarnje sile najiskorištenijeg elementa svake skupine elemenata građevine. Model građevine napravljen je u softveru Scia Engineer 24.0 [30], u kojem su dobivene i vrijednosti unutarnjih sila.

Tablica 5.33 – unutarnje sile u novim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)

Skupina elemenata	Unutarnje sile i momenti savijanja			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Lukovi	119	33,9	215	- 39,8
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	-	-	497	- 377

Bočno pridržanje luka	-	-	330	- 276
Rubna podrožnica	4,06	1,41	103	- 437
Zatege lukova	-	-	49,4	
Horizontalni poprečni vez u razini luka	-	-	39,8	- 44,6
Dijagonale (oslonci) za lukove	-	-	79,3	- 78,0
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	-	-	134	- 157
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	-	-	136	- 118
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	-	-	260	- 263
Horizontalna prečka	-	-	48,9	- 25,0
Stupovi VPV – a	-	-	1151	- 1103
Stupovi VUV – a	19,6	23,1	1281	- 1156
Glavni stupovi (a)	375	160	91,8	- 244
Glavni stupovi (b)	50,1	45,1	53,3	- 86,6
Zabatni stupovi	40,9	5,04	196	- 51,3

Tablica 5.34 – unutarnje sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)

Skupina elemenata	Unutarnje sile			
	Moment savijanja [kNm]	Poprečna sila [kN]	Uzdužna sila Vlak [kN]	Uzdužna sila Tlak [kN]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	16,2	22,5	290	- 165
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	-	-	291	- 321
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	-	-	292	- 58,5
Gornja rešetka pojasevi	6,65	7,94	283	- 413
Gornja rešetka vertikale (a)	-	-	155	- 156
Gornja rešetka vertikale (b)	-	-	253	- 259
Gornja rešetka vertikale (c)	-	-	336	- 84
Gornja rešetka dijagonale	-	-	182	- 180
Gornja rešetka sekundarno (a)	3,57	11,03	311	- 62,6
Gornja rešetka sekundarno (b)	-	-	171	- 114
Konzole	6,70	12,2	7,90	- 0,803
Rešetke stupova (a)	10,4	13,2	353	- 295
Rešetke stupova (b)	-	-	187	- 169
Rešetke stupova (c)	-	-	196	- 214
Vlačno tlačna stabilizacija	-	-	169	- 155

5.8.2. Dimenzioniranje elemenata prema graničnom stanju nosivosti

U tablicama 5.35 i 5.36 prikazani su odabrani poprečni presjeci, te iskoristivosti elemenata za mjerodavne kombinacije opterećenja za dimenzioniranje prema graničnom stanju nosivosti.

Tablica 5.35 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 5

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	RHS 260x180x8,8	ULS 10	90 %
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 193,7x6,3	ULS 10	87 %
Bočno pridržanje luka	CHS 139,7x4	ULS 10	90 %
Rubna podrožnica	HEA 200	ULS 10	83 %
Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 76,1x3,6	ULS 11	82 %
Zatege lukova	RD24	ULS 8	51 %
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 82,5x3,6	ULS 3	78 %
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 139,7x4,5	ULS 12	89 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 101,6x3,6	ULS 2	83 %
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 114,3x4	ULS 3	93 %
Horizontalna prečka	SHS 70x3,6	ULS 11	70 %
Stupovi VPV – a	220x220x8	ULS 3	93 %
Stupovi VUV – a	HEA 260	ULS 3	85 %
Glavni stupovi (a)	HEA 400	ULS 3	77 %
Glavni stupovi (b)	IPE 270	ULS 6	64 %
Zabatni stupovi	IPE 270	ULS 2	63 %

Tablica 5.36 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 5

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Mjerodavna kombinacija za GSN	Najveća iskoristivost elementa
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	ULS 12	56 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	ULS 2	89 %
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	ULS 12	87 %
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	ULS 10	55 %
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	ULS 10	55 %
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	ULS 2	48 %
Gornja rešetka vertikale (c)	SHS 80x80x5	ULS 10	71 %
Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	ULS 10	39 %
Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	ULS 10	31 %
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	ULS 10	51 %
Konzole	HEA 160	ULS 2	18 %
Rešetke stupova (a)	HEA 140	ULS 2	52 %
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	ULS 10	56 %
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	ULS 2	86 %
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	ULS 2	67 %

5.8.3. Progibi elemenata i provjera graničnog stanja uporabljivosti

U tablici 5.37 prikazani su progibi elemenata izloženih savijanju te su uspoređeni sa dopuštenim progibima prema normi HRN EN 1990 NA [35]. Dopušteni progib prema normi iznosi $L/250$, gdje je L duljina elementa.

Tablica 5.37 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti za slučaj 5

Skupina elemenata	Mjerodavna kombinacija za GSU	Progib za mjerodavnu kombinaciju	Dopušteni progib [mm]	Najveća iskoristivost elementa
Lukovi	SLS 10	40,7 mm	$\frac{15860}{250} = 63,4$	64,2 %
Rubna podrožnica	SLS 10	3,1 mm	$\frac{5500}{250} = 22$	14,1 %
Glavni stupovi (a)	SLS 11	28,1 mm	$\frac{9350}{250} = 37,4$	75,1 %
Glavni stupovi (b)	SLS 6	8,5 mm	$\frac{3900}{250} = 15,6$	54,5 %
Zabatni stupovi	SLS 2	3,2 mm	$\frac{3900}{250} = 15,6$	21 %

5.8.4. Utrošak materijala

Tablica 5.38 – utrošak materijala novih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Lukovi	RHS 260x180x8,8	56,8	190,32	10810,2
Horizontalni uzdužni vez (HUV)	CHS 193,7x6,3	29,1	195,87	5699,8
Bočno pridržanje luka	CHS 139,7x4	13,4	145,73	1952,8
Rubna podrožnica	HEA 200	42,3	89,16	3771,5
Horizontalni poprečni vez u razini luka	CHS 76,1x3,6	6,44	41,68	268,4

Zatege lukova	RD24	3,55	85,70	304,2
Dijagonale (oslonci) za lukove	CHS 82,5x3,6	7,00	37,21	260,5
Vertikalni uzdužni vez (VUV)	CHS 139,7x4,5	15,0	43,27	649,1
Vertikalni poprečni vez (VPV) – vanjski	CHS 101,6x3,6	8,70	55,45	482,4
Vertikalni poprečni vez (VPV) – unutarnji	CHS 114,3x4	10,9	119,61	1303,7
Horizontalna prečka	SHS 70x3,6	7,42	38,35	284,6
Stupovi VPV – a	SHS 220x8	52,0	31,2	1622,4
Stupovi VUV – a	HEA 260	68,2	31,2	2127,8
Glavni stupovi (a)	HEA 400	125	37,4	4675
Glavni stupovi (b)	IPE 270	36,1	15,6	563,2
Zabatni stupovi	IPE 270	36,1	31,2	1126,3
Ukupno [kg]:				35902
10% ukupne mase (vijci, varovi, limovi)				3590
Ukupna masa [kg]:				39492

Tablica 5.39 – utrošak materijala ponovno korištenih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)

Skupina elemenata	Poprečni presjek	Masa po jedinici duljine G [kg/m]	Ukupna duljina elemenata L [m]	Količina materijala [GxL]
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (a)	HEA 140	24,7	408,82	10 097,9
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (b)	SHS 80x80x5	11,6	138,62	1608,0
Donja rešetka pojasevi, vertikale i sekundarni el. (c)	SHS 70x70x4	8,18	364,41	2980,9
Gornja rešetka pojasevi	HEA 140	24,7	142,84	3528,1
Gornja rešetka vertikale (a)	SHS 70x70x4	8,18	64,60	528,4
Gornja rešetka vertikale (b)	SHS 100x100x5	14,6	64,60	943,2
Gornja rešetka vertikale (c)	SHS 80x80x5	11,6	74,44	863,5
Gornja rešetka dijagonale	SHS 100x100x5	14,6	83,67	1221,6
Gornja rešetka sekundarno (a)	HEA 140	24,7	50,05	1236,2
Gornja rešetka sekundarno (b)	SHS 70x70x4	8,18	458,40	3749,7
Konzole	HEA 160	30,4	16,36	497,3
Rešetke stupova (a)	HEA 140	24,7	29,86	737,5
Rešetke stupova (b)	SHS 80x80x5	11,6	16,80	194,9
Rešetke stupova (c)	SHS 70x70x4	8,18	120,54	986,0
Vlačno tlačna stabilizacija	SHS 70x70x4	8,18	216,66	1772,3
Ukupna masa [kg]:				30946

Tablica 5.40 – ukupan utrošak materijala elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)

Ukupna masa (novi čelični elementi) [kg]:	39492
Ukupna masa (ponovno korišteni čelični elementi) [kg]:	30946
Ukupna masa (cijela građevina) [kg]:	70438
Površina građevine [m ²]:	682,1
Volumen građevine [m ³]:	5623,1
Ukupno [kg/m²]:	103,2
Ukupno [kg/m³]:	12,53

5.9. Rezime rezultata analiziranih slučajeva

U tablici 5.41 je za svaki slučaj dana količina utrošenog novoproduzvedenog materijala i ponovno korištenog materijala, te je na kraju tablice prikazan ukupan utrošak materijala. Utrošena količina materijala potrebna je za proračun procijene životnog ciklusa svakog analiziranog slučaja nove građevine.

Tablica 5.41 – rezime količine utroška materijala za sve analizirane slučajeve

Analizirani slučajevi	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5
Novoproduzvedeni elementi [kg]	24772	12121	15498	66791	39492
Ponovno korišteni elementi [kg]	0	60280	30946	0	30946
Ukupna količina materijala [kg]	24772	72401	46444	66791	70438

6. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA RJEŠENJA GRAĐEVINE

6.1. LCA građevine – novi elementi (Zagreb), Slučaj 1

Ukupna masa čelika potrebna za provedbu analize: $W = 24772 \text{ kg}$

6.1.1. Modul A

Moduli A1 – A3

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [24]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A13} = 24772 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 25763 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) 30 kilometara.

Faktor emisija uslijed transporta prema [9], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}$

$$ECF_{A4} = 30 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}}{1000} = 0,003225 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot 24772 = 79,9 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [24]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A5} = 24772 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 16,3 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

$$EC_A = EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5}$$

$$EC_A = 25763 + 79,9 + 16,3$$

$$EC_A = 25859,2 \text{ kgCO}_2e = 25,9 \text{ tCO}_2e$$

6.1.2. Modul B

Prema [13], analiza modula B će dati vrlo male, ponekad i zanemarive količine emisije ugljikovog dioksida tijekom životnog vijeka. U bazi podataka [24] koja je korištene u ovom radu podaci o emisijama ugljikovog dioksida za čelik tijekom faze korištenja (za modul B) nisu dani. Dio B4 (zamjena elemenata, npr. zamjena fasade) je najčešće fokus faze korištenja građevine [9]. Kako se u radu promatra nosiva konstrukcija te se promatraju različita rješenja građevine (približno) iste geometrije, pretpostavka je da će se u svim slučajevima u fazi korištenja emitirati približno slična količina ugljikovog dioksida, stoga se u okviru ovog rada neće proračunati emisije modula B analize.

6.1.3. Modul C

MODUL C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

$$EC_{C1} = 24772 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 16,3 \text{ kgCO}_2e$$

MODUL C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 79,9 \text{ kgCO}_2e$$

C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitano iz baze podataka [24]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2e/kg$$

$$EC_{C3+C4} = 24772 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 577,2 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}$$

$$EC_C = 16,3 + 79,9 + 577,2$$

$$EC_C = 673,4 \text{ kgCO}_2e = 0,6734 \text{ tCO}_2e$$

6.1.4. Modul D

Prednosti zbog ponovne upotrebe ili recikliranja nakon životnog vijeka građevine mogu pridonijeti smanjenju emisija ugljikovog dioksida. Kako je u pitanju nova građevina, u proračunu će se uzeti u obzir cijela masa čelika.

$$EC_D = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{D,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula D [24]: $ECF_D = -0,316 \text{ kgCO}_2e/kg$

$$EC_D = 24772 \cdot (-0,316)$$

$$EC_D = -7828 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul D:

$$EC_D = -7,83 \text{ tCO}_2e$$

Tablica 6.1 – Rezultati LCA za građevinu od novih elemenata lociranu u Zagrebu

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C	Modul D
	A1 – A3	A4	A5			
tCO_2e	25,8	0,0799	0,0163	/	0,6734	-7,83

6.2. LCA građevine – ponovna upotreba (Zagreb), slučaj 2

6.2.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale

Za provedbu LCA građevine koja je napravljena ponovnom upotrebom elemenata platformi skele katedrale potrebno je uzeti u obzir i emisije ugljikovog dioksida zbog demontaže platformi skele sa katedrale, odnosno modul C1.

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (EC_{F_{C1,i}})]$$

Približna masa platformi skele katedrale (uključujući i „vanjski“ rešetkasti prsten koji se ne koristi za konstrukciju građevine): $W \approx 71654 \text{ kg}$

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $EC_{F_{C1}} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{C1} = 71654 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 47,1 \text{ kgCO}_2e$$

6.2.2. Modul A

Moduli A1 – A3

Za proračun modula A1 – A3 uzima se u obzir samo masa „novih“ elemenata građevine:

$$W \approx 12121 \text{ kg}$$

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [24]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A13} = 12121 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 12606 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) 30 kilometara. Također se pretpostavlja da se transport elemenata platformi skele koji se ponovno koriste odvija unutar 30 kilometara. Ovdje se stoga u obzir uzima ukupna masa cijele građevine: $W = 72401 \text{ kg}$

Faktor emisija uslijed transporta prema [9], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}$

$$ECF_{A4} = 30 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}}{1000} = 0,003225 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot 72401 = 233,5 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [24]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A5} = 72401 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 47,6 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

Za ovaj slučaj modulu A pridodati će se i emisija ugljikovog dioksida zbog demontaže elemenata platformi skele katedrale.

$$EC_A = EC_{C1} + EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5}$$

$$EC_A = 47,1 + 12606 + 233,5 + 47,6$$

$$EC_A = 12934 \text{ kgCO}_2e = 12,9 \text{ tCO}_2e$$

6.2.3. Modul C

MODUL C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

$$EC_{C1} = 72401 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 47,6 \text{ kgCO}_2e$$

MODUL C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 233,5 \text{ kgCO}_2e$$

C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitano iz baze podataka [24]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{C3+C4} = 72401 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 1686,9 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}$$

$$EC_C = 47,6 + 233,5 + 1686,9$$

$$EC_C = 1968 \text{ kgCO}_2\text{e} = 1,97 \text{ tCO}_2\text{e}$$

6.2.4. Modul D

Prednosti zbog ponovne upotrebe ili recikliranja nakon životnog vijeka građevine mogu pridonijeti smanjenju emisija ugljikovog dioksida.

$$EC_D = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{D,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula D [24]: $ECF_D = -0,316 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

$$EC_D = 72401 \cdot (-0,316)$$

$$EC_D = -22879 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul D:

$$EC_D = -22,9 \text{ tCO}_2\text{e}$$

Tablica 6.2 – Rezultati LCA ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C	Modul D
	A1 – A3	A4	A5			
tCO_2e	12,6	0,2335	0,0476	/	1,97	- 22,9

6.3. LCA građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Zagreb), slučaj 3

6.3.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

Približna masa platformi skele katedrale (uključujući i „vanjski“ rešetkasti prsten koji se ne koristi za konstrukciju građevine): $W \approx 71654 \text{ kg}$

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A5} = 71654 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 47,1 \text{ kgCO}_2e$$

6.3.2. Modul A

Moduli A1 – A3

Za proračun modula A1 – A3 uzima se u obzir samo masa „novih“ elemenata građevine:

$$W \approx 15498 \text{ kg}$$

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [24]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A13} = 15498 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 16118 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) 30 kilometara. Također se pretpostavlja da se transport elemenata platformi skele koji se ponovno koriste odvija unutar 30 kilometara. Ovdje se stoga u obzir uzima ukupna masa cijele građevine: $W = 46444 \text{ kg}$

Faktor emisija uslijed transporta prema [9], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}$

$$ECF_{A4} = 30 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}}{1000} = 0,003225 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,003225 \cdot 46444 = 149,8 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [24]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A5} = 46444 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 30,6 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

Za ovaj slučaj modulu A pridodati će se i emisija ugljikovog dioksida zbog demontaže elemenata platformi skele katedrale.

$$EC_A = EC_{C1} + EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5}$$

$$EC_A = 47,1 + 16118 + 149,8 + 30,6$$

$$EC_A = 16346 \text{ kgCO}_2e = 16,3 \text{ tCO}_2e$$

6.3.3. Modul C

MODUL C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/kg$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

$$EC_{C1} = 46444 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 30,6 \text{ kgCO}_2e$$

MODUL C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 149,8 \text{ kgCO}_2e$$

C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitao iz baze podataka [24]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2e/kg$$

$$EC_{C3+C4} = 46444 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 1082,1 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}$$

$$EC_C = 30,6 + 149,8 + 1082,1$$

$$EC_C = 1263 \text{ kgCO}_2e = 1,26 \text{ tCO}_2e$$

6.3.4. Modul D

Prednosti zbog ponovne upotrebe ili recikliranja nakon životnog vijeka građevine mogu pridonijeti smanjenju emisija ugljikovog dioksida.

$$EC_D = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{D,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula D [24]: $ECF_D = -0,316 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_D = 46444 \cdot (-0,316)$$

$$EC_D = -14676 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul D:

$$EC_D = -14,7 \text{ tCO}_2e$$

Tablica 6.3 – Rezultati LCA optimiziranom ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C	Modul D
	A1 – A3	A4	A5			
tCO_2e	16,1	0,1498	0,0306	/	1,26	- 14,7

6.4. LCA nove građevine (Pag), slučaj 4

Ukupna masa čelika potrebna za provedbu analize: $W = 66791 \text{ kg}$

6.4.1. Modul A

Moduli A1 – A3

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [24]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A13} = 66791 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 69462 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi na Pagu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) 30 kilometara.

Faktor emisija uslijed transporta prema [9], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}$

$$ECF_{A4} = 70 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2e/\text{kg}/\text{km}}{1000} = 0,003225 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$$

$$EC_{A4} = 0,0075243 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{A4} = 0,0075243 \cdot 66791 = 502,6 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [24]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A5} = 66791 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 43,9 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

$$EC_A = EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5}$$

$$EC_A = 69462 + 502,6 + 43,9$$

$$EC_A = 70009 \text{ kgCO}_2e = 70 \text{ tCO}_2e$$

6.4.2. Modul C

MODUL C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/kg$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

$$EC_{C1} = 66791 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 43,9 \text{ kgCO}_2e$$

MODUL C2

Transport demontiranih elemenata konstrukcije proračunat je na jednak način kao transport elemenata na gradilište (A4):

$$EC_{C2} = EC_{A4} = 502,6 \text{ kgCO}_2e$$

C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitano iz baze podataka [24]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2e/kg$$

$$EC_{C3+C4} = 66791 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 1556,2 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}$$

$$EC_C = 43,9 + 502,6 + 1556,2$$

$$EC_C = 2103 \text{ kgCO}_2e = 2,10 \text{ tCO}_2e$$

6.4.3. Modul D

Prednosti zbog ponovne upotrebe ili recikliranja nakon životnog vijeka građevine mogu pridonijeti smanjenju emisija ugljikovog dioksida. Kako je u pitanju nova građevina, u proračunu će se uzeti u obzir cijela masa čelika.

$$EC_D = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (EC_{F_{D,i}})]$$

Faktor potreban za proračun modula D [24]: $EC_{F_D} = -0,316 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_D = 66791 \cdot (-0,316)$$

$$EC_D = -21106 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul D:

$$EC_D = -21,1 \text{ tCO}_2e$$

Tablica 6.4 – Rezultati LCA za građevinu od novih elemenata lociranu na Pagu

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C	Modul D
	A1 – A3	A4	A5			
tCO_2e	69,5	0,503	0,0439	/	2,10	- 21,1

6.5. LCA građevine – optimalizacija ponovne upotrebe (Pag), slučaj 5

6.5.1. Modul C1 – demontaža platformi skele katedrale

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

Približna masa platformi skele katedrale (uključujući i „vanjski“ rešetkasti prsten koji se ne koristi za konstrukciju građevine): $W \approx 71654 \text{ kg}$

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{C1} = 71654 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 47,1 \text{ kgCO}_2e$$

6.5.2. Modul A

Moduli A1 – A3

Za proračun modula A1 – A3 uzima se u obzir samo masa „novih“ elemenata građevine:

$$W \approx 39492 \text{ kg}$$

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A13,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A1 – A3 [24]: $ECF_{A13} = 1,04 \text{ kgCO}_2e/\text{kg}$

$$EC_{A13} = 39492 \cdot 1,04$$

$$EC_{A13} = 41072 \text{ kgCO}_2e$$

Modul A4 (transport)

Pretpostavlja se da se proizvedeni elementi transportiraju na gradilište koje se nalazi u Zagrebu, te da je udaljenost između gradilišta i proizvodnog pogona manja (ili jednaka) 70 kilometara ($W_1 = 39492 \text{ kg}$). Također se pretpostavlja da se transport

elemenata platformi skele koji se ponovno koriste odvija unutar 320 kilometara ($W_2 = 30946 \text{ kg}$).

Faktor emisija uslijed transporta prema [9], za transport elemenata cestom, i za prosječno utovaren prijevozni kamion, iznosi: $TEF_{mode} = 0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}$

$$ECF_{A4,1} = 70 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}}{1000} = 0,0075243 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{A4,1} = 0,0075243 \cdot W_1$$

$$EC_{A4,1} = 0,0075243 \cdot 39492 = 297,1 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$ECF_{A4,2} = 320 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2\text{e/kg/km}}{1000} = 0,034397 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

$$EC_{A4,2} = 0,034397 \cdot W_2$$

$$EC_{A4,2} = 0,034397 \cdot 30946 = 1064,4 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$EC_{A4} = EC_{A4,1} + EC_{A4,2}$$

$$EC_{A4} = 297,1 + 1064,4 = 1361,5 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Modul A5

$$EC_{A5} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{A5,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula A5 [24]: $ECF_{A5} = 0,000658 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$

$$EC_{A5} = 70438 \cdot 0,000658$$

$$EC_{A5} = 46,3 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul A:

Za ovaj slučaj modulu A pridodati će se i emisija ugljikovog dioksida zbog demontaže elemenata platformi skele katedrale.

$$EC_A = EC_{C1} + EC_{A13} + EC_{A4} + EC_{A5}$$

$$EC_A = 47,1 + 41072 + 1361,5 + 46,3$$

$$EC_A = 42527 \text{ kgCO}_2e = 42,5 \text{ tCO}_2e$$

6.5.3. Modul C

MODUL C1

Faktor potreban za proračun modula C1 [24]: $ECF_{C1} = 0,000658 \text{ kgCO}_2e/kg$

$$EC_{C1} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C1,i})]$$

$$EC_{C1} = 70438 \cdot 0,000658$$

$$EC_{C1} = 46,3 \text{ kgCO}_2e$$

MODUL C2

Pretpostavlja se da se demontirani elementi (svi) transportiraju na udaljenost manju (ili jednaku) 70 kilometara.

$$ECF_{C2} = 70 \text{ km} \cdot \frac{0,10749 \text{ gCO}_2e/kg/km}{1000} = 0,0075243 \text{ kgCO}_2e/kg$$

$$EC_{C2} = 0,0075243 \cdot W_{uk}$$

$$EC_{C2} = 0,0075243 \cdot 70438 = 530 \text{ kgCO}_2e$$

C3 i C4

$$EC_{C3+C4} = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (ECF_{C3+C4,i})]$$

Faktor potreban za proračun modula C3 i C4, očitán iz baze podataka [24]:

$$ECF_{C3+C4} = (0,0233 + 0,0) = 0,0233 \text{ kgCO}_2e/kg$$

$$EC_{C3+C4} = 70438 \cdot 0,0233$$

$$EC_{C3+C4} = 1641,2 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul C:

$$EC_C = EC_{C1} + EC_{C2} + EC_{C3+C4}$$

$$EC_C = 46,3 + 530 + 1641,2$$

$$EC_C = 2217,5 \text{ kgCO}_2e = 2,22 \text{ tCO}_2e$$

6.5.4. Modul D

Prednosti zbog ponovne upotrebe ili recikliranja nakon životnog vijeka građevine mogu pridonijeti smanjenju emisija ugljikovog dioksida.

$$EC_D = \sum_{i=1}^n [W_i \cdot (EC_{F_{D,i}})]$$

Faktor potreban za proračun modula D [24]: $EC_{F_D} = -0,316 \text{ kgCO}_2e/kg$

$$EC_D = 70438 \cdot (-0,316)$$

$$EC_D = -22258 \text{ kgCO}_2e$$

Ukupne emisije ugljikovog dioksida za modul D:

$$EC_D = -22,3 \text{ tCO}_2e$$

Tablica 6.5 – Rezultati LCA optimiziranom ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu na Pagu

Količina emitiranog ugljikovog dioksida	Modul A			Modul B	Modul C	Modul D
	A1 – A3	A4	A5			
tCO_2e	41,1	1,36	0,0463	/	2,22	- 22,3

7. USPOREDBA REZULTATA I DISKUSIJA

U radu je analizirano pet različitih slučajeva konstrukcijskog rješenja građevine. Pritom je kod tri slučaja građevina smještena u Zagrebu, dok je za dva slučaja građevina smještena na Pagu. Razlog tomu je velika krutost konstrukcije čeličnih platformi za toranjske skele katedrale, zbog koje se predviđalo da lokacija građevine u Zagrebu, sa aspekta iskoristivosti elemenata, nije optimalna. Kako bi se rješenja mogla što vjerodostojnije usporediti, geometrija građevine je (koliko je to bilo moguće) koncipirana jednako u svim slučajevima. Promatranjem slučajeva gdje je građevina locirana na Pagu cilj je također bio razmotriti koliko su emisije ugljikovog dioksida povećane ukoliko se ponovno korišteni elementi platforme skele transportiraju na dulju udaljenost (gotovo 300 kilometara veću), ali isto tako koliko su ti elementi, odnosno cijela platforma skela, optimalnije iskorišteni. U nastavku ovog poglavlja biti će grafički prikazane i komentirane sve relevantne usporedbe promatranih slučajeva konstrukcijskog rješenja građevine.

7.1. Usporedba rješenja konstrukcije građevine locirane u Zagrebu

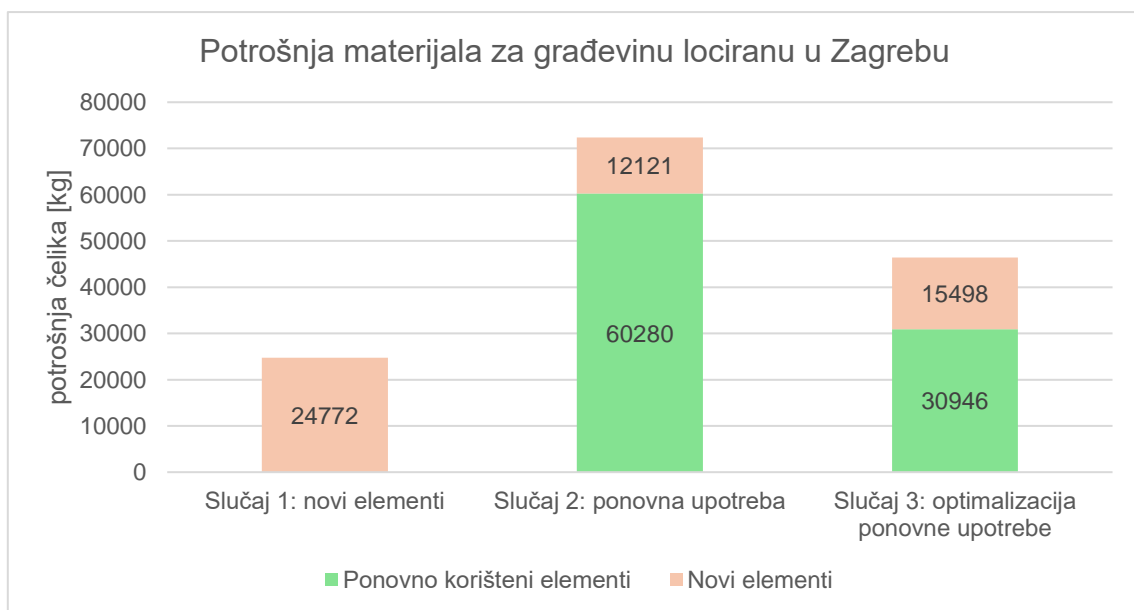
7.1.1. Utrošak materijala konstrukcijskih rješenja

U tablici 7.1 prikazana je rekapitulacija potrošnje materijala za različite slučajeve rješenja građevine locirane u Zagrebu. Rezultati su također grafički prikazani na slici 7.1, dok je na slici 7.2 prikazan utrošak materijala u ovisnosti o površini, odnosno volumenu građevine. Sasvim je jasno da je utrošak materijala najmanji ukoliko se građevina projektira iz novih elemenata (slučaj 1). Ponovnom upotrebom elemenata platformi za skele (slučaj 2) iskoristi se čak 192 % više materijala nego kod građevine projektirane novim elementima. Zbog toga je napravljen 3. slučaj rješenja građevine, gdje se ponovna upotreba elemenata platformi za skele optimizira sa aspekta potrošnje materijala. Uklonjeni su stupovi, dijelovi rešetke iznad stupova te stabilizacije na koje se rešetka u slučaju 2 oslanja, te su postavljeni novi stupovi i stabilizacija. Time je količina čelika u slučaju 3 reducirana za 36 % u odnosu na slučaj 2. Optimizacijom konstrukcije građevine se, ipak, još uvijek utroši 87,5 % više količine čelika u odnosu na novu građevinu.

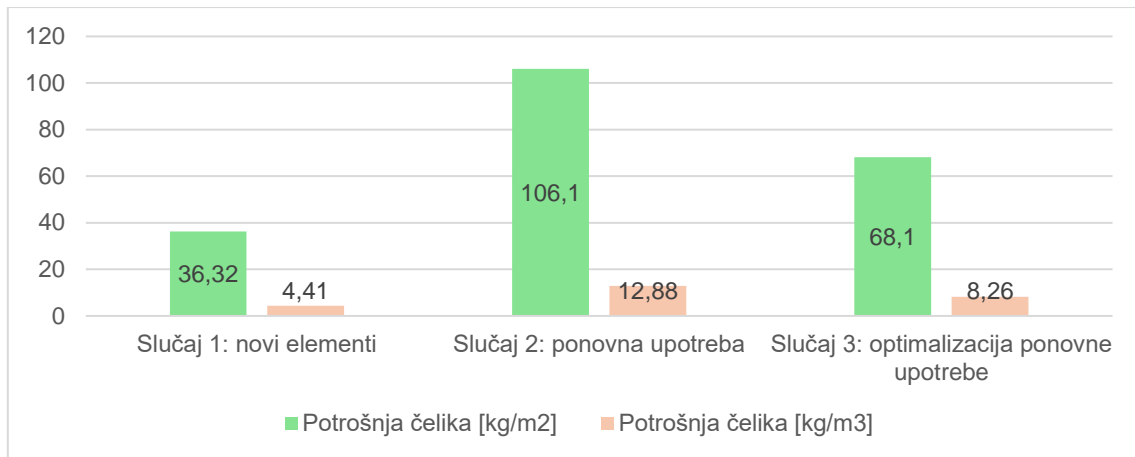
Tablica 7.1 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu u Zagrebu

	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3
Količina novih elemenata [kg]	24772	12121	15498
Količina ponovno korištenih elemenata [kg]	0	60280	30946
Udio ponovno korištenih elemenata [%]	0	83,3	66,6
Ukupna količina korištenih elemenata [kg]	24772	72401	46444

Nadalje, ukoliko se promotri udio ponovno korištenih elemenata u ukupnoj količini materijala konstrukcije, vidi se da je on najveći u slučaju 2 (83,3 %), dok u slučaju 3, dodatnim korištenjem novih elemenata kako bi se količina ponovno korištenih čeličnih elemenata smanjila, udio iznosi 66,6 %. Upravo udio ponovno korištenih elemenata može najviše i utjecati na smanjivanje emisija ugljikovog dioksida, jer se one najviše emitiraju prilikom same proizvodnje čeličnih elemenata. Stoga, nije dovoljno sagledati samo ukupno utrošenu količinu čelika da bi bili sigurni da je rješenje optimalno.



Slika 7.1 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu u Zagrebu



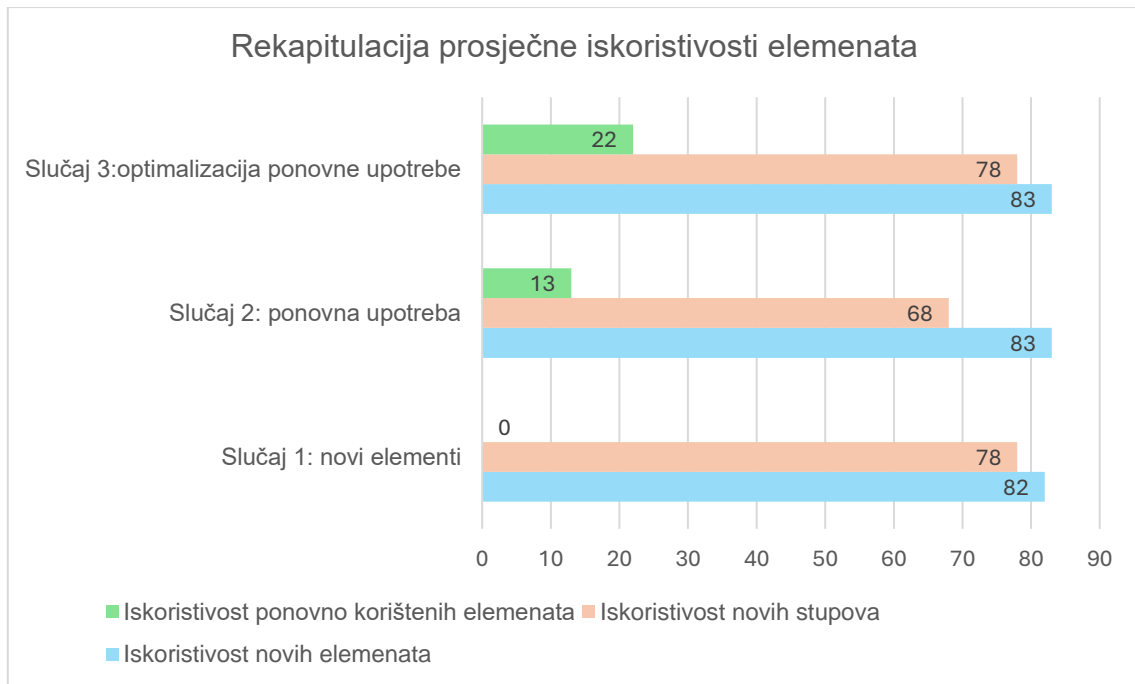
Slika 7.2 – Utrošak materijala u odnosu na površinu i volumen građevine locirane u Zagrebu

7.1.2. Iskoristivost elemenata kod različitih konstrukcijskih rješenja

Kako je utrošak materijala značajno veći za slučajeve 2 i 3 (ponovna upotreba) nego za slučaj 1 (novi elementi), a opterećenje kojem je izložena konstrukcija (osim vlastite težine) je jednako, postavlja se pitanje kolika je iskoristivost ponovno korištenih elemenata platforme skele u konstrukciji u odnosu na nove elemente, koji su i odabirani na način da im iskoristivost bude optimalna. Zbog velikog broja skupina elemenata koji se koriste u konstrukciji, a i zbog velikog broja elemenata platforme skele, u ovom poglavlju, u tablici 7.2 i grafički na slici 7.3 prikazane su prosječne iskoristivosti elemenata platforme skele (u slučajevima 2 i 3) i uspoređene s iskoristivosti novih elemenata (korištenih u slučaju 1). Prosječna iskoristivost elemenata izračunata je preko težinskog faktora na način da je iskoristivost svake skupine elemenata pomnožena sa upotrijebljenom količinom materijala te skupine elemenata u građevini. Zatim je ta vrijednost sumirana i podijeljena sa ukupnom količinom korištenog materijala.

Tablica 7.2 – Rekapitulacija prosječne iskoristivosti elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu

	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3
Prosječna iskoristivost novih elemenata [%]	82	83	83
Prosječna iskoristivost novih elemenata - stupovi [%]	78	68	78
Prosječna iskoristivost ponovno korištenih elemenata [%]	-	13	22

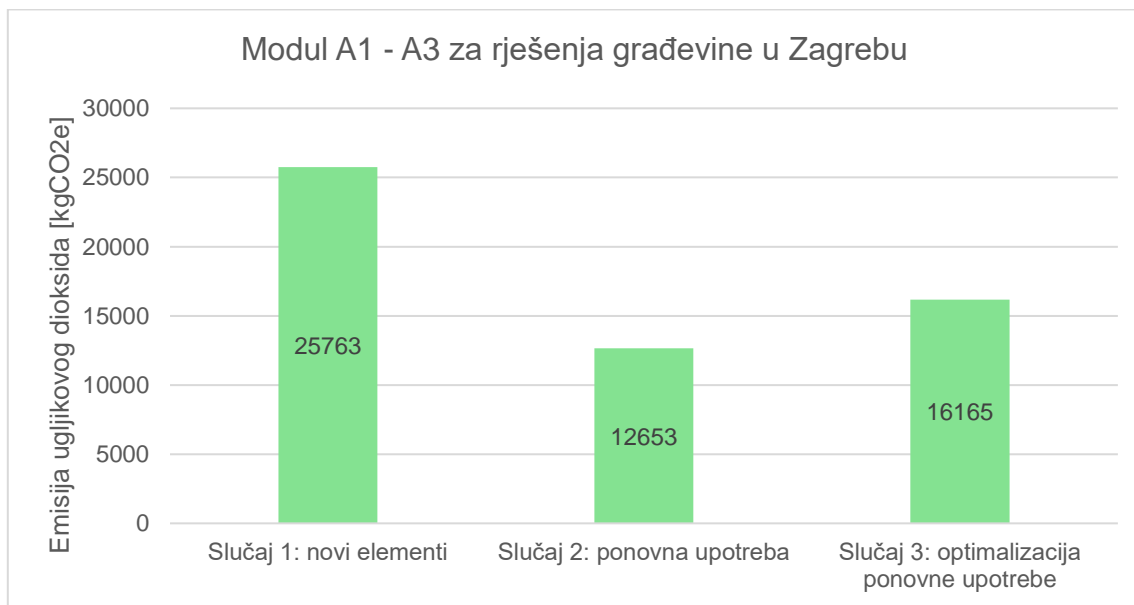


Slika 7.3 – Prosječna iskoristivost elemenata građevine locirane u Zagrebu

Na prikazanom grafu (slika 7.3) vidljivo je da su novi stupovi odvojeni od ostataka novih elemenata pri prikazivanju iskoristivosti. Njihova iskoristivost je također nešto manja od optimalne zone (80 – 100 %) zbog manjeg mogućeg izbora profila, pa je prednost dana „jačim“ profilima kako bi se bilo na strani veće sigurnosti umjesto da se stupovi, kritični elementi konstrukcije guraju u zonu jako velike iskoristivosti. Nadalje, na slici 7.3 se jasno može vidjeti koliko je iskoristivost elemenata platforme skele mala, odnosno koliko su profili predimenzionirani. Čak i optimizacijom konstrukcije (slučaj 3), prosječna iskoristivost skupine elemenata platforme skele raste svega 9 %, a i dalje nije ni blizu „optimalnoj“ zoni. Razlog tomu je velika nosivost i krutost platforme skele koja je sastavljena od prostornih sklopova i koje je iznimno teško rezati u pojedinačne elemente. S druge strane, horizontalno opterećenje vjetrom u Zagrebu je relativno malo, pa su elementi potrebni za preuzimanje tog opterećenja relativno „manjih“ dimenzija. Elementi rešetke, koji se ne mogu promijeniti jer se ponovno koriste, sa aspekta iskoristivosti u tom području nisu optimalni izbor.

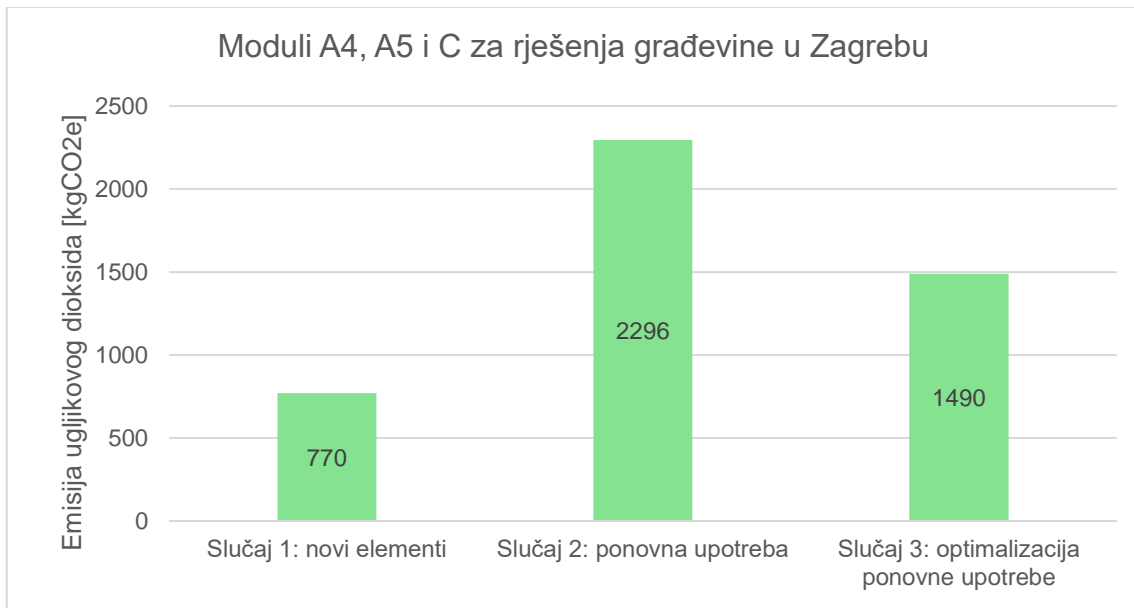
7.1.3. Rezultati LCA

Kako je i naglašeno u uvodnim poglavljima ovog rada, bitna prednost ponovne upotrebe čelika je mogućnost smanjenja emisija ugljikovog dioksida. U prethodnim poglavljima (7.1.1. i 7.1.2.) pokazano je da s aspekta utrošene količine čelika i s aspekta iskoristivosti elemenata slučajevi ponovne upotrebe elemenata platforme skele nije optimalan. Stoga će se u ovom poglavlju prikazati količine emisija ugljikovog dioksida za različita rješenja konstrukcije građevine. Kako su unutar rada analizirani moduli A, C i D (nosiva konstrukcija nema značajnog utjecaja na modul B), a modul D predstavlja potencijal redukcije emisija ugljikovog dioksida, ali ne nužno i stvarne redukcije emisije, usporediti će se rezultati modula A i C. Svi prikazani rezultati ovog poglavlja proračunati su u poglavlju 6.



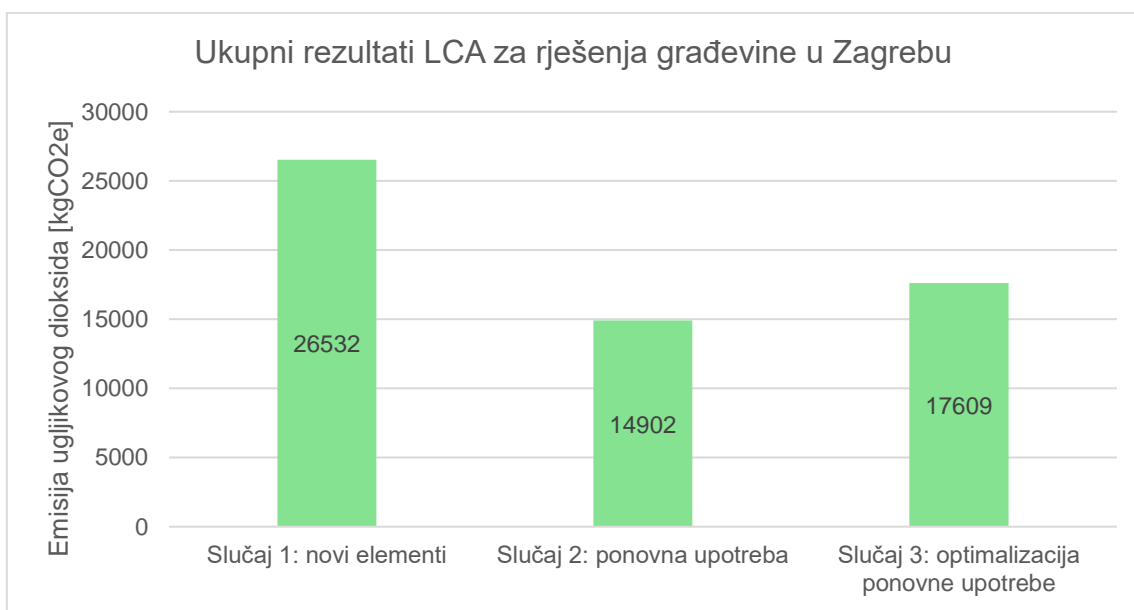
Slika 7.4 – Rezultati LCA modula A1 – A3 za građevine u Zagrebu

Na slici 7.4 prikazane su emisije ugljikovog dioksida uslijed proizvodnje čeličnih elemenata (moduli A1 – A3). Emisije su najveće ukoliko se građevina radi od novih elemenata (slučaj 1), reduciraju se čak 51 % u slučaju 2 (gdje je udio ponovno korištenih elemenata u ukupnoj količini čelika 83,3 %), dok se dodatnom optimalizacijom ponovne upotrebe emisije smanje za 37,3 %. Emisije uslijed proizvodnje novih elemenata su u slučaju 3 veći 21,7 % u odnosu na slučaj 2.



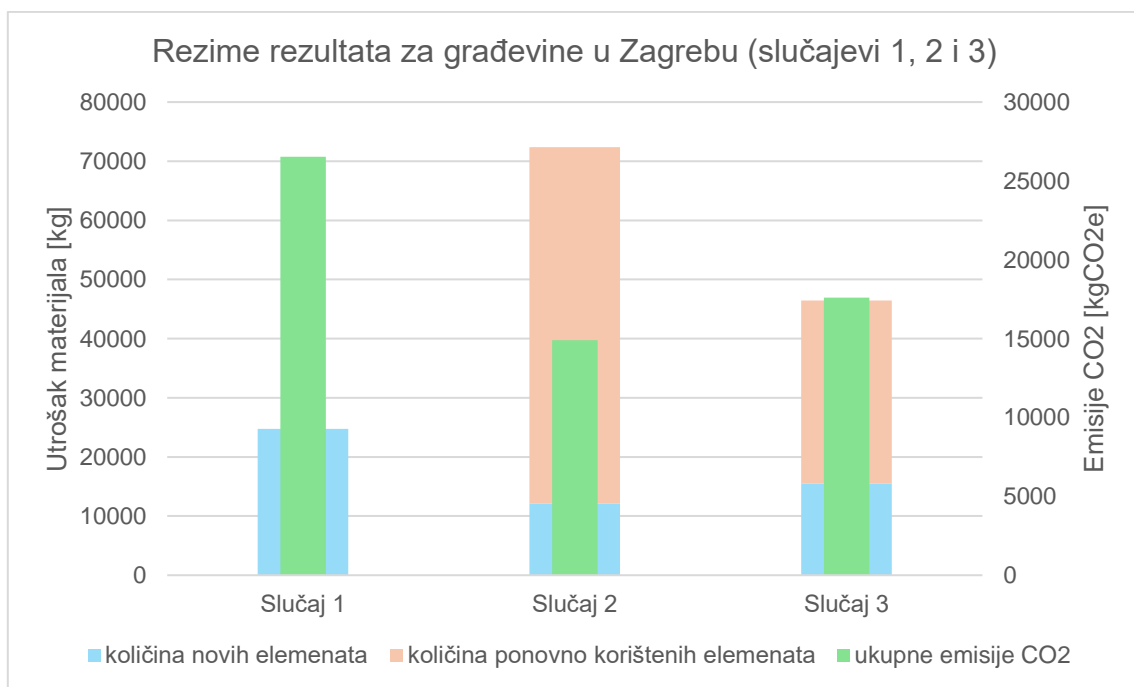
Slika 7.5 – Rezultati LCA modula A4, A5 i C za građevine u Zagrebu

Slika 7.5 prikazuje ostatak rezultata LCA analize tri slučaja (ostatak modula A i modul C), odnosno prikazuje emisije uslijed transporta elemenata, proizvodnje otpada te uslijed demontaže konstrukcije na kraju životnog vijeka. Tu ipak, zbog velikog utroška materijala slučajevi 2 i 3 rezultiraju većim emisijama ugljikovog dioksida u odnosu na slučaj 1. Međutim, kako se tijekom proizvodnje elemenata emitira najveća količina ugljikovog dioksida, povećane emisije u ostatku životnog vijeka u slučajevima ponovne upotrebe ne daju velik utjecaj u ukupnim emisijama, koje su i dalje značajno veće u slučaju 1, a kako je prikazano na slici 7.6.



Slika 7.6 – Ukupni rezultati LCA za rješenja građevine u Zagrebu

Ukupni rezultati LCA analize, slika 7.6, pokazuju da je, ukoliko se promatra utjecaj građevine na okoliš, najpovoljniji slučaj 2, gdje je udio ponovno upotrijebljenog čelika 83,3%. Optimizacijom količine čelika (slučaj 3) količina čelika se smanji za 36 % u odnosu na slučaj 2, dok su, kako se može vidjeti na slici 7.6, emisije ugljikovog dioksida povećane 18 %. Iz priloženog je vidljivo da za promatranu građevinu lociranu u Zagrebu, ponovna upotreba platformi toranjske skele katedrale ima svoje prednosti (po pitanju emisija ugljikovog dioksida i utjecaja na okoliš) i mane (utrošak materijala). Međutim, povećana količina materijala ne mora nužno značiti i veće financijske troškove projekta. Tu u obzir treba uzeti i npr. troškove rada radnika, troškove transporta, troškove demontaže skele. Nadalje, ukoliko je investitor i vlasnik elemenata koji se ponovno koriste, on tu količinu ne kupuje, već kupuje samo novoproduktivne čelične elemente. Tako je npr. u slučaju 1 korišteno 24,8 tona novih čeličnih elemenata, dok je u slučaju 3 korišteno 15,5 tona, što je 37,5 % manje. U slučaju 2 korišteno je najmanje novih čeličnih elemenata, 12,1 tona, a to je 51,2 % manje u odnosu na slučaj 1 i 21,9 % manje u odnosu na slučaj 3. Rezime utroška materijala i emisija CO₂ za građevine locirane u Zagrebu prikazan je na slici 7.7.



Slika 7.7 – Rezime rezultata za rješenja građevine u Zagrebu (slučajevi 1, 2 i 3)

7.2. Usporedba rješenja konstrukcije građevine locirane na Pagu

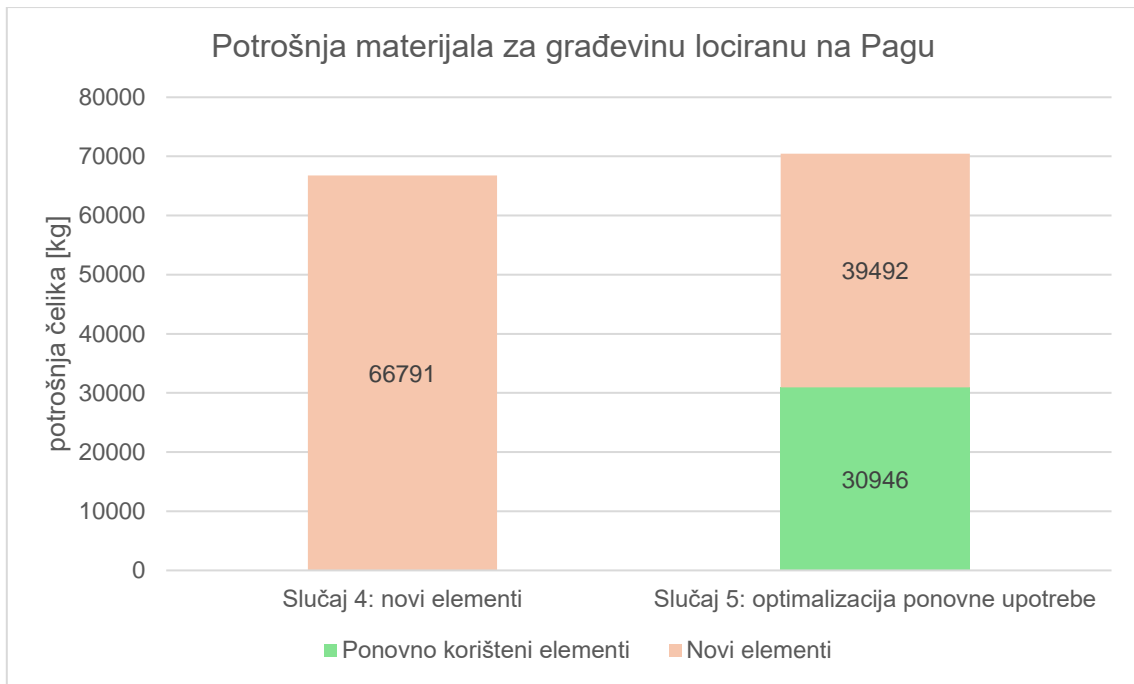
Kako je prikazano u poglavlju 7.1, lokacija građevine u Zagrebu nije optimalna za ponovnu upotrebu elemenata platforme skele s aspekta iskoristivosti, elementi platforme skele su predimenzionirani i značajno većih dimenzija od potrebnih za preuzimanje tog opterećenja. Nadalje, pokazalo se kako se relativno malim povećanjem emisija ugljikovog dioksida optimalizacijom ponovne upotrebe s aspekta utroška materijala, iskoristivost elemenata platforme skele može povećati, iako je ona i dalje predimenzionirana. Stoga je odlučeno promotriti građevinu na lokaciji sa većim opterećenjem vjetrom (Pag) i vidjeti može li ponovna upotreba elemenata platformi skele na takvoj lokaciji, i sa strane utroška materijala, biti jednako dobro (ili bolje) rješenje od korištenja isključivo novih elemenata.

7.2.1. Utrošak materijala konstrukcijskih rješenja

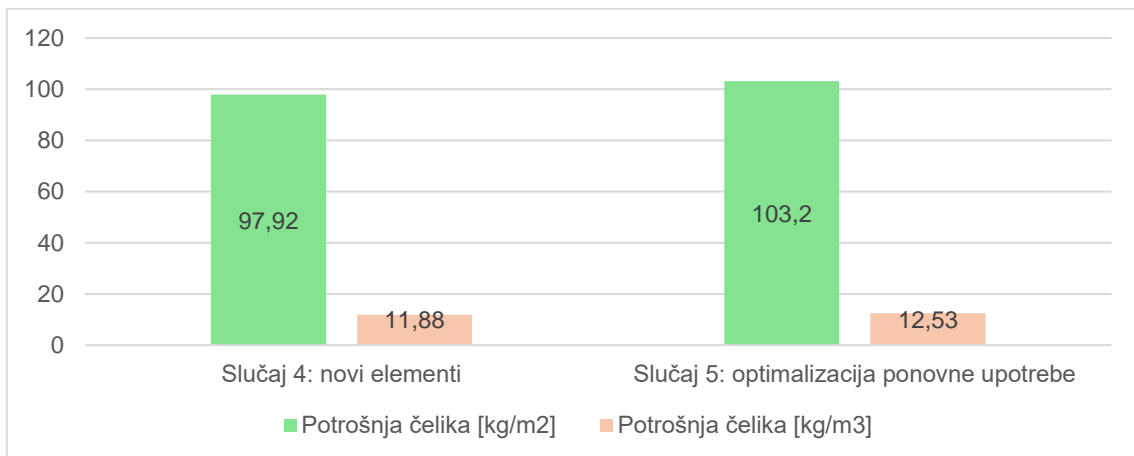
U tablici 7.3 prikazana je rekapitulacija potrošnje materijala za slučajeve rješenja građevine locirane na Pagu. Rezultati su također grafički prikazani na slici 7.8, dok je na slici 7.9 prikazan utrošak materijala u ovisnosti o površini, odnosno volumenu građevine. Kako je opterećenje vjetrom kojem je građevina izložena značajno veće, krovna konstrukcija, koja je u svim rješenjima izvedena od novih elemenata, dimenzionirana je s profilima većih dimenzija (i veće nosivosti), pa je stoga i utrošak čelika novih materijala veći. Udio ponovno upotrijebljenih elemenata u slučaju 5 sada iznosi 44 %. Međutim, iz rezultata se zaključuje da je, za ovu lokaciju, u oba slučaja utrošena gotovo jednaka količina materijala (za slučaj 5 utrošeno je svega 5,5 % više).

Tablica 7.3 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu na Pagu

	Slučaj 4	Slučaj 5
Količina novih elemenata [kg]	66791	39492
Količina ponovno korištenih elemenata [kg]	0	30946
Udio ponovno korištenih elemenata [%]	0	44,0
Ukupna količina korištenih elemenata [kg]	66791	70438



Slika 7.8 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu na Pagu



Slika 7.9 – Utrošak materijala u odnosu na površinu i volumen građevine locirane na Pagu

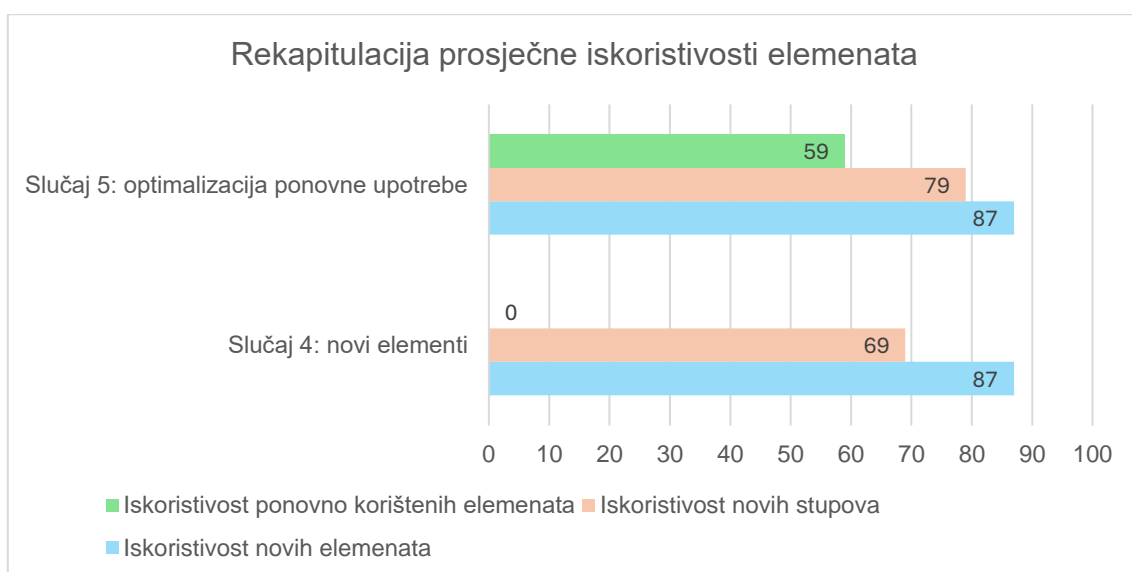
Utrošak materijala u ovisnosti o površini i volumenu građevine značajno veći nego za građevinu lociranu u Zagrebu. Možda bi, za takvo veće opterećenje s konstrukcijskog aspekta bila povoljnija nešto drukčija geometrija građevine, međutim za potrebe rada, kako bi se mogle dobiti relevantne vrijednosti za usporedbu rješenja, zadržana je ista geometrija građevine.

7.2.2. Iskoristivost elemenata konstrukcijskih rješenja

U poglavlju 7.2.1. pokazano je da je u slučaju građevine smještene na Pagu, utrošak materijala za oba slučaja približno jednak, što bi trebalo značiti da je i iskoristivost elemenata platforme skele u ovom slučaju puno veća. Zbog velikog broja skupina elemenata koji se koriste u konstrukciji, a i zbog velikog broja elemenata platforme skele, u ovom poglavlju, u tablici 7.4 i grafički na slici 7.10 prikazane su prosječne iskoristivosti elemenata platformi skele (u slučaju 5) i uspoređene s prosječnom iskoristivosti novih elemenata (korištenih u slučaju 4). Prosječna iskoristivost elemenata izračunata je preko težinskog faktora na način da je iskoristivost svake skupine elemenata pomnožena sa upotrijebljenom količinom materijala te skupine elemenata u građevini. Zatim je ta vrijednost sumirana i podijeljena sa ukupnom količinom korištenog materijala.

Tablica 7.4 – Rekapitulacija prosječne iskoristivosti elemenata za građevinu lociranu na Pagu

	Slučaj 4	Slučaj 5
Prosječna iskoristivost novih elemenata [%]	87	87
Prosječna iskoristivost novih elemenata - stupovi [%]	69	79
Prosječna iskoristivost ponovno korištenih elemenata [%]	-	59

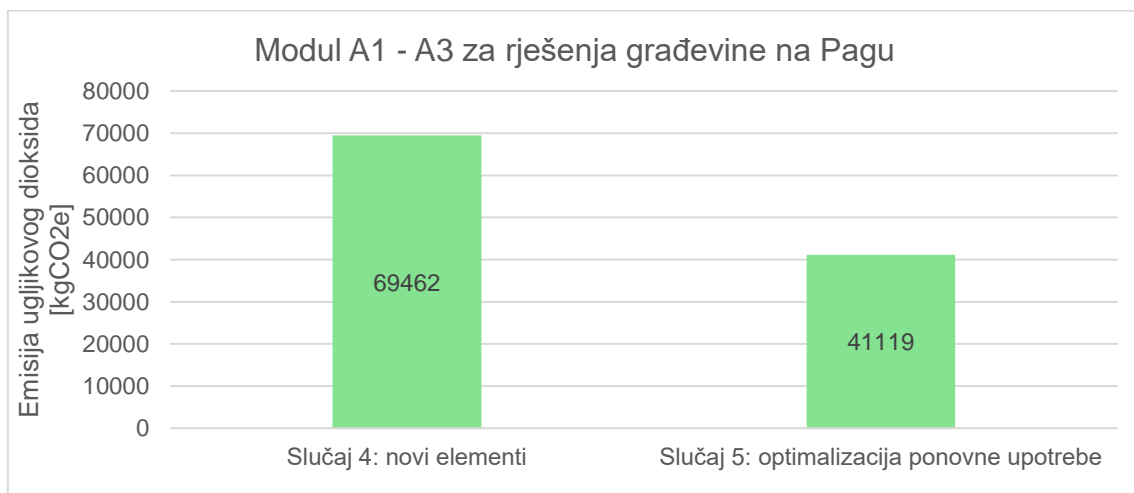


Slika 7.10 – Prosječna iskoristivost elemenata građevine locirane na Pagu

Na prikazanom grafu (slika 7.10) novi stupovi odvojeni od ostataka novih elemenata pri prikazivanju iskoristivosti (kao i u poglavlju 7.1). Njihova iskoristivost je također nešto manja od optimalne zone zbog manjeg mogućeg izbora profila, pa je prednost dana „jačim“ profilima kako bi se bilo na strani sigurnosti umjesto da se stupovi, kritični elementi konstrukcije guraju u zonu jako velike iskoristivosti. Nadalje, na slici se jasno može vidjeti da je iskoristivost elemenata platforme skele značajno bliža „optimalnoj“ zoni, odnosno elementi su puno bolje iskorišteni. Zaključak iz ove usporedbe je da je, s aspekta iskoristivosti elemenata, ponovna upotreba elemenata platforme skele puno bolji izbor na lokaciji na kojoj je građevina izložena većem opterećenju vjetrom (Pag).

7.2.3. Rezultati LCA

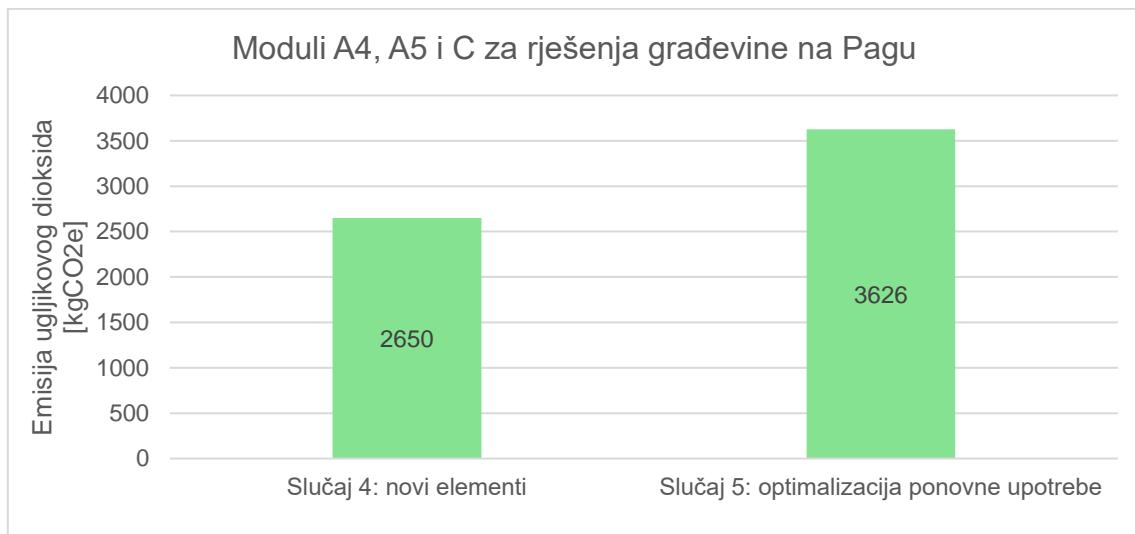
U ovom poglavlju će se prikazati količine emisija ugljikovog dioksida za različita rješenja konstrukcije građevine na Pagu. Kako su unutar rada analizirani moduli A, C i D (nosiva konstrukcija nema značajnog utjecaja na modul B), a modul D predstavlja potencijal redukcije emisija ugljikovog dioksida, ali ne nužno i stvarne redukcije emisije, usporediti će se rezultati modula A i C. Svi rezultati prikazani u ovom poglavlju proračunati su u 6. poglavlju rada.



Slika 7.11 – Rezultati LCA modula A1 – A3 za građevine na Pagu

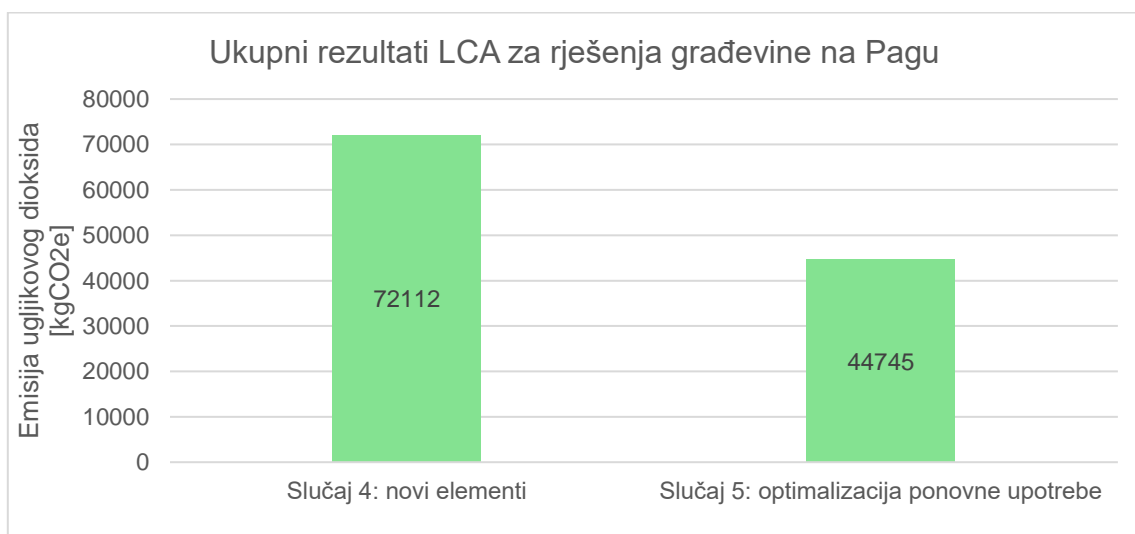
Na slici 7.11 prikazane su emisije ugljikovog dioksida uslijed proizvodnje čeličnih elemenata (moduli A1 – A3). Kao i kod slučajeva u Zagrebu, emisije su

značajno manje ukoliko se ponovno upotrebjavaju elementi platforme skele (manje su za čak 41 %, dok su u Zagrebu smanjene za 37 %).



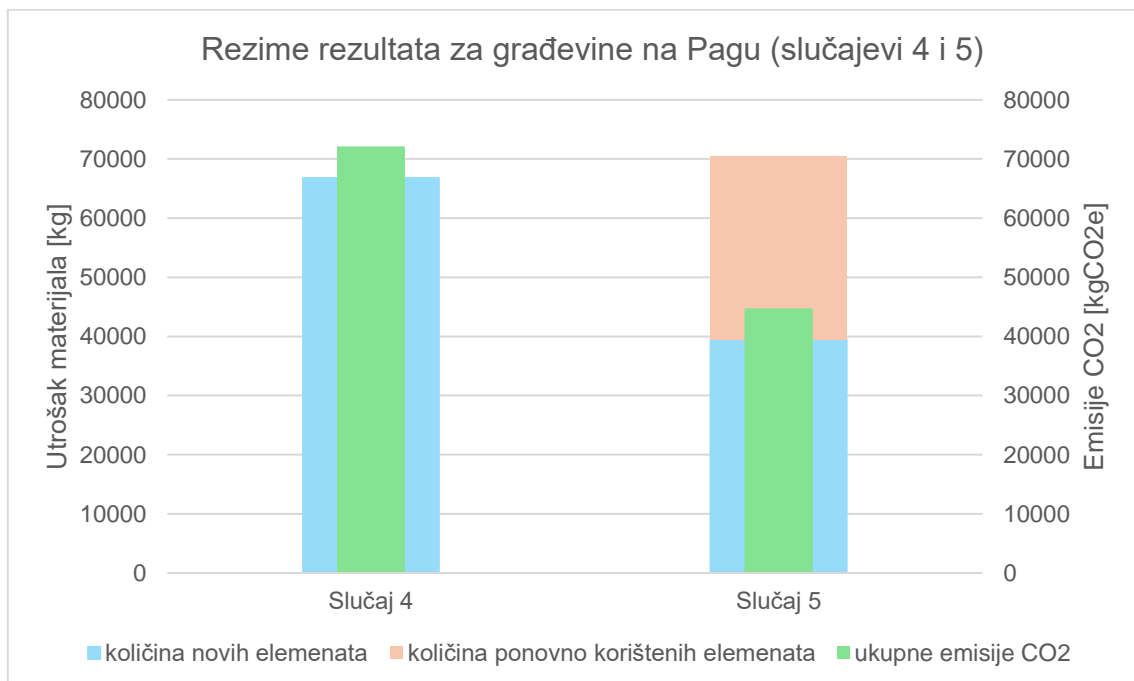
Slika 7.12 – Rezultati LCA modula A4, A5 i C za građevine na Pagu

Ostatak rezultata LCA (modul A4 i A5 i modul C) prikazan na slici 7.12, prikazuje emisije uslijed transporta elemenata, proizvodnje otpada, uslijed demontaže konstrukcije na kraju životnog vijeka. Emisije u slučaju 5 su prvenstveno veće zbog značajno veće udaljenosti transporta elemenata platforme skele iz Zagreba na Pag, dok se novi elementi transportiraju iz pogona koji se nalazi puno bliže. Međutim, kako se tijekom proizvodnje elemenata emitira najveća količina ugljikovog dioksida, povećane emisije u ostatku životnog vijeka u slučajevima ponovne upotrebe ne daju velik utjecaj u ukupnim emisijama, koje su i dalje značajno veće u slučaju 4.



Slika 7.13 – Ukupni rezultati LCA za rješenja građevine na Pagu

Ukupni rezultati LCA analize, slika 7.13, pokazuju da je, ukoliko se promatra utjecaj građevine na okoliš, značajno povoljniji slučaj 5, gdje je udio ponovno upotrijebljenog čelika 44,0 %. Iz priloženog je vidljivo da ukoliko se promatrana građevina gradi na Pagu, ponovna upotreba platformi skele katedrale ima značajne prednosti (po pitanju emisija ugljikovog dioksida i utjecaja na okoliš) dok su po pitanju utroška materijala i iskoristivosti elemenata rješenja približno jednako dobra. Kao i u slučaju građevine locirane u Zagrebu, za određivanje financijske isplativosti između ova dva rješenja u obzir treba uzeti i troškove rada radnika, troškove transporta (transport elemenata platforme skele iz Zagreba do Paga se odvija na puno većoj udaljenosti) i troškove demontaže skele. Nadalje, ukoliko je investitor ujedno i vlasnik elemenata koji se ponovno koriste, on tu količinu ne kupuje, već kupuje samo novoproduktivne čelične elemente. Tako je npr. u slučaju 4 korišteno 66,8 tona novih čeličnih elemenata, dok je u slučaju 5 korišteno 39,5 tona, što je 41 % manje. Rezime utroška materijala i emisija CO₂ za građevine locirane na Pagu prikazan je na slici 7.14.

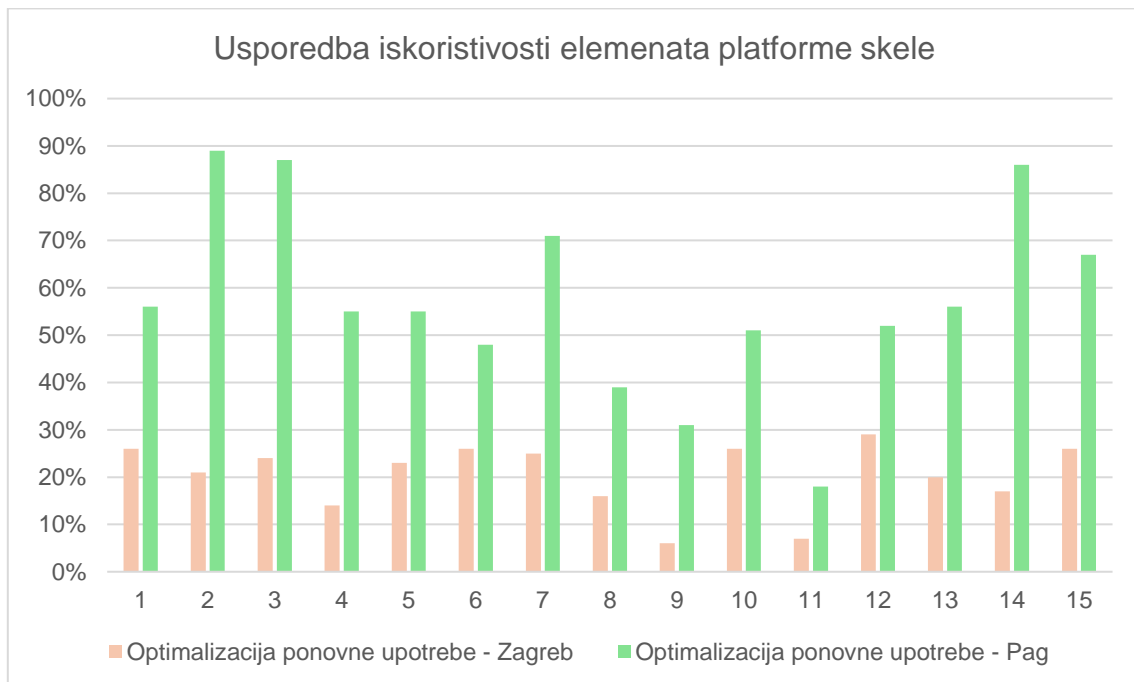


Slika 7.14 – Rezime rezultata za rješenja građevine na Pagu (slučajevi 4 i 5)

7.3. Usporedba rješenja optimalizacije ponovne upotrebe u Zagrebu i na Pagu (slučajevi 3 i 5)

7.3.1. Usporedba iskoristivosti elemenata platforme skele i emisija CO₂ uslijed transporta

Na slici 7.15 prikazana je usporedba iskoristivosti svake skupine elemenata platforme skele koji se ponovno upotrebljavaju. Jasno je vidljivo da je platforma skele optimalnije iskorištena ukoliko se nalazi na Pagu, nego u Zagrebu (neki elementi su za čak više od 60 % iskorišteniji). Razlog tomu je veliko opterećenje vjetrom kojem je cijela građevina, pa tako i platforma skela, izložena na Pagu, dok u Zagrebu takvog opterećenja nema. Dakle, lokacija građevine na Pagu je uzeta kako bi se pokazalo će kod odabranog konstrukcijskog rješenja građevine ponovno korišteni elementi biti, sa konstruktivnog aspekta, bolji u područjima u kojima će građevina biti izložena nekim „ekstremnijim“ opterećenjima (kako je prikazano u poglavlju 5.1 ovog rada, uzeta je brzina vjetra na Pagu koja je više nego dvostruko veća od brzine vjetra u Zagrebu).

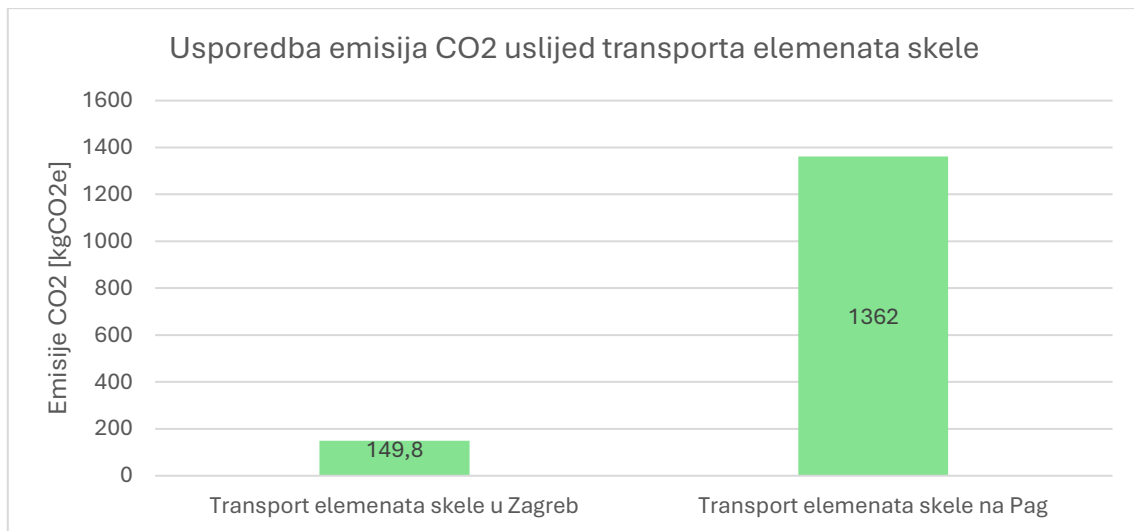


Slika 7.15 – Usporedba iskoristivosti elemenata platforme skele za građevinu lociranu u Zagrebu i na Pagu (slučajevi 3 i 5)

Unutar ovog poglavlja neće se uspoređivati emisije ugljikovog dioksida primjerice modula A1 – A3, jer su ti moduli povezani sa proizvodnjom novih čeličnih

elemenata. Kako je prethodno navedeno, opterećenje na Pagu je značajno veće, zbog toga će biti potrebni i novi elementi krovne konstrukcije i stupovi većih dimenzija u odnosu na one u Zagrebu, a što rezultira većim emisijama ugljikovog dioksida. Međutim, ta količina emisija nije vezana uz ponovno korištene elemente platforme skele i njihovom usporedbom ne bi se dobili relevantni rezultati.

U prethodnom dijelu ovog poglavlja zaključeno je kako su ponovno korišteni elementi platforme skele sa konstrukcijskog aspekta bolje iskorišteni na Pagu. Međutim, predviđena udaljenost transporta u Zagrebu uzeta je unutar 30 kilometara, dok je udaljenost do Paga uzeta unutar 320 kilometara. Stoga su emisije ugljikovog dioksida zbog transporta elemenata platformi skele na Pag nekoliko puta veće u odnosu na emisije zbog transporta unutar Zagreba, kako se može vidjeti na slici 7.16.



Slika 7.16 – Usporedba emisija CO2 uslijed transporta elemenata platformi skele u Zagreb i na Pag

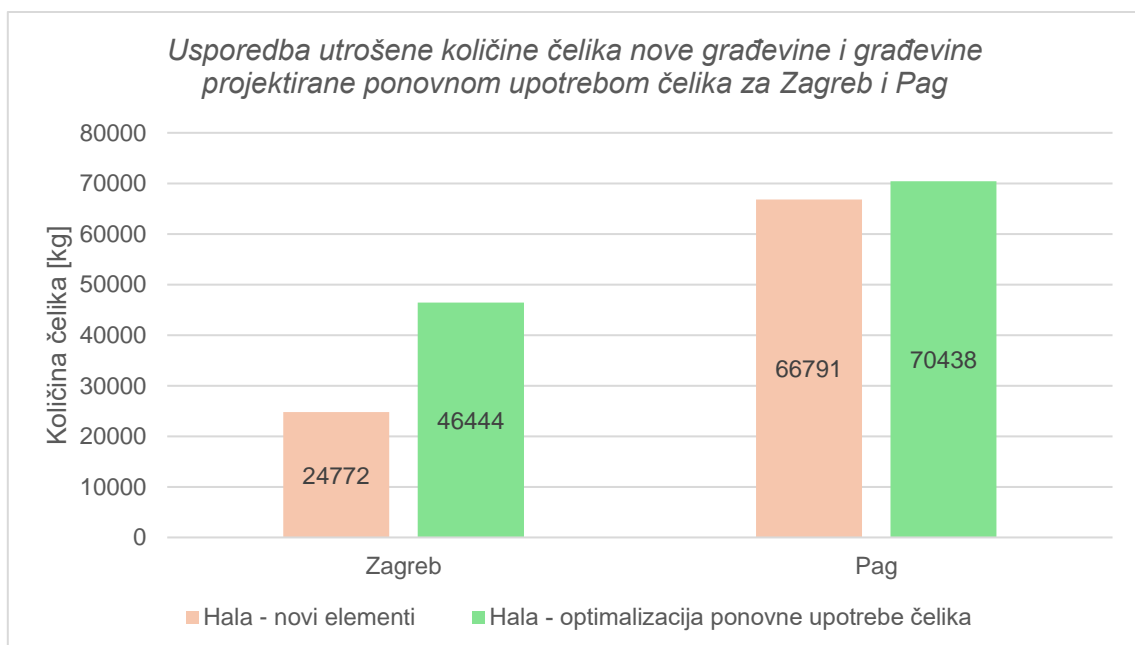
Međutim, udio ovih emisija u ukupnoj količini emisija ugljikovog dioksida je jako mali (oko 3 – 5 %). Dakle, kada se uspoređuju slučajevi optimalizacije ponovne upotrebe elemenata platforme skele za građevinu lociranu u Zagrebu i na Pagu, iskoristivost elemenata platformi skele značajno raste, dok povećanje emisija CO₂ zbog transporta elemenata platformi skele na veću udaljenost, u ukupnim emisijama ne izaziva značajan porast.

7.3.3. Usporedba razlike količine čelika za građevine u Zagrebu i na Pagu

Tablica 7.5 – Odnos količine čelika za građevine u Zagrebu i na Pagu

	Građevina – novi elementi	Građevina – optimalizacija ponovno korištenih elemenata	Razlika optimalizacija – novi elementi
Količina čelika – Zagreb [kg]	24772	46444	87,5 %
Količina čelika – Pag [kg]	66791	70438	5,5 %
Porast količine čelika [%]	169,6	51,7	-

U tablici 7.5 prikazan je porast količine čelika koji se dobije kada se građevina iste geometrije projektira od novih elemenata na lokaciji sa manjim (Zagreb) i većim opterećenjem (Pag). Može se vidjeti da je količina čelika porasla čak 1,7 puta. Ako se isti parametar promotri za građevinu dobivenu optimalizacijom ponovne upotrebe elemenata platforme skele katedrale, uočava se da je porast količine čelika značajno manji, nešto više od 0,5 puta. Taj rezultat odgovara zaključku da su elementi platforme skele povoljniji za ponovnu upotrebu na lokaciji sa većim opterećenjem.



Slika 7.17 – Usporedba utrošene količine čelika nove građevine (slučajevi 1 i 4) i građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika za Zagreb i Pag (slučajevi 3 i 5)

Nadalje, na slici 7.17 može se vidjeti razlika utrošenog čelika za lokaciju sa manjim opterećenjem (Zagreb) između građevine projektirane sa novim čeličnim elementima i građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe elemenata platforme skele katedrale. Ponovnim korištenjem čeličnih elemenata utrošak čelika veći je za 87,5 % u odnosu na građevinu gdje su korišteni novi čelični elementi. Ako se ista usporedba promotri za lokaciju sa većim opterećenjem (Pag), vidi se da je utrošak čelika veći za svega 5,5 %, što je još jedan rezultat koji potkrjepljuje zaključak da je ponovna upotreba elemenata platforme skele bolja na lokaciji s većim opterećenjem, odnosno gdje su elementi prvotne konstrukcije visoko iskorišteni.

7.4. Rezime prikazanih rezultata

U prethodnim dijelovima 7. poglavlja prikazani su svi bitni rezultati provedenih proračuna i dimenzioniranja elemenata svakog konstrukcijskog rješenja građevine te svi bitni rezultati provedene procjene životnog ciklusa (LCA – *life cycle assessment*). Usporedbom konstrukcijskih rješenja građevine locirane u Zagrebu (slučajevi 1, 2 i 3) dobiveni su sljedeći zaključci:

- Utrošak materijala 1,92 puta je veći kod građevine gdje su ponovno upotrjebljeni elementi platforme skele katedrale u odnosu na građevinu napravljenu od novih elemenata.
- Kod optimalizacije ponovne upotrebe (slučaj 3), količina čelika smanjena je za 36 % u odnosu na slučaj 2.
- Ukupne emisije ugljikovog dioksida manje su za 44 % kod slučaja 2 u odnosu na slučaj 1, dok su kod slučaja 3 veće za 18 % u odnosu na slučaj 2.
- Iako su emisije ugljikovog dioksida nešto veće, zaključak je da je slučaj 3 bolje rješenje od slučaja 2 kada se sagledaju svi promatrani parametri, smanjenje količine čelika značajno veće u odnosu na povećanje količine emisija ugljikovog dioksida, koje su još uvijek značajno smanjene u odnosu na građevinu projektiranu od novih elemenata (reducirane su 34 %).
- Količina utrošenog novog materijala manja je u slučajevima 2 i 3, gdje se ponovno koriste elementi platforme skele katedrale u odnosu na slučaj 1.

Međutim, i uz optimalizaciju ponovne upotrebe građevine, isplativost ponovnog korištenja elemenata platforme skele u Zagrebu s aspekta iskoristivosti se čini nedovoljna. Stoga su unutar rada analizirana još dva slučaja (4 i 5), u kojima je građevina locirana na području s većim opterećenjem vjetrom (Pag). Usporedbom konstrukcijskih rješenja građevine locirane na Pagu (slučajevi 4 i 5) dobiveni su sljedeći zaključci:

- Utrošak materijala uspoređujući slučajeve 4 i 5 približno je isti (razlika 5,5 %).
- Iskoristivost ponovno upotrijebljenih elemenata platforme skele u slučaju 5 značajno je veća u odnosu na slučaj 3 (ista geometrija, ali građevina u Zagrebu).
- Emisije ugljikovog dioksida smanjene su u slučaju 5 za 38 % u odnosu na slučaj 4.
- Povećanje emisija ugljikovog dioksida zbog razlike u duljini transporta kod slučajeva 3 i 5 nema značajan utjecaj u ukupnim emisijama CO₂ (udio emisija zbog transporta iznosi oko 3 – 5 % u ukupnim emisijama).
- Količina utrošenog novog materijala manja je u slučaju 5, gdje se ponovno koriste elementi platforme skele katedrale u odnosu na slučaj 4.

Na temelju svih prikazanih rezultata zaključuje se da ponovna upotreba elemenata platforme skele u svim promatranim slučajevima smanjuje emisije ugljikovog dioksida i građevinskog otpada, a ukoliko se građevina predviđa na lokaciji sa većim opterećenjima, može biti optimalna i sa konstrukcijskog aspekta. Nadalje, utrošak materijala nije jedino mjerilo ekonomske isplativosti konstrukcijskog rješenja. U analiziranim slučajevima utrošak materijala značajno je veći za građevine projektirane ponovnom upotrebom elemenata platforme skele katedrale u odnosu na građevine od novih elemenata. Međutim, cijena koštanja ponovno korištenih elemenata za vlasnika postojeće konstrukcije je 0,00 €, a i ako investitor nove građevine kupuje elemente koje će ponovno koristiti, oni su sigurno višestruko jeftiniji od novoprodučenih čeličnih elemenata. Doduše, ponovnom upotrebom javljaju se dodatni troškovi zbog ispitivanja materijala, demontaže, rezanja i dorada elemenata, ali ti troškovi su ipak zanemarivi u odnosu na cijenu novog čelika i izradu konstrukcije. Upravo to je prednost koja pokriva i malu iskorištenost ponovo korištenih elemenata u novoj građevini. Ukupne uštede ponovnom upotrebom elemenata platforme skele katedrale su stoga i po pitanju emisija CO₂ i građevinskog otpada, i financijske.

8. ZAKLJUČAK

8.1. Zaključci iz provedenih analiza

U svim profesijama, pa tako i građevinarstvu, koje je globalno jedan od većih zagađivača i potrošača prirodnih resursa, te generatora otpada, proteklih godina u duhu održivosti cilj je prelazak s linearnog na kružno gospodarstvo i smanjivanje emisija ugljikovog dioksida, kao i smanjivanje generiranja otpada. Jedan od povoljnijih materijala za ostvarivanje tog cilja je čelik, a njegova reciklaža i mogućnost ponovne upotrebe, ponajprije zahvaljujući montažnom načinu gradnje, pridonose smanjivanju emisija ugljikovog dioksida i generiranja otpada. S druge strane, grad Zagreb trenutno prolazi kroz potresnu obnovu u kojoj je povećan broj privremenih konstrukcija, kao što su skele i stabilizacijske konstrukcije potresom oštećenih zgrada, a jedna od poznatijih kojoj je potrebna analiza mogućnosti ponovne upotrebe je i platforma skele Zagrebačke katedrale.

U uvodnim poglavljima rada postavljena je hipoteza da će se ponovnom upotrebom elemenata platforme skele Zagrebačke katedrale prilikom projektiranja nove čelične građevine emisije ugljikovog dioksida reducirati. Platforme skele katedrale odabrane su za studiju slučaja jer predstavljaju reprezentativni primjer obnove Grada Zagreba od potresa, ali pitanje koje se postavlja je mogu li se čelične platforme skela ponovno iskoristiti u približno sličnoj formi i nakon obnove. Hipoteza rada potvrđena je provedenom studijom slučaja. Rad je dao odgovor na koji način se čelik korišten u privremenim čeličnim konstrukcijama može ponovno upotrijebiti u konstrukcijama trajne namjene i što je sve u toj analizi potrebno razmotriti.

Prije usporedba utjecaja građevine na okoliš emisijom CO₂, provedeni su proračuni elemenata nekoliko mogućih konstrukcijskih rješenja, a najvažniji rezultati detaljno su prikazani u 5. poglavlju rada. Cilj rada nije detaljno razraditi jedan projektni slučaj ponovne upotrebe čelika, već analizom različitih mogućih konstrukcijskih rješenja istog zadatka ispitati koje su prednosti ponovne upotrebe čeličnih elemenata te mogu li privremene konstrukcije, čiji broj uslijed obnove u Zagrebu raste, biti ponovno korištene kao (dio) trajne građevine, a u cilju smanjivanja emisija CO₂ i građevinskog otpada.

Provedenim proračunima u 5. poglavlju rada došlo se do sljedećih zaključaka:

- Ponovna upotreba dijelova čeličnih platformi skele Zagrebačke katedrale locirane u Zagrebu daje veće vrijednosti utroška materijala u odnosu na građevinu projektiranu u potpunosti s novim elementima (87,5 % više čelika). Međutim, značajan udio materijala u tom slučaju dolazi iz ponovno upotrijebljenih elemenata te je količina novih elemenata u slučaju ponovne upotrebe platformi skele manja u odnosu na građevinu projektiranu u potpunosti sa novim elementima (37,4 % manje čelika), što pokazuje i ekonomsku isplativost.
- Ponovna upotreba dijelova platformi skele Zagrebačke katedrale na lokaciji sa snažnijim opterećenjem vjetrom (na Pagu) daje približno slične rezultate vezane uz iskoristivosti elemenata i utrošak materijala (razlika 5,5 %) kao i građevina (približno) iste geometrije projektirana od novih elemenata na istoj lokaciji. Tu do izražaja dolazi krutost i otpornost platforme skele, čiji su elementi značajno iskorišteniji, nego što je to slučaj za iste elemente u Zagrebu. Pokazuje se dakle, da je prilikom ponovne upotrebe čeličnih elemenata bitno uzeti u obzir i mogućnost njihovog korištenja na drugoj lokaciji, ukoliko bi ti elementi zbog svojih dimenzija bili bolje iskorišteni.
- Zaključuje se da ponovna upotreba čeličnih elemenata pokazuje dobre rezultate po pitanju utroška materijala. Njihovom ponovnom upotrebom dobije se ekonomski i ekološki isplativija trajna konstrukcija koja se planira, ukoliko se troškovi ne gledaju isključivo kroz prizmu utrošene količine materijala, jer količina materijala ponovno korištenih elemenata nije trošak kao novoproduzvedeni elementi. Cijena ponovno korištenih elemenata za vlasnika je 0,00 €, a i ukoliko se oni kupuju višestruko su jeftiniji od novoproduzvedenih, čak i uz dodatne troškove koji se javljaju zbog ponovne upotrebe. Ponovno korištenje čeličnih elemenata isplativo je i zbog smanjivanja generiranja građevinskog otpada.

Proračunima životnog ciklusa konstrukcijskih rješenja građevine (6 poglavlje), dobivene su vrijednosti emisija ugljikovog dioksida vezane uz pojedini stadij životnog vijeka građevine. U poglavlju 7 rada detaljno su prikazani rezultati analiza i njihove relevantne usporedbe, a na temelju njih može se zaključiti sljedeće:

- Najveći dio ukupnih emisija u životnom vijeku građevine ostvaruje se prilikom same proizvodnje čeličnih elemenata. U promatranim slučajevima 1 i 4 se primjerice prilikom proizvodnje elemenata emitira preko 90 % ukupnih emisija CO₂ tijekom cijelog životnog ciklusa građevine.
- Transport ponovno korištenih elemenata na veće udaljenosti, iako povećava emisije ugljikovog dioksida, njihovo povećanje je jako malo (3 – 5 %) u odnosu na ukupne emisije konstrukcije tijekom cijelog životnog vijeka, stoga se zaključuje da je ponovna upotreba elemenata na većim udaljenostima ukoliko za time postoji potreba te ukoliko će tamo biti optimalnije iskorišteni, opravdana.
- Ponovna upotreba dijelova čeličnih platformi skele katedrale rezultira smanjenjem emisija CO₂ 35 - 45 % u promatranim slučajevima u odnosu na građevine projektirane novoprodučenim elementima.

Kako je cilj Europske unije prelazak država Europe s linearnog na kružno gospodarstvo, a kako je i prikazano u radu, ponovna upotreba čelika značajno reducira emisije CO₂ u odnosu na novoprodučene elemente. Ponovnom upotrebom elemenata se reducira i količina građevinskog otpada. Napušta se uvrježena ideja da građevinski element nakon jedne upotrebe postaje otpad (linearno gospodarstvo). To je i više nego očito ako su građevinski elementi čelični jer reciklažom čelik ne gubi fizikalna svojstva. U radu je također pokazano kako utrošena količina materijala (čelika) nije jedini pokazatelj cijene konstrukcije. Naime, ponovno korišteni elementi imaju povoljan utjecaj, kako ekološki tako i ekonomski (na cijenu konstrukcije), jer su jeftinije rješenje od novoprodučenih elemenata.

Ovaj rad je svojevrsan pilot projekt, koji uzrokuje temeljita razmišljanja i nudi kvalitetnu podlogu za argumentirano donošenje odluka o iskoristivosti čeličnih elemenata privremenih konstrukcija (čiji je broj zbog potresne obnove značajno porastao. Analizama koje su prikazane u ovom radu, **moгу se iz privremenih konstrukcija koje su služile za potresnu obnovu Grada Zagreba dobiti ekonomski isplativa rješenja trajnih konstrukcija i pri tome se mogu značajno smanjiti emisije ugljikovog dioksida i količine građevinskog otpada. Navedeno ukazuje na činjenicu da je prelazak građevinske industrije na kružno gospodarstvo ne samo moguć, već i poželjan i isplativ.**

8.2. Preporuke za daljnja postupanja i istraživanja

Na temelju provedene studije slučaja, mogu se dati sljedeće preporuke:

- Iako u ovom radu to nije bilo analizirano, potencijalno se može razmotriti daljnja optimizacija ponovne upotrebe platforme skele katedrale, na način da se uklonjen donji dio platforme skele u slučajevima 3 i 5 također iskoristi, ali u drugoj građevini te da se na taj način kombinacijom ponovne upotrebe i novih elemenata dobiju konstrukcije dvije građevine.
- Čelik je idealan materijal za ponovnu upotrebu jer uz montažno – demontažni princip gradnje (vijčani spojevi) daje mogućnost modularne gradnje čeličnih konstrukcija. Stoga se potiče korištenje vijčanih, iako demontažnih spojeva prilikom projektiranja, jer se zavareni elementi u sklopove moraju ili rezati, ili ponovno upotrijebiti kao sklopovi.
- Korištenje elemenata duljina koje su višekratnici nekog modula (npr. 3 m, 6 m, 9 m, 12 m...) može pomoći prilikom ponovne upotrebe istih elemenata.
- Potiče se izrada priručnika za projektiranje novih čeličnih konstrukcija u kojem bi se dale smjernice kako projektirati čelične konstrukcije na način da se one, po završetku životnog vijeka, lako demontiraju i ponovno upotrijebe na nekoj novoj lokaciji, ili jednostavno prenamijene in-situ.

ZAHVALE

Zahvaljujem se Katedri za metalne konstrukcije Zavoda za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu koja mi je omogućila istraživanje i pisanje ovog rada.

Posebno se želim zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Davoru Skejću, na inspirativnom vođenju i korisnim savjetima prilikom istraživanja i pisanja rada.

POPIS LITERATURE

- [1] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I. *Metalne konstrukcije 1*. Zagreb: IGH Zagreb; 1994.
- [2] Skejić, D. *Skripte iz kolegija Metalne konstrukcije 2 - ak. god. 2023./2024.*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [3] International Energy Agency *Iron and Steel Technology Roadmap*. Dostupno: [Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis - IEA](#) [Pristupljeno: 23. lipnja 2024.]
- [4] Stena Recycling *The value of recycling materials*. Dostupno na: <https://www.stenarecycling.com/news-insights/insights-inspiration/guides-articles/the-value-of-recycling-metals/>
- [5] Bureau of International Recycling *World steel recycling in figures 2017 – 2021*: 13th edition, Bruxelles; 2022.
- [6] Europska komisija, Glavna uprava za komunikacije, *Dokument za razmatranje o održivoj Europi do 2030*. Ured za publikacije; 2019. Dostupno na: <https://op.europa.eu/hr/publication-detail/-/publication/3b096b37-300a-11e9-8d04-01aa75ed71a1>
- [7] United Nations Environment Programme and Yale Center for Ecosystems + Architecture, *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. Dostupno na: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>. [Pristupljeno: 23. lipnja 2024.]
- [8] Fivet, C. *Steel, a material to reuse*. Stahlbau 91, H. 4, S. 268–273; 2022. Dostupno na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/stab.202200019>
- [9] Gibbons, O. P., Orr, J. J., Archer-Jones, C., Arnold, W., Green, D. *How to calculate embodied carbon*, 2nd edition, London: The Institution of Structural Engineers; 2022.
- [10] Preuzeto s web stranice <https://zagreb.hr/godina-dana-od-razornog-potresa-aktivnosti-gradski/170151> [Pristupljeno: 20. lipnja 2024.]
- [11] Preuzeto s web stranice <https://www.24sata.hr/news/zagreb-na-dan-potresa-i-danas-751975> [Pristupljeno: 20. lipnja 2024.]
- [12] Preuzeto s web stranice <https://www.zg-nadbiskupija.hr/zagrebacka-katedrala-zatvorena-zbog-teskih-ostecenja-u-potresima/19300> [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]

-
- [13] Preuzeto s web stranice <https://katedrala.hr/hr/tornjevi-zagrebacke-katedrale-dodatno-se-skracuju/804> [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [14] Preuzeto s web stranice https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/potresi_kod_petrinje/2020-2021 [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [15] Skejić, D., Lukačević, I., Čurković, I., Čudina, I. Primjena čelika kod rekonstrukcije zgrada osjetljivih na potres. *Građevinar*, 72, 2020; 10: 955 – 966. Dostupno na: <https://doi.org/10.14256/JCE.2970.2020> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2024.]
- [16] Tehnologija građenja visokogradnja – 10. predavanje. Dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/10_predavanje_2016_17.pdf [Pristupljeno: 20. lipnja 2024.]
- [17] Preuzeto s web stranice <https://baustela.hr/obnova/razgovarali-smo-s-tvrtkom-koja-radi-na-kompleksnoj-obnovi-zagrebacke-katedrale-ojacavaju-svodove-a-vjetar-diktira-tempo/> [Pristupljeno: 20. kolovoza 2024.]
- [18] Skejić, D., Čudina, I., Valčić, A., Lazarević, D. Unique Aspects of Scaffolding Design for the Urgent Seismic Retrofitting of Zagreb Cathedral. *Buildings* 2024, 14, 2167. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/buildings14072167> [Pristupljeno: 27. kolovoza 2024.]
- [19] HRN EN ISO 14040: 2008 Upravljanje okolišem – Procjena životnog ciklusa (LCA) – Načela i okvir rada
- [20] Simonen, K., Huang, M., Rodriguez, B. X., Todaro, L. *Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide*. Washington: University of Washington; 2019.
- [21] HRN EN 17472: 2022 Održivost građevina – Ocjenjivanje održivosti inženjerskih građevina – Metode proračuna
- [22] Brynhildsen, H. *Advantages of steel as a building material from a sustainability perspective*. Gothenburg: Chalmers University of Technology; 2020.
- [23] Girão Coelho, A. M., Pimentel, R., Ungureanu, V., Hradil, P., Kesti, J. *European Recommendations for Reuse of Steel Products in Single-Storey Buildings*. 1st edition. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS); 2020.
- [24] EPD database for structural steel. Dostupno na: https://www.epddanmark.dk/media/rphaiaue/md-20042-en_rev1.pdf [Pristupljeno: 12. srpnja 2024.]
-

-
- [25] The Alliance for Sustainable Building Products (ASBP) Disrupt project: case studies – Brent cross town primary substation. Dostupno na: <https://asbp.org.uk/case-studies/brent-cross-town-primary-substation> [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [26] Preuzeto s web stranice: [It's a wrap – newsteelconstruction.com](https://www.newsteelconstruction.com) [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [27] The Alliance for Sustainable Building Products (ASBP) Disrupt project: case studies – Elephant and Castle Town centre redevelopment. Dostupno na: <https://asbp.org.uk/case-studies/elephant-castle-town-centre-redevelopment> [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [28] Preuzeto s web stranice: [A vision for the future - Elephant and Castle Town Centre](https://www.elephantandcastle.com) [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [29] The Alliance for Sustainable Building Products (ASBP) Disrupt project: case studies – Holbein Gardens. Dostupno na: <https://asbp.org.uk/case-studies/holbein-gardens-disrupt> [Pristupljeno: 29. lipnja 2024.]
- [30] Programski paket SCIA Engineer 24.0, 2024.
- [31] HRN EN 1991-1-3/NA Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-3 opća djelovanja – opterećenje snijegom – Nacionalni dodatak (HRN EN 1991-1-3:2012/NA:2016)
- [32] HRN EN 1991-1-4/NA Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-4 opća djelovanja – djelovanja vjetra – Nacionalni dodatak (HRN EN 1991-1-4:2012/NA:2012/Ispr.1:2023)
- [33] HRN EN 1993-1-1/NA Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2022)
- [34] *Separat VIII. iz kolegija Metalne konstrukcije 2 - ak. god. 2023./2024.*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Dostupno na: https://www.grad.unizg.hr/images/50012762/04_Nosac_momenti_poprecno_o_pterecenje_C1_C2_protected.pdf [Pristupljeno: 15. lipnja 2024.]
- [35] HRN EN 1990 Eurokod 0: Osnove projektiranja konstrukcija i geotehničkog projektiranja (EN 1990:2023)
-

POPIS SLIKA

Slika 1.1 – Usporedba odnosa proizvodnje iz recikliranog čelika i iz rude [5].....	2
Slika 1.2 – Prikaz faza kružnog gospodarstva [6].....	3
Slika 1.3 – Odnos potencijala redukcije CO ₂ i faza životnog vijeka građevine [9].....	4
Slika 1.4 – Oštećenja zgrada u potresu [10, 11].....	5
Slika 1.5 – Oštećenje tadašnje skele katedrale u potresu [13]	5
Slika 1.6 – Povećanje pukotina na sjeveroistočnoj strani apsida nakon potresa u Petrinji [13]	6
Slika 1.7 – Skela tornjeva zagrebačke katedrale [17].....	7
Slika 1.8 – Konstrukcija platforme toranjske skele Zagrebačke katedrale [18].....	8
Slika 1.9 – Čelična konstrukcija za podupiranje Nadbiskupskog dvora na Kaptolu	8
Slika 3.1 – Struktura istraživanja	12
Slika 4.1 – Okvir procjene životnog ciklusa [19]	13
Slika 4.2 – Faze životnog ciklusa i moduli A – D [21]	14
Slika 4.3 – čelik u kružnom gospodarstvu [22]	15
Slika 4.4 – utjecaj ponovne upotrebe elemenata na procjenu životnog ciklusa građevine	17
Slika 4.5 – Emisije CO ₂ konstrukcijskog čelika u životnom ciklusu građevine prema korištenoj bazi podataka u radu [24]	17
Slika 4.6 – Primarna transformatorska stanica Brent Cross Town, London [25]	18
Slika 4.7 – Montaža fasadnih elemenata [26].....	19
Slika 4.8 – Elephant and Castle Town [28].....	20
Slika 4.9 – Uredska zgrada na trgu Sloane, London [29]	21
Slika 5.1 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]	24
Slika 5.2 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]	24
Slika 5.3 – Tlocrt građevine u softveru Scia Engineer (slučajevi 1 i 4) [30]	24
Slika 5.4 – Platforme skele Zagrebačke katedrale [13]	25
Slika 5.5 – Platforma skele u softveru Scia Engineer [30]	25
Slika 5.6 – Platforme skele prikazane u novoj hali u softveru Scia Engineer [30]	26
Slika 5.7 – Platforma skele sa vanjskim rešetkastim prstenom (lijevo) i bez istog (desno) prikazana u softveru Scia Engineer [30].....	26

Slika 5.8 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]	27
Slika 5.9 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]	27
Slika 5.10 – Tlocrt građevine u softveru Scia Engineer (slučaj 2) [30]	28
Slika 5.11 – Građevina prikazana trodimenzionalno u softveru Scia Engineer (slučajevi 3 i 5) [30]	28
Slika 5.12 – Pogled na građevinu u softveru Scia Engineer (slučajevi 3 i 5) [30]	28
Slika 5.13 – Najopterećeniji stup za kombinaciju djelovanja ULS 8 [30]	38
Slika 5.14 – Vrijednosti unutarnjih sila u stupu za ULS 8 [30]	39
Slika 5.15 – Oblik momentnog dijagrama između točaka bočnog pridržanja [30]	46
Slika 7.1 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu u Zagrebu...	103
Slika 7.2 – Utrošak materijala u odnosu na površinu i volumen građevine locirane u Zagrebu	104
Slika 7.3 – Prosječna iskoristivost elemenata građevine locirane u Zagrebu	105
Slika 7.4 – Rezultati LCA modula A1 – A3 za građevine u Zagrebu	106
Slika 7.5 – Rezultati LCA modula A4, A5 i C za građevine u Zagrebu	107
Slika 7.6 – Ukupni rezultati LCA za rješenja građevine u Zagrebu.....	107
Slika 7.7 – Rezime rezultata za rješenja građevine u Zagrebu (slučajevi 1, 2 i 3)..	108
Slika 7.8 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu na Pagu	110
Slika 7.9 – Utrošak materijala u odnosu na površinu i volumen građevine locirane na Pagu.....	110
Slika 7.10 – Prosječna iskoristivost elemenata građevine locirane na Pagu	111
Slika 7.11 – Rezultati LCA modula A1 – A3 za građevine na Pagu	112
Slika 7.12 – Rezultati LCA modula A4, A5 i C za građevine na Pagu	113
Slika 7.13 – Ukupni rezultati LCA za rješenja građevine na Pagu.....	113
Slika 7.14 – Rezime rezultata za rješenja građevine na Pagu (slučajevi 4 i 5).....	114
Slika 7.15 – Usporedba iskoristivosti elemenata platforme skele za građevinu lociranu u Zagrebu i na Pagu (slučajevi 3 i 5)	115
Slika 7.16 – Usporedba emisija CO2 uslijed transporta elemenata platformi skele u Zagreb i na Pag.....	116
Slika 7.17 – Usporedba utrošene količine čelika nove građevine (slučajevi 1 i 4) i građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika za Zagreb i Pag (slučajevi 3 i 5)	117

POPIS TABLICA

Tablica 1.1 – Količina proizvodnje čelika iz rude i količina recikliranog čelika u EU [5]	2
Tablica 5.1 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = - 0,3$) – Zagreb.....	31
Tablica 5.2 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Zagreb	32
Tablica 5.3 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = - 0,3$) – Zagreb.....	32
Tablica 5.4 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Zagreb	33
Tablica 5.5 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = - 0,3$) – Pag.....	36
Tablica 5.6 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na uzdužnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Pag	36
Tablica 5.7 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i negativan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = - 0,3$) – Pag.....	37
Tablica 5.8 – ukupno djelovanje vjetra za slučaj puhanja vjetra na poprečnu stranu građevine i pozitivan unutrašnji tlak (za $c_{pi} = 0,2$) – Pag	37
Tablica 5.9 – unutarne sile u elementima nove građevine – Zagreb (slučaj 1).....	51
Tablica 5.10 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 1	52
Tablica 5.11 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 1	53
Tablica 5.12 – utrošak materijala za građevinu od novih čeličnih elemenata - Zagreb (slučaj 1).....	53
Tablica 5.13 – unutarne sile u novim elementima građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika – Zagreb (slučaj 2)	55
Tablica 5.14 – unutarne sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane ponovnom upotrebom čelika – Zagreb (slučaj 2).....	56
Tablica 5.15 – iskoristivosti novih elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 2	57

Tablica 5.16 – iskoristivosti ponovno korištenih elemenata prema graničnom stanju nosivosti – slučaj 2	58
Tablica 5.17 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 2	60
Tablica 5.18 – utrošak materijala novih čeličnih elemenata za slučaj 2	60
Tablica 5.19 – utrošak materijala ponovno korištenih čeličnih elemenata za slučaj 2	61
Tablica 5.20 – ukupni utrošak materijala čeličnih elemenata za slučaj 2.....	63
Tablica 5.21 – unutarnje sile u novim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Zagreb (slučaj 3).....	63
Tablica 5.22 – unutarnje sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Zagreb (slučaj 3)	64
Tablica 5.23 – iskoristivosti novih elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 3	65
Tablica 5.24 – iskoristivosti ponovno korištenih elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 3	66
Tablica 5.25 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti – slučaj 3	67
Tablica 5.26 – utrošak materijala novih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3)	68
Tablica 5.27 – utrošak materijala ponovno korištenih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3).....	69
Tablica 5.28 – ukupan utrošak materijala elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika (slučaj 3)	70
Tablica 5.29 – unutarnje sile u elementima nove građevine – Pag (slučaj 4).....	70
Tablica 5.30 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 4	72
Tablica 5.31 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti za slučaj 4	73
Tablica 5.32 – utrošak materijala za građevinu od novih čeličnih elemenata – Pag (slučaj 4).....	74
Tablica 5.33 – unutarnje sile u novim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5).....	75

Tablica 5.34 – unutarnje sile u ponovno korištenim elementima građevine projektirane optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)	77
Tablica 5.35 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 5	78
Tablica 5.36 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju nosivosti za slučaj 5	79
Tablica 5.37 – iskoristivosti elemenata prema graničnom stanju uporabljivosti za slučaj 5	80
Tablica 5.38 – utrošak materijala novih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)	80
Tablica 5.39 – utrošak materijala ponovno korištenih elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)	82
Tablica 5.40 – ukupan utrošak materijala elemenata za građevinu projektiranu optimalizacijom ponovne upotrebe čelika – Pag (slučaj 5)	83
Tablica 5.41 – rezime količine utroška materijala za sve analizirane slučajeve	83
Tablica 6.1 – Rezultati LCA za građevinu od novih elemenata lociranu u Zagrebu .	87
Tablica 6.2 – Rezultati LCA ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu	91
Tablica 6.3 – Rezultati LCA optimiziranom ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu	94
Tablica 6.4 – Rezultati LCA za građevinu od novih elemenata lociranu na Pagu	97
Tablica 6.5 – Rezultati LCA optimiziranom ponovnom upotrebom elemenata za građevinu lociranu na Pagu	101
Tablica 7.1 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu u Zagrebu	103
Tablica 7.2 – Rekapitulacija prosječne iskoristivosti elemenata za građevinu lociranu u Zagrebu	104
Tablica 7.3 – Rekapitulacija potrošnje materijala za građevinu lociranu na Pagu ..	109
Tablica 7.4 – Rekapitulacija prosječne iskoristivosti elemenata za građevinu lociranu na Pagu	111
Tablica 7.5 – Odnos količine čelika za građevine u Zagrebu i na Pagu	117

SAŽETAK

Nikola Oreb

Analiza održive gradnje ponovnom upotrebom čeličnih platformi toranjskih skela Zagrebačke katedrale

Građevinarstvo prednjači po emisiji CO₂ i generiranju građevinskog otpada kao i upotrebi prirodnih resursa. Nedavni potresi u Zagrebu i Petrinji te obnova nakon potresa su također postavili mnoge izazove pred građevinsku struku Grada Zagreba, ali i Hrvatske. U cilju obnove zadnjih je godina povećana upotreba čeličnih privremenih konstrukcija, koje zbog jedinstvenih zadataka privremene stabilizacije i rekonstrukcije zgrada često nisu modularne već se prilagođavaju obliku postojeće zgrade. Nakon obnove takve konstrukcije postaju višak i dodatno pridonose generiranju građevinskog otpada. Ovaj rad ujedinio je stoga probleme današnjice građevinarstva, s naglaskom na potresom pogođena područja, u cilju planiranja budućnosti, što je i zadatak znanosti integrirane s građevinskom strukom.

U radu je, na primjeru čeličnih platformi toranjskih skela Zagrebačke katedrale, dano rješenje ponovne upotrebe privremenih konstrukcija koje se koriste za obnovu Grada Zagreba. Parametarskom studijom 5 razmotrenih slučajeva, za koje su dana različita konstrukcijska rješenja te je procijenjen utjecaj životnog ciklusa građevine na okoliš, doneseni su zaključci kako ponovna upotreba čeličnih konstrukcija ima pozitivan utjecaj na održivu gradnju. Unutar promatranih slučajeva obuhvaćena je izloženost nove konstrukcije opterećenju na različitim lokacijama u cilju njene optimalnije iskorištenosti, te različit stupanj ponovne upotrebe čeličnih elemenata.

Rezultati parametarskih analiza pokazali su da se ponovnom upotrebom čeličnih platformi skele katedrale u novoj, trajnoj konstrukciji građevine, emisije CO₂ mogu smanjiti za 35 - 45 %. Također, dodatna prednost je da nema generiranja novog građevinskog otpada. Po pitanju količine utrošenog novog materijala ponovna upotreba je također ekonomski isplativije rješenje. Kod lokacije s dominantnim opterećenjem vjetrova (Pag, slučajevi 4 i 5) za ponovnu upotrebu platformi skele dobiva se bolja iskoristivost njezinih elemenata i približno isti utrošak materijala u odnosu na građevinu iste geometrije projektiranu s novim elementima (razlika ≈ 5 %).

U općenitom slučaju ne predlaže se potpuna ponovna upotreba konstrukcije, već optimalizacija ponovne upotrebe, čime je također moguće projektirati više trajnih konstrukcija iz jedne privremene. Sugerira se ponovna upotreba elemenata u istom tipu konstrukcije (npr. hala za halu) jer je na taj način jednostavnije postići optimalnu ponovnu upotrebu. Ukoliko to nije moguće, prilikom izgradnje privremenih konstrukcija treba u fazi projektiranja predvidjeti njihovu ponovnu upotrebu u trajnoj konstrukciji (eng. *design for re – use*) jer se veliki izazovi ponovne upotrebe mogu riješiti u fazi projektiranja, a kasnije potencijal za to drastično opada. Puni potencijal čelika za ponovnu upotrebu može se dobiti ukoliko se preferiraju vijčani, jednostavno demontažni spojevi. Na temelju donesenih zaključaka predlaže se sastavljanje priručnika i smjernica za projektiranje budućih privremenih čeličnih konstrukcija, u cilju njihove ponovne upotrebe u trajnim konstrukcijama, ili pak novim privremenim konstrukcijama fleksibilne namjene na drugoj lokaciji.

Rezultati rada mogu poslužiti kao podloga za rješavanje izazova sa kojima se susreće Grad Zagreb, i cijela građevinska industrija. Rad je pokazao da je čelik, osim za sadašnjost, materijal za budućnost te njegova ponovna upotreba može imati veliki značaj u prelasku građevinske industrije na kružno gospodarstvo, drastično smanjujući emisije CO₂ i količinu građevinskog otpada, dajući pritom odlična, ekonomski isplativa konstruktivna rješenja.

Ključne riječi: održiva gradnja, ponovna upotreba čelika, procjena životnog ciklusa, emisije CO₂, potresna obnova

SUMMARY

Nikola Oreb

Analysis of sustainable construction by reusing the steel platforms of the Zagreb Cathedral tower scaffolding

The construction industry is one of the main contributors to CO₂ emissions, construction waste and the consumption of natural resources. The recent earthquakes in Zagreb and Petrinja and the subsequent reconstruction efforts have posed numerous challenges to the construction sector in Zagreb and Croatia. As a result, the use of temporary steel structures has increased in recent years. These structures used for temporary stabilization and reconstruction are often not modular but designed to adapt to the unique structure of existing buildings. Once the renovation is complete, these structures become redundant, further increasing construction waste. This paper addresses current challenges facing the construction industry, particularly in earthquake-prone areas, to plan for a more sustainable future. It emphasises the importance of linking scientific research with construction practise to address these pressing issues.

Using the example of the steel platforms of the Zagreb Cathedral tower scaffolding, the work presents a solution for the reuse of temporary structures for the reconstruction of the city of Zagreb. A parametric study of five analysed cases with different structural solutions and a life cycle assessment of the analysed buildings showed that the reuse of steel structures enhances sustainable construction. The analysed cases also took into account the loading of the new structures in different locations to optimise their use, as well as different degrees of steel elements reuse.

The results of the parametric analyses show that CO₂ emissions can be reduced by 35-45% by reusing the steel platform of the Cathedral's scaffolding in the new, permanent structure. Another advantage is that this approach does not generate any new construction waste. In terms of material consumption, reuse also proves to be a more cost-effective solution. Particularly, at a site with dominant wind loads (Pag, cases 4 and 5), reusing the scaffolding platforms leads to better utilisation of the

elements and almost the same material consumption as a new structure with identical geometry (5 % difference).

In general, complete reuse of the structure is not advisable; instead, optimised reuse is suggested, which allows multiple permanent structures to be created from a single temporary structure. It is advisable to reuse elements within the same building type (e.g., from hall to hall) to facilitate optimal reuse. If this is not possible, the reuse of temporary structures in permanent constructions should be envisaged at design stage, as most of the challenges associated with reuse can be overcome at this stage. In later phases the potential for reuse decreases significantly. The full potential of steel for reuse can be realised if bolted, easily dismantlable connections are prioritised. Based on these conclusions, it is recommended to develop a manual and guidelines for the design of future temporary steel structures to facilitate their reuse in permanent or new temporary structures with flexible purposes in different locations.

The results of this work can serve as a basis for addressing the challenges facing the City of Zagreb and the construction industry in general. This work shows that steel is not only a material of the present, but also has significant potential for the future. Its reuse can be instrumental in transitioning the construction industry towards a circular economy, significantly reducing CO₂ emissions and construction waste, while providing excellent, cost-effective structural solutions.

Keywords: sustainable construction, steel reuse, life cycle assessment, CO₂ emissions, earthquake reconstruction