

# Analiza dvije varijante sustava stropnih ploča na primjeru nebodera Skyline u Beogradu

---

Božić, Dunja

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:902865>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

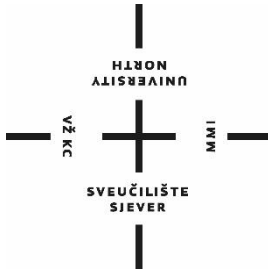


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 102/GRD/2024

**ANALIZA DVIJE VARIJANTE SUSTAVA**  
**STROPNIH PLOČA NA PRIMJERU NEBODERA**  
**SKYLINE U BEOGRADU**

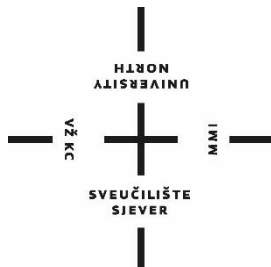
Dunja Božić

Varaždin, rujan 2024.



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**

**Studij Graditeljstva**



DIPLOMSKI RAD br. 102/GRD/2024

**ANALIZA DVIJE VARIJANTE SUSTAVA**  
**STROPNIH PLOČA NA PRIMJERU NEBODERA**  
**SKYLINE U BEOGRADU**

Student:

Dunja Božić, 0246034103

Mentor:

doc. dr. sc. Jelena Bleiziffer

Varaždin, rujan 2024.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Dunja Božić

MATIČNI BROJ 0246034103

DATUM 8. 7. 2024.

KOLEGIJ Modeliranje i proračun konstrukcija

NASLOV RADA Analiza dvije varijante sustava stropnih ploča na primjeru nebodera Skyline u Beogradu

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Analysis of two floor system variants using Skyline Skyscraper in Belgrade as an example

MENTOR dr. sc. Jelena BLEIZIFFER

ZVANJE Docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

- prof. dr. sc. Božo SOLDO
- doc. dr. sc. Jelena BLEIZIFFER
- izv. prof. dr. sc. Matija OREŠKOVIĆ
- izv. prof. dr. sc. Aleksej ANISKIN
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 102/GRD/2024

OPIS

Diplomskim radom potrebno je obraditi temu naknadno prednapetih monolitnih stropnih ploča te usporediti varijantu naknadno prednapete monolitne stropne ploče s varijantom armiranobetonske (nenapete) ploče. Analiza i usporedba se provodi na primjeru nebodera Skyline u Beogradu.

Rad se sastoji od:

Uvod

Osnove primjene naknadno prednapetih monolitnih stropnih ploča

Predmetna građevina

Analiza varijante naknadno prednapete monolitne stropne ploče

Analiza varijante armiranobetonske (nenapete) stropne ploče

Usporedba analiziranih varijanti sustava stropnih ploča

Zaključak

Potrebno se pridržavati svih smjernica naučenih u kolegiju „Metodologija znanstvenog istraživanja“

ZADATAK URUČEN

24. 08. 2024.

POTPIS MENTORA



JELENA  
BLEIZIFFER

Digitally signed by  
JELENA  
BLEIZIFFER  
Date: 2024.08.26  
21:16:43 +02'00'

## **Predgovor**

*Zahvaljujem se svojoj mentorici doc.dr.sc. Jeleni Bleiziffer na sugestijama, savjetima te cjelokupnom mentorstvu pri izradi diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se i g. Predragu Presečkom, dipl.ing.građ, koji me svojim znanjem i iskustvima motivirao i usmjeravao u postizanju uspjeha tijekom studija. Zahvaljujem mu na stručnosti, suradnji i materijalima pruženim prilikom izrade diplomskog rada.*

*Također hvala g. Dejanu Buhi i projektantsko-izvođačkom poduzeću BBR Adria koji su mi zajedno s Investitorom AFI Europe Serbia, ustupili potrebne materijale, podatke i omogućili posjet kompleksu Skyline u Beogradu tijekom građenja.*

*Hvala i svim profesorima i predavačima s Odjela za graditeljstvo Sveučilišta Sjever, koji su prenijeli svoja iskustva i znanja na nas studente te nas time pripremili za budući rad i djelovanje u području graditeljstva.*

*U konačnici, zahvaljujem se svojim roditeljima i sestri na potpori i razumijevanju tijekom studiranja koji su savladavanje studenskih obaveza učinili lakšim.*

## Sažetak

Predmet diplomskog rada su dvije vrste stropnih konstrukcija koje se primjenjuju na većim rasponima visokih zgrada. To su naknadno prednapete monolitne stropne ploče (PT ploče) koje se kroz rad uspoređuju s klasičnom monolitnom pločom bez prednapinjanja. Analizira se građevina, neboder B koji se izdvaja kao jedini u kompleksu Skyline izveden u PT tehnologiji. Ističu se ekonomsko-tehničke prednosti primjene prednapetih ploča u odnosu na klasičnu. Izvršena je usporedna analiza predmetne prednapete ploče s klasičnom varijantom čija je debljina određena jednakim iznosom konačnih progiba ostvarenih na prednapetoj ploči. Posebno je zanimljiva usporedba jer su na dva susjedna nebodera, izvedena u klasičnoj varijanti, progibi veći od očekivanih.

Prednapete ploče imaju višestruke prednosti kako kroz smanjenje količine i cijene materijala, tako i kroz veću brzinu građenja radi ranijeg uklanjanja oplata. Također, prednapetim pločama raspona preko 8,0 metara, izbjegavaju se ojačanja kapitelima u zoni stupova što također pojednostavljuje i ubrzava građenje. Dakle, takve prednapete stropne ploče, na rasponima preko 8,0 metara, mogu se izvesti pločom konstantne debljine tanjom od klasične, a problem proboja stupa i ploče rješava se uključivanjem skretnih sila kabela u zoni stupa koji značajno smanjuju probojnu silu. U radu je dan prikaz primijenjene tehnologije građenja nebodera B kompleksa Skyline te su izvedeni zaključci predmetne analize.

**Ključne riječi:** stropne ploče, naknadno prednapinjanje, tehnologija građenja, Skyline neboder B, tehničko-ekonomska usporedba

## **Abstract**

The subject of this thesis is two types of floor structures that are used on larger spans in high-rise buildings. These are post-tensioned monolithic slabs (PT slabs) which are compared with the monolithic design of slabs without pre-tensioning. Analysed building, skyscraper B, stands out as the only one in the Skyline complex built in PT technology. The thesis emphasizes the technical and economic advantages of using prestressed slabs in comparison to non-prestressed slabs. A comparison of the prestressed slab in question with the non-prestressed variant which thickness is determined so its total deflection match those realized when using the prestressed slab. The comparison is interesting because the two neighbouring skyscrapers, built in the non-prestressed version, had larger deflections than expected.

Prestressed slabs have multiple advantages, both through a reduction in the quantity and cost of materials, as well as through a faster construction due to earlier removal of the formwork. Also, with prestressed slabs spanning over 8,0 meters capitals in the column area are avoided which also simplifies and speeds up construction. So, such pre-tensioned slabs, with span over 8,0 meters, can be made with a slab of constant thickness, thinner than the non-prestressed one, and the problem of column and slab punching force is solved by including the deflection forces of the cables in the column zone, which significantly reduce the punching force. The final part of the thesis presents the applied technologies of building skyscraper B of the Skyline complex, and the conclusions of the subject analysis.

**Key words:** floor structures, post tensioning, construction technology, Skyline skyscraper B, technical-economic comparison



Popis korištenih skraćenica i simbola:

<b>AB</b>	armirani beton
<b>PT</b>	post-tensioning – nakandno prednapinjanje
<b>EC</b>	Eurokod
<b><math>w</math></b>	progib
<b><math>w_0</math></b>	nulti elastični progib
<b><math>w_\infty</math></b>	vremenski progib
<b><math>A</math></b>	ploština, površina
<b><math>l</math></b>	duljina
<b><math>l_m</math></b>	duljina pada kabela

## Sadržaj

1. UVOD.....	9
2. OSNOVE PRIMJENE NAKNADNO PREDNAPETIH MONOLITNIH STROPNIH PLOČA .....	11
2.1. Način prijenosa opterećenja, prednosti i nedostaci.....	11
2.2. „Bonded“ i „unbonded“ tehnologija naknadnog prednapinjanja.....	13
2.3. Sidrenje i vođenje kabela.....	17
2.4. Primjeri sustava prednapinjanja.....	23
3. PREDMETNA GRAĐEVINA .....	29
4. ANALIZA VARIJANTE NAKNADNO PREDNAPETE STROPNE PLOČE I ARMIRANOBETONSKE (NENAPETE) STROPNE PLOČE .....	47
4.1. Uvodna razmatranja.....	47
5. ANALIZA VARIJANTE NAKNADNO PREDNAPETE MONOLITNE STROPNE PLOČE.....	51
6. ANALIZA VARIJANTE ARMIRANOBETONSKE (NENAPETE) STROPNE PLOČE .. .....	57
7. USPOREDBA ANALIZIRANIH VARIJANTI SUSTAVA STROPNIH PLOČA .....	60
8. ZAKLJUČAK.....	71
LITERATURA .....	73
Popis slika i tablica .....	75

## 1. UVOD

Stropne konstrukcije osim preuzimanja vertikalnog opterećenja, prenose i horizontalno opterećenje građevine na vertikalnu nosivu konstrukciju. Time se postiže sigurnost u pogledu zajedničkog preuzimanja horizontalnih djelovanja poput seizmičkih djelovanja ili utjecaja vjetra, pa samim time konstrukcije moraju imat potrebnu krutost. Samim time, naglašava se krutost diska, odnosno potrebna otpornost u vlastitoj ravnini kao i spojevi s vertikalnim dijelovima konstrukcije.

U kontekstu navedenog, kao i primjenom tehnoloških postignuća u području stropnih konstrukcija, ističe se izgradnja stropnih konstrukcija uz primjenu tehnike naknadno prednapetih stropnih ploča (dalje u tekstu PT ploča). Tehnologijom prednapinjanja uspješno se savladavaju veliki rasponi, debljina ploče se smanjuje, a naglasak je dakako i na uštedama u pogledu armature, utrošenog betona, kao i brzini građenja [1]. Umjetno izazvanim silama, odnosno prednapinjanjem, smanjuju se vlačna naprezanja u presjecima za fazu uporabe. Navedeno se postiže ugradnjom kabela visokovrijednog čelika. Prilikom napinjanja, preko usidrenja, kabelima se u ploču unosi tlačnu silu što ujedno rezultira i smanjenjem progiba čime se smanjuje probojna sila stropne ploče te je povoljnije i direktno oslanjanje ploče na stupove kao vertikalne elemente konstrukcije. U pogledu tehnologije, razlikuju se „bonded“ (prijanjajući) i „unbonded“ (neprijanjajući) kabeli za naknadno prednapinjanje. Pri tom, primjenom „bonded“ tehnologije ostvaruje se direktna veza kabela od visokovrijednog čelika s betonom, dok kod „unbonded“ tehnologije ta direktna veza čelika s betonom izostaje (uže je u masti i plastičnoj cijevi). Tehnologija je u primjeni od 70-tih godina prošloga stoljeća u svijetu te od 1994. godine u Hrvatskoj [1]. Njome su riješene brojne složene konstrukcije ploča velikih raspona uz dokazanu pouzdanost koja se dokazuje izvješćima o rezultatima ispitivanja tijekom i po završetku građenja građevina i dokazanu trajnost eksploatacijskog vijeka i izostanak prijave problema u pogledu trajnosti tijekom uporabnog vijeka na nizu građevina izvedenih u Hrvatskoj i šire.

Rad je usmjeren na naknadno prednapinjanje „unbonded“ tehnologijom i analizu njenih prednosti, na primjeru građevine Skyline neboder B izgrađene u Beogradu. Uvodnim dijelom rada sažima se obrada predmetne teme. U drugom poglavlju opisuju se osnove primjene naknadno prednapetih monolitnih stropnih ploča. Pri tom, navode se načini prijenosa opterećenja kao i prednosti i nedostaci primjene takvih ploča, razlike „bonded“ i „unbonded“ tehnologije, načini sidrenja i vođenja kabela te primjeri sustava prednapinjanja s naglaskom na

sustav prednapinjanja primijenjen pri građenju predmetne građevine. Potom, slijedi opis predmetne građevine – nebodera B, stambeno-poslovnog kompleksa Skyline, te se analizira varijanta naknadno prednapete monolitne stropne ploče kao i varijanta armiranobetonske (dalje u tekstu AB) (nenapete) stropne ploče. U zadnjem dijelu, slijedom svega navedenog i obrađenog u radu, uspoređuju se analizirane varijante sustava stropnih ploča temeljem izvadaka iz statičke analize PT ploče, debljine 24 cm i statičke analize klasične ploče, debljine 28 cm. Prikazom armaturnih nacrti segmenata PT ploče, kao i izolinijama površine armature iz klasične AB (nenapete) ploče, dodatno se potkrepljuju zaključci na strani tehnologije naknadnog prednapinjanja. Uspoređuje se cijena materijala – armature, betona i kabela i sažima cjelokupna obrada predmetne analize i iznose zaključci rada.

## **2. OSNOVE PRIMJENE NAKNADNO PREDNAPETIH MONOLITNIH STROPNIH PLOČA**

### **2.1 Način prijenosa opterećenja, prednosti i nedostaci**

Monolitne stropne ploče kao ploče koje proizlaze iz izlivanja betona na licu mjesta tj. na konačnom položaju u konstrukciji, u unaprijed pripremljenu oplatu, ističu se određenim prednostima u odnosu na montažnu izvedbu, ali i nedostacima. Kada je riječ o prednostima navedenih ploča, ističe se njihova vatrootpornost, seizmička otpornost, povećana trajnost i manje konstruktivne visine [2]. Nedostaci u odnosu na montažnu gradnju su manja brzina građenja, ovisnost o vremenskim uvjetima te veći broj radne snage na gradilištu [2].

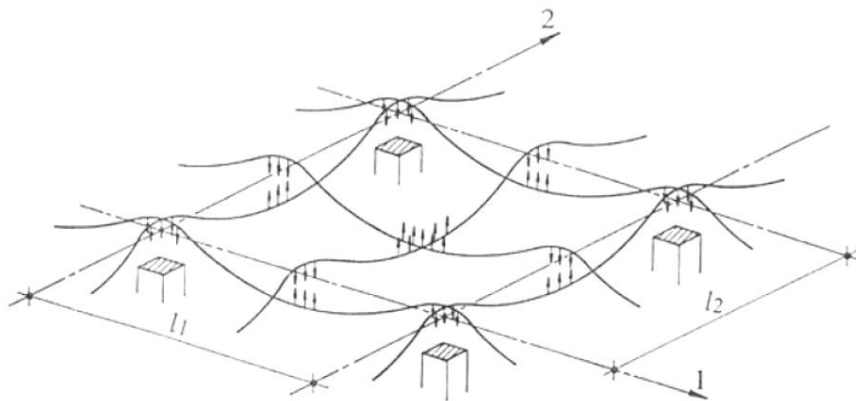
Monolitne stropne AB (nenapete) konstrukcije se mogu izvoditi kao (1) pune ravne ploče koje mogu biti oslonjene linijski (na grede i/ili zidove) ili točkasto (na stupove), (2) sitnorebričaste stropove i ošupljene ploče i (3) roštiljne (kasetirane) konstrukcije [2].

Beton kao materijal ima visoku tlačnu čvrstoću, a znatno manju vlačnu čvrstoću (otprilike 1/10 tlačne čvrstoće).

Kod AB elementa manja vlačna čvrstoća nadoknađena je povećanjem otpornosti presjeka pomoću čelične armature (u zoni vlačnih naprezanja). Beton u procesu očvršćivanja i bez prirasta opterećenja može imati prekoračenje vlačne čvrstoće uslijed temperature i skupljanja. Posljedica navedenog je pojava pukotina, a funkcija armature je njihovo smanjenje. Također, glavnu funkciju armatura ima u pokrivanju vlačne zone od vertikalnog opterećenja tako da armatura zapravo preuzima kompletnu vlačnu silu.

Naknadnim prednapinjanjem mijenja se raspodjela naprezanja kroz presjek smanjenjem ili potpunom eliminacijom vlačnih naprezanja u betonu. Time dolazi do izražaja jedna od prednosti ovog načina građenja betonskih ploča, a to su ušteda odnosno smanjena upotreba armature te veća iskorištenost betona i njegove tlačne čvrstoće. Manja količina armature, tanje betonske ploče, savladavanje većih udaljenosti oslonaca te kraće vrijeme, prednosti su primjene PT ploča. Prethodno spomenuta izvedba tanjih betonskih ploča pri rasponima većim od osam metara, postiže se ugradnjom kabela od visokovrijednog čelika. Pri napinjanju, preko usidrenja vlačna sila u kabelima, u ploču unosi tlačnu silu čime se vlačno naprezanje smanjuje ili poništava. Pri tom, linija paraboličnog oblika vođenja kabela uzrokuje skretne sile koje su u poljima ploča suprotne gravitacijskom opterećenju.

Time su smanjeni progibi, ujedno i pukotine. Slika 2.1 prikaz je navedenih smjerova skretnih sila.



Slika 2.1 Smjerovi skretnih sila za parabolično vođenje kabela – ploča oslonjena na stupove, (Izvor:[3])

Reduciranje proboja rezultira mogućnošću manjih dimenzija debljina ploča kod direktnog oslanjanja ploče na stupove bez greda ili kapitela. Referirajući se na izvedbu tanjih, samim time i lakših ploča, može se racionalizirati i temeljna konstrukcija, a olakšana konstrukcija generira i manje seizmičke sile čime se mogu racionalizirati i vertikalni nosivi elementi. Također, za isti broj etaža visoke građevine mogu imati manju ukupnu visinu ili čak dodatne katove za istu visinu u odnosu na klasične ploče. U usporedbi s klasičnom varijantom ploča, PT ploče konstantne debljine reducirane su za oko 20 do 30 posto uz manju količinu armature [4]. Ova tehnologija daje dodatni trošak kabela od visokovrijednog čelika, no i pored te činjenice, sumirajući prednosti naknadnog prednapinjanja, praksa je pokazala da je cijena izvedbe ploča ovom tehnologijom manja i u konačnici isplativija [4]. Također, kod direktnog oslanjanja ploča na stupove bez greda smanjeni su i troškovi oplata greda. Oplata je pojednostavljena, a ujedno se skraćuje i vrijeme njena postavljanja. Tehnologija naknadnog prednapinjanja primjenjuje se pri izvedbi građevina velikih raspona poput mostova, stadiona, tržnih centara, garažno-parkirališnih prostora, a sve je zastupljenija i pri izvedbi stambenih i poslovnih građevina [5]. No, pored navedenih prednosti, valja istaknuti kako je za ovaj način građenja potrebna stručna radna snaga, ponajprije u pogledu projektiranja i izvođenja te posebna, samim time i cjenovno skuplja oprema.

Naknadno napinjanje rezultat je korištenja kabela za naknadno prednapinjanje. Kabele čini čelična užad vlačne čvrstoće višestruko veće u usporedbi s vlačnom čvrstoćom nenapete armature. Kada beton postigne potrebnu tlačnu čvrstoću, započinje se s napinjanjem kabela pomoću hidrauličnih preša. Po realizaciji projektirane sile prednapinjanja (80 % sile proizašle iz vlačne čvrstoće), kabel se pomoću sidra fiksira u nosač. Pri tom, primjenjuju se dva tipa sidara – aktivno i pasivno sidro. Aktivnim sidrom sila prednapinjanja prenosi se s hidraulične preše na beton (slika 2.2), dok se pasivno sidro upire na drugom kraju u betonu.



Slika 2.2 Hidraulična preša (crvena markacija pokazuje duljinu izduženja kabela) (Izvor: [5])

## 2.2. „Bonded“ i „unbonded“ tehnologija naknadnog prednapinjanja

U pogledu dvije osnovne vrste naknadnog prednapinjanja s obzirom na vezu između kabela s betonom razlikuju se „bonded“ i „unbonded“ tehnologija. Pri primjeni „bonded“ tehnologije u slobodan prostor cijevi ubrizgava se injekcijska smjesa (cementni mort) čime se kabeli štite od korozije te osiguravaju krutu vezu betona i kabela, dok se primjenom „unbonded“ tehnologije zaštita od korozije postiže bez direktne veze visokovrijednog čelika s betonom preko namašćene užadi u plastičnoj cijevi. Time su kabeli već prije same ugradnje tvornički zaštićeni

od korozije i postavljaju se lakše, brže i bez otežanih okolnosti neovisno o visokim i niskim temperaturama koje su ograničavajuće za injektiranje kod „bonded“ sustava.

Pri izvedbi stropnih ploča, najčešće primjenjivana tehnologija u našem okruženju je „unbonded“ tehnologija čija primjena će biti prikazana kroz analizu izgrađenih stropnih ploča građevine nebodera B kompleksa Skyline. Slika 2.3 i slika 2.4 prikaz su kabela primjenom „bonded“ i „unbonded“ tehnologije naknadnog prednapinjanja.



Slika 2.3 Prikaz „bonded“ kabela za naknadno prednapinjanje (Izvor: [7])





Slika 2.4 Prikaz „unbonded“ kabela za naknadno prednapinjanje (Izvor: [4])

Referirajući se na primjenu „unbonded“ tehnologije, tablicom 2.1, navode se glavne prednosti i karakteristike u odnosu na „bonded“ tehnologiju izvođenja kabela [5].

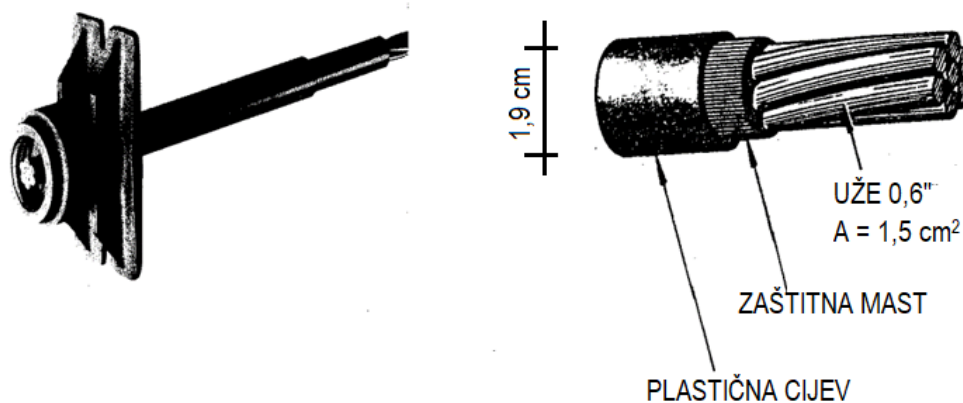
Tablica 2.1 Prednosti/karakteristike „unbonded“ tehnologije izvođenja kabela (Izvor: [5])

	„Unbonded“ tehnologija izvođenja kabela	„Bonded“ tehnologija izvođenja kabela
<b>PREDNOSTI:</b>	<p>Veća brzina i praktičnost postavljanja, osobito pri primjeni slobodnog vođenja kabela;</p> <p>U zimskim uvjetima primjena identičnih pravila kao i za obične AB ploče;</p> <p>Lakše zaobilaženje prepreka i manjih otvora u ploči – kut skretanja u tlocrtnoj ravnini može biti u odnosu 1:6;</p> <p>Dobra zaštićenost kabela uslijed mogućih oštećenja prilikom nespretnog stajanja radnika na kabel ili pada težih predmeta na kabele.</p>	<p>Ograničenje temperature – ispod +5 °C i više od + 30 °C injektiranje se ne smije izvoditi;</p> <p>Otežano zaobilaženje i pomicanje u slučaju eventualnih naknadnih otvora uoči betoniranja,</p> <p>Oštećenja čelične rebraste cijevi prilikom ugradnje „bonded“ kabela</p>
<b>KOEFICIJENT TRENJA</b> (manje trenje rezultira manjim padovima sila i samim time većim taktovima prednapinjanja)	0,05	Varira između 0,15 i 0,20
<b>MINIMALAN RAZRED TLAČNE ČVRSTOĆE ZA PLOČE</b>	C25/30	C30/37

Slijedom navedenih prednosti, kao nedostatak „unbonded“ tehnologije, odnosno kabela te vrste, naglašeno je presijecanje unutar samog usidrenja. Presijecanjem dolazi do isključenja djelovanja tog kabela duž cijelog poteza između dva usidrenja. No, unatoč tom nedostatku postoji niz mjera kojima se isti ublažuje, primjerice označavanje linije kabela na oplati (uobičajeno sprejom) čime je markiran trag na donjoj strani ploče. Na taj se način izbjegava bušenje, dok na gornjoj strani ploče bušenje upravo i predstavlja opasnost pri stabilizaciji oplata zidova i stupova pa se rješenje navedenog ogleda u upiranju oplatnih držača na betonske blokove. Pretpostavlja se, odnosno procjena i mišljenje projektanta je, da ako dođe do sječenja nekog od kabela i to u širokoj zoni ploče, isto će biti pokriveno koeficijentom sigurnosti. Ako ipak nastupi grupno presijecanje kabela poseže se za rješenjem izvlačenja kabela i guranja hidrauličkom prešom zamjenjujući ih, uz pomicanje novog mjesta usidrenja.

### 2.3. Sidrenje i vođenje kabela

Nadalje, u pogledu usidrenja kabela, činjenica je da svaki kabel, preko takozvanih ankera, odnosno sidrenih ploča, unosi tlačnu silu u beton. Kabel je na jednom kraju pasivno usidren, dok je kraj na onom dijelu gdje kabel izlazi iz elementa i sila prednapinjanja se unosi prešom, aktivno usidren. Slika 2.5 i slika 2.6 prikaz su „unbonded“ tehnologije kabela.



Slika 2.5 „Unbonded“ tehnologija – kabeli od visokovrijednog čelika (usidrenje i presjek kroz kabel) (Izvor: [4])



Slika 2.6 Rezanje kabela i montiranje pasivnih usidrenja (Izvor: [3])

S obzirom da je potrebno voditi računa o padu sile prednapinjanja uslijed trenja, naizmjenično se postavlja oko 50 % aktivnih i pasivnih usidrenja, a s obzirom na male gubitke od trenja kod

„unbonded“ kabela, kod manjih taktova primjenjuje se čak i jednostrano naprezanje – sva usidrenja tada su s jedne strane aktivna. U zoni usidrenja važno je dobro vibriranje betona kao i "namašćivanje" područja rezanja unutar zaštitne plastične cijevi u cilju sprječavanja pojave korozije. Primjer svih aktivnih usidrenja na jednoj strani prikazani su slikom 2.7, dok slika 2.8 prikazuje pasivna usidrenja unutar ploče.

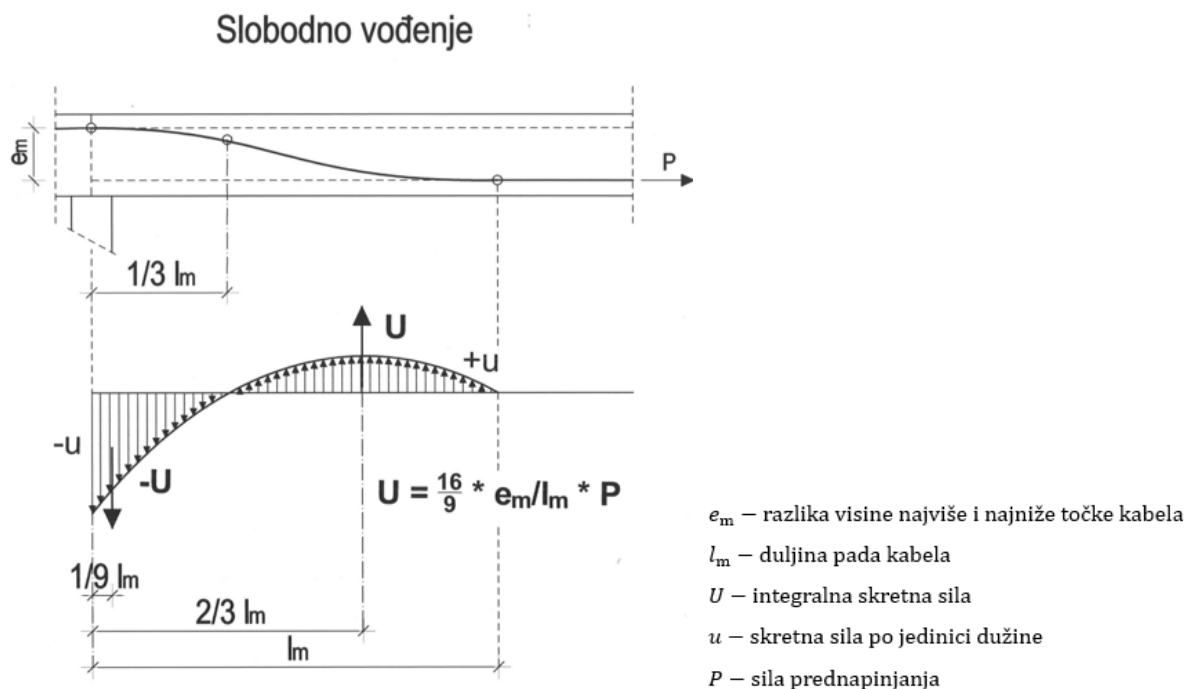


Slika 2.7 Aktivna usidrenja – primjer na izgradnji dvorane u sklopu hotela Solaris u Šibeniku  
(Izvor: [4])



Slika 2.8 Pasivna usidrenja kabela – primjer na dogradnji hotela Punta na Malom Lošinju  
(Izvor: [8])

U osvrtu na prijašnja vremena kada su se kabele izvodili linijom parabole duž cijelog raspona, i time iziskivali znatno više vremena radi postavljanja visinskih pridrzanja svakih 100 do 130 centimetara, danas je pri izvedbi „unbonded“ tehnologije kabela u primjeni takozvano slobodno vođenje kabela. Analitički gledano, određuje se duljina između donje i gornje točke pridrzanja i ona je pri tom u funkciji debljine ploče (visine strelice). Slika 2.9 prikaz je prethodno navedenog.



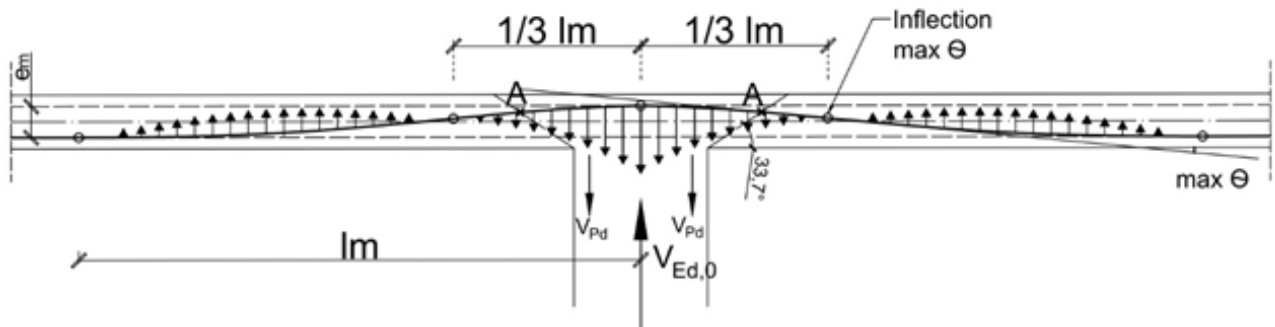
Slika 2.9 Slobodno vođenje kabela (Izvor: [4])

Od fiksirane gornje zone, kabel svojom krutošću slobodno pada do donje zone po krivulji parabole 4. reda, bez međupridržanja. Pri tom, dijagram skretnih sila ima oblik parabole 2. reda, dok duljina  $l_m$  predstavlja duljinu pada kabela i funkcija je debljine ploče. Ova duljina pada kabela kod srednjih polja iznosi oko tri metra. Na taj način srednja zona u polju ostaje kao dio pravca gdje kabel „leži“ i to na donjoj strani armature. U tom pogledu, krivulja kontramomenta nešto je drukčija, ima duži dio maksimalnog iznosa momenta, ali generalno rubna naponska stanja mogu biti na prihvatljivoj razini. Primjer polaganja kabela u plitkoj širokoj gredi prikazan je slikom 2.10.



Slika 2.10 Polaganje kabela (slobodno vođenje) – plitka, široka greda (slika prije postavljanja gornje zone armature grede) (Izvor: [3])

Na slici 2.10 vidljiva je zakrivljenost kabela – gornja zona (zona ležajeva) i donja zona (u polju). Dugogodišnjom primjenom slobodnog vođenja kabela došlo je do unapređenja tehnologije i primjene PT ploča i to ponajprije u pogledu brzine izvođenja, kao i jednostavnosti polaganja kabela. Slika 2.11 prikazuje shematski koncept slobodnog vođenja kabela, dok je slika 2.12 prikaz primjera iz prakse.



$e_m$  – razlika visine najviše i najniže točke kabela

$l_m$  – duljina pada kabela

točka A – područje određivanja kuta nagiba kabela

$V_{Pd}$  – skretne sile unutar probojnog konusa, suprotne probojnoj sili

$V_{Ed,0}$  – faktorizirana probojna sila bez utjecaja skretnih sila (kao da kabela nema)

Slika 2.11 Princip slobodnog vođenja kabela i skretne sile u kabelu – shematski prikaz (Izvor: [9])



Slika 2.12 Grupiranje kabela koji sudjeluju u smanjenju probojne sile (Izvor: [9])

Slobodno vođenje kabela „unboded“ tehnologijom s namašćenim kabelima primjenjuje se u mnogobrojnim projektima naknadnog prednapinjanja. Kabel se kao takav svojom masom i krutošću iz gornje točke pridržavanja do donje točke oblikuje prema paraboli četvrtog stupnja s



infleksijom na 1/3 zone zakrivljenja. Navedeno proizlazi iz eksperimenta profesora Wicke (Innsbruck 1998. god.) kojim je povratno definirana matematička krivulja oblika kabela [10].

#### **2.4. Primjeri sustava prednapinjanja**

Tehnološkim naprecima današnjice razvijene su brojne tehnologije raznih proizvođača sustava prednapinjanja. To je pridonijelo sve većoj primjeni prednapetog betona u inženjerskim konstrukcijama. Sustavi i načini primijenjeni u tehnici prednapinjanja razvili su se kroz nekoliko najzastupljenijih sustava. Riječ je o najpoznatijim sustavima – BBR, Dywidag, VSL, CCL [5].

U nastavku se prikazuje BBR sustav prednapinjanja kao jedan od pionira ove tehnologije, ali ponajprije slijedom primjene navedenog sustava na analiziranoj predmetnoj građevini – neboderu B kompleksa Skyline.

Sami počeci rada i primjene ovakvog sustava sežu u prošlost (1944.) i to kao posljedica nestašice čelika i cementa i smanjenja raspoloživosti resursa za proizvodnju energije. Navedeni problemi potakli su istraživanja u smjeru mogućnosti ušteda na materijalu i to primjenom prednapetog umjesto klasičnog armiranog betona. Kružno hladno oblikovano sidro bilo je „okidač“ u razvoju tehnologije prednapinjanja, a tijekom pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoljeća, razvijeni su mnogobrojni sustavi za naknadno prednapinjanje betona koji su se s godinama kontinuirano razvijali i napredovali. Pri tom, ističe se nekoliko najvažnijih, ujedno i najpoznatijih BBR sustava za naknadno prednapinjanje i to [5]:

1. CONA CMI,
2. CONA CME,
3. CONA CMF,
4. CONA CMM,
5. CONA CMB.

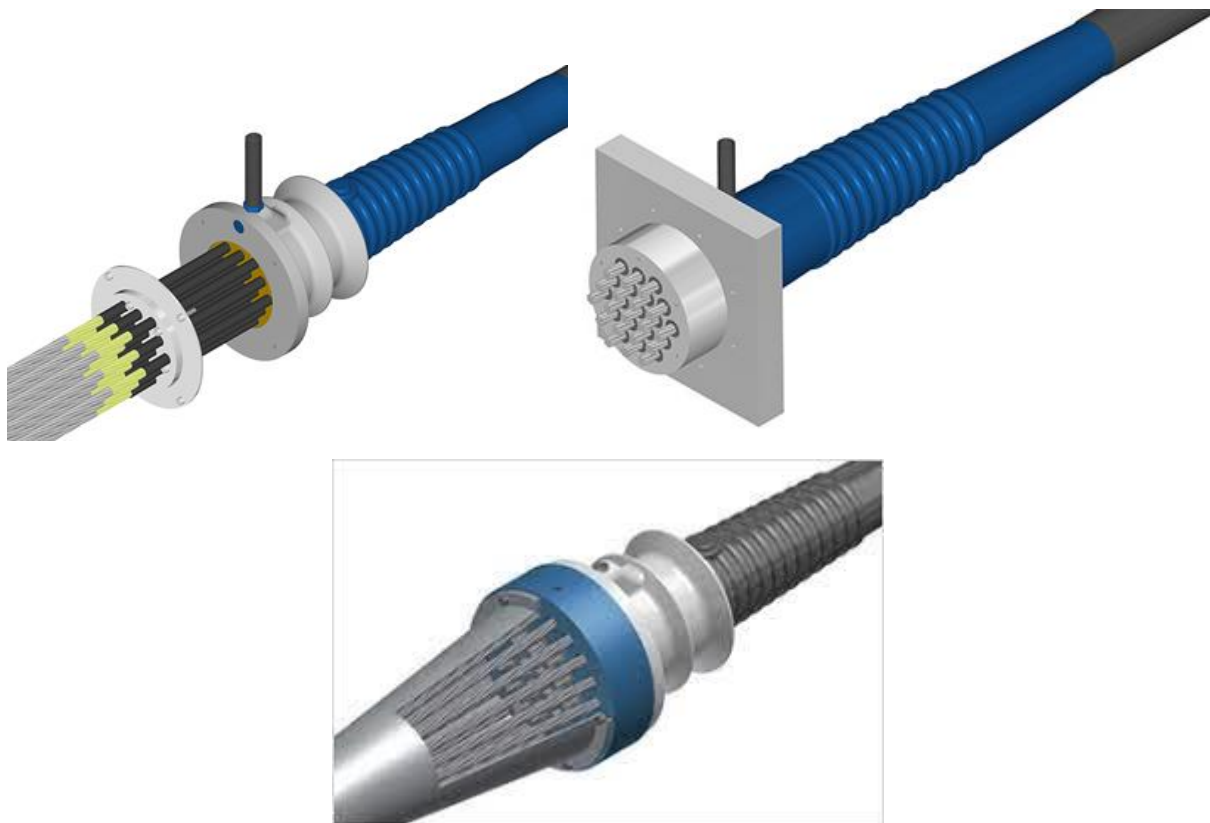
CONA CMI sustav najnapredniji i najmoderniji je sustav PT tehnologije [5]. Kabeli se nalaze unutar betonskog presjeka, čvrstoća čelika za prednapinjanje je  $1860 \text{ N/mm}^2$ , s površinom užadi u iznosima od 93, 100, 140 i  $150 \text{ mm}^2$  [5]. Sustav se primjenjuje pri gradnji mostova, stadiona, elektrana, silosa, spremnika za plin, sadržavajući 1-73 užadi u kabelu [5]. Užad se, već i pri nižim čvrstoćama betona, napinje na punu silu [5]. Užad je pri tom zatvorena u obliku snopa u okrugloj čeličnoj ili plastičnoj (BBR VT) cijevi. Cijevi su valovite, no u primjeni su i

glatke okrugle cijevi uobičajeno od čelika ili plastike. Ispuna kabela kod „bonded“ tehnologije izvodi se injekcijskom smjesom visokih performansi. Slika 2.13 prikaz je navedenog BBR VT CONA CMI sustava.



Slika 2.13 CONA CMI – kružna ploča, plastična cijev (Izvor: [5])

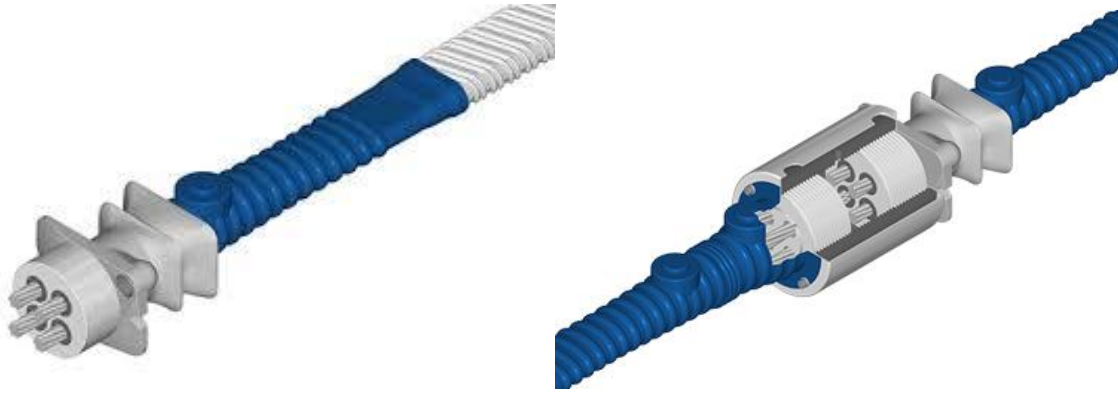
Pored primjene CONA CMI sustava, kao još jedan od sustava naknadnog prednapinjanja primjenjuje se CONA CME sustav. Kao i prethodno navedeni, i ovaj sustav ističe se s jednom od modernijih tehnologija u svojoj primjeni i to s više kabela za sve vrste naknadnog prednapinjanja izvan betonskog presjeka. Slika 2.14 prikaz je navedenog sustava.



Slika 2.14 CONA CME SP – kvadratna prijenosna ploča, plastična cijev (Izvor: [5])

U upotrebi su glatke zaštitne cijevi, a korištena površina kabela kreće se između  $140 \text{ mm}^2$  i  $150 \text{ mm}^2$  [5]. U primjeni je za izgradnju mostova, kao i popravke i ojačanja svih tipova konstrukcija. Raspon korištene užadi u kabele kreće se između 1 i 73 užadi, a glavne sastavnice zone usidrenja ovog sustava su klinovi, sidrena glava, element za prijenos sila i tuljak. Pri prijenosu sila na beton, CONA CME BT, odnosno prijenosna ploča koristi se i za kabele veličine 2 do 61-nog užeta, dok se kvadratna ploča (CONA CME SP) koristi za kabele veličine 1 do 73 užeta.

Nadalje, CONA CMF sustavom naknadnog prednapinjanja moguća je izvedba, odnosno primjena i „bonded“ i „unbonded“ tehnologije. Radi se o tehnologiji višestruke užadi za primjenu uz naknadno prednapinjanje unutar betonskog presjeka i to onda kada je sidrenje nužno izvesti u iznimno tankim betonskim presjecima poput ploča. Slika 2.15 prikazuje prethodno opisan CONA CMF sustav.

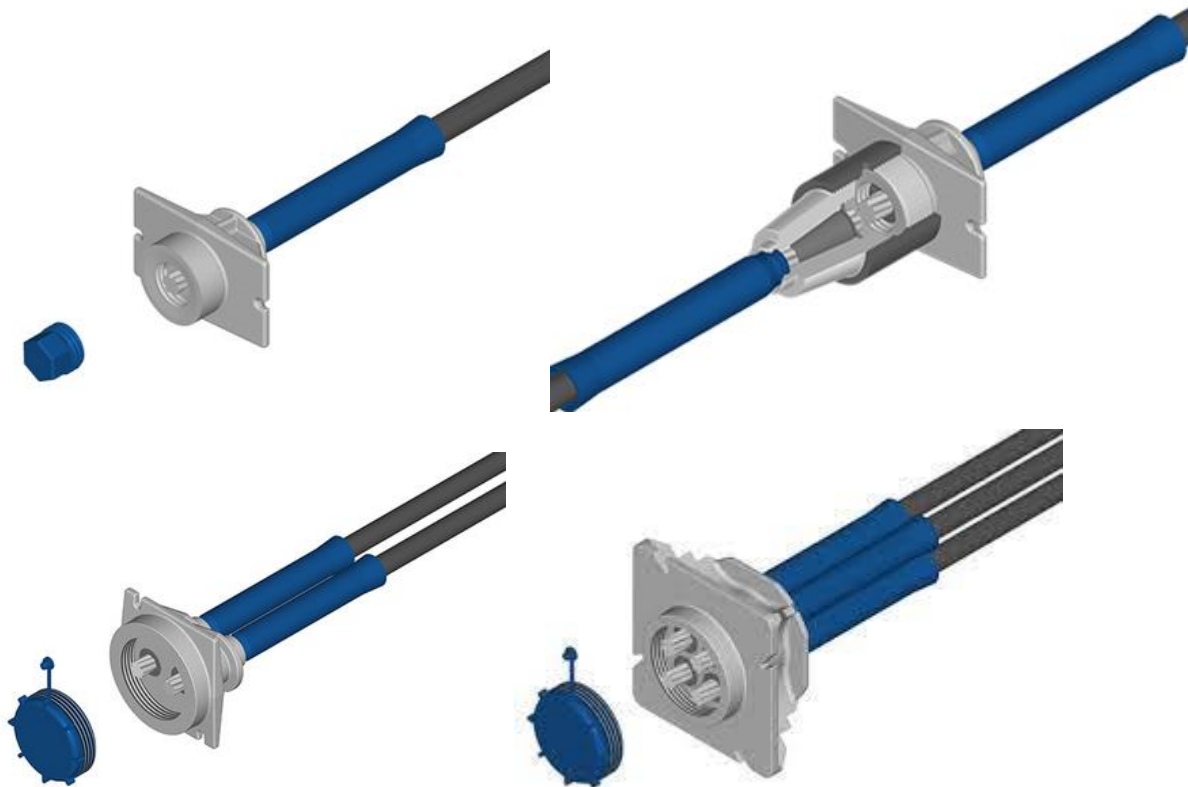


Slika 2.15 CONA CMF BT (prijenosna ploča), „kupler H“ za spajanje (Izvor: [5])

Glavne komponente zone usidrenja CONA CMF sustava kao i kod CONA CME sustava čine klinovi, sidrena glava, element za prijenos sila i tuljak. Pri prijenosu sila na beton koristi se CONA CMF BT prijenosna ploča koja koristi napredan vlastiti prijenos sila u tri ravnine osobito razvijen za zone usidrenja u tankim poprečnim presjecima. U pogledu užadi u kabelu, primjenjuje se od 2 do 4 užeta, dok površina istih iznosi 93, 100, 140 i 150 mm<sup>2</sup> s čvrstoćom u iznosu od 1860 N/mm<sup>2</sup> i užad površine 165 mm<sup>2</sup> s čvrstoćom od 1820 N/mm<sup>2</sup> [5].

CONA CMM sustav naknadnog prednapinjanja sustav je unutar betonskog presjeka primjenjivan pri izvedbi ploča garaža, stambenih građevina, poslovnih prostora, trgovačkih centara, hotela, sportskih građevina, bolnica te ploča mostova [22]. Sustav je također moguć uz primjenu „bonded“ ili „unbonded“ tehnologije.

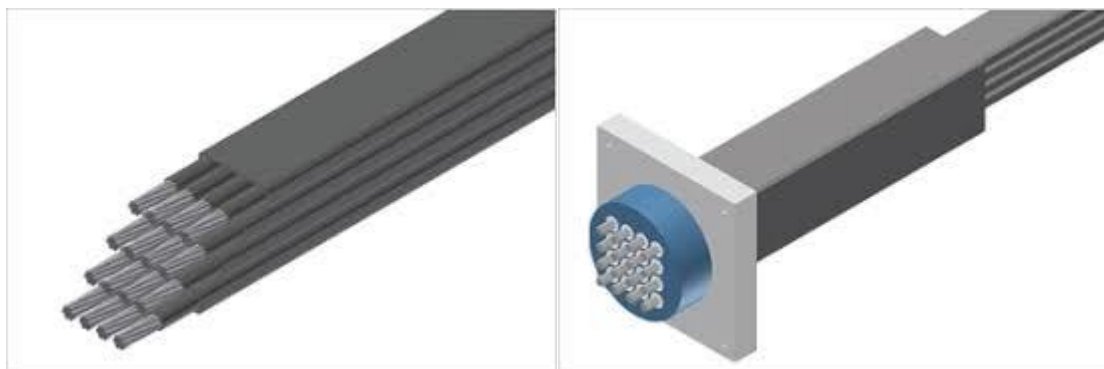
Sustav je najzastupljeniji u primjeni PT stropnih ploča i korišten je na predmetnoj građevini Skyline nebodera B (CONA CMM single). Slika 2.16 prikaz je dva CONA CMM sustava koja se razlikuju prema broju užadi.



Slika 2.16 CONA CMM Single i CONA CMM Two/Four (Izvor: [5])

Unutar samog sustava prisutna je podjela na CONA CMM single i CONA CMM Two/Four, sa razlikom u pogledu broja užadi – jedno, dva ili četiri.

U konačnici, posljednji, ali ne i manje značajniji BBR-ov sustav za naknadno prednapinjanje jest CONA CMB. Riječ je o tehnologiji višestruke užadi za specijalne primjene izvan, ali i unutar betonskog presjeka. Slikom u nastavku (slika 2.17) prikazuje se navedeno.



Slika 2.17 CONA CMB (Izvor: [5])

Pri primjeni ovog sustava, koriste se kabeli s užadi u rasponu od 1 do 16 užadi površine 140, 150 i 165 mm<sup>2</sup> [5]. Kako navodi proizvođač to je „sustav dojmljivog vizualnog dizajna, pruža visoku zaštitu od korozije te se široko primjenjuje pri prednapinjanju tornjeva vjetroagregata, kao i za ojačanje cestovnih i željezničkih mostova“ [5]

### 3. PREDMETNA GRAĐEVINA

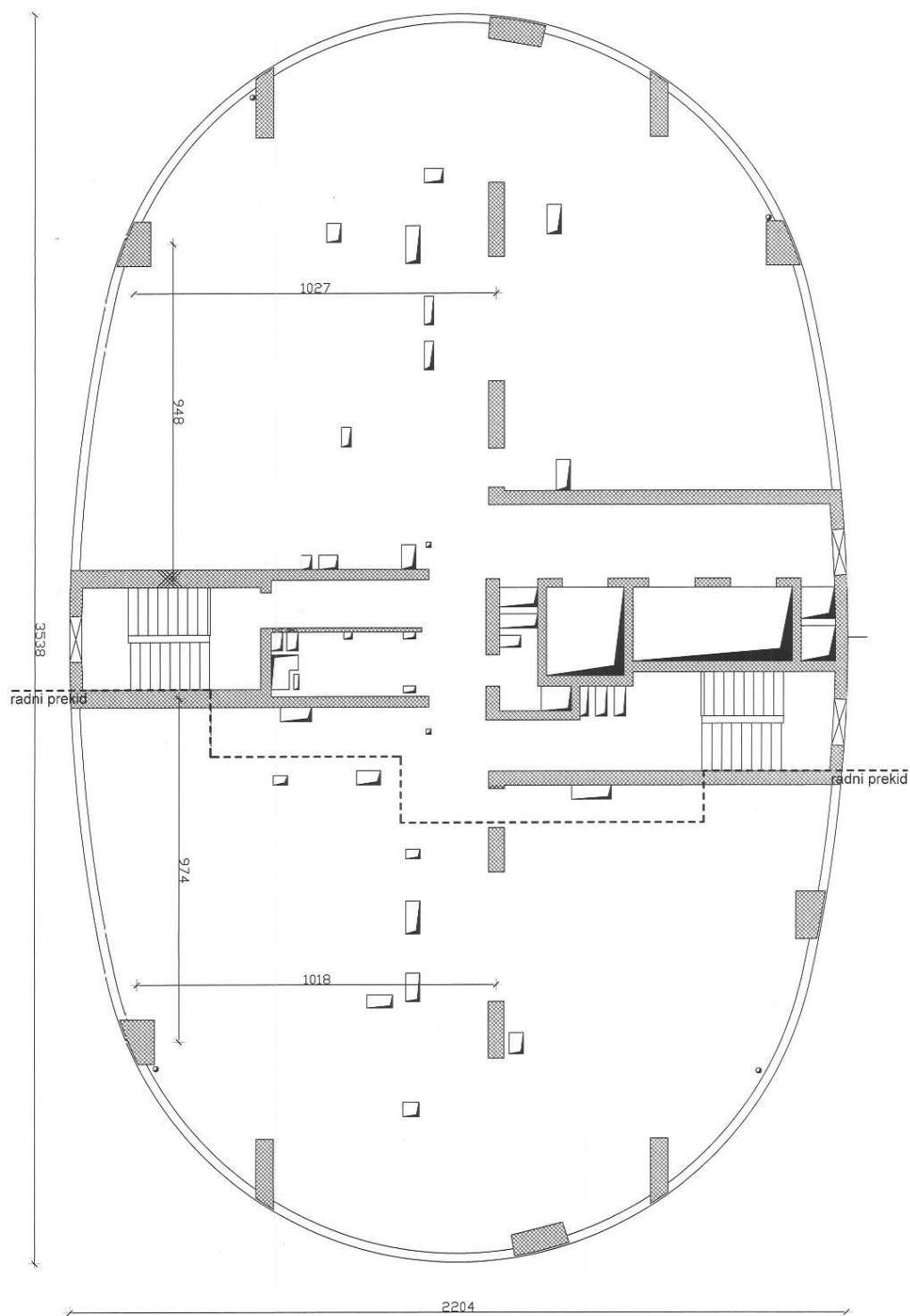
„S konstruktorskog motrišta, visoka građevina je ona na čije projektiranje presudan utjecaj imaju horizontalna djelovanja od vjetra i potresa“ [12]. Usljed naglog rasta metropola sve se više izdižu u visinu građevine/zgrade čija namjena je ili stambena ili poslovna, te se shodno tomu u mnogobrojnim klasifikacijama nebodera može zaključiti kako neboder predstavlja svaku građevinu sa deset ili više katova [12]. U svezi navedenog, analiziranu predmetnu građevinu definira se kao stambeni neboder od 27 katova. U konkretnom, uspoređuju se tehnički i ekonomski aspekti primjene monolitne PT stropne ploče, na primjeru građevine neboder B kompleksa Skyline u Beogradu. Projekt je koncipiran kao kompleks tri nebodera (u Beogradu kolokvijalno nazvan „tri kule“) – centralni poslovni (neboder C) visine 129 metara, manji stambeni (neboder A) visine 64 metra i radom analiziran srednji, također stambeni neboder B, visine 93,7 metara. Ukupna površina ovog stambeno poslovnog kompleksa iznosi 68.000 m<sup>2</sup>, a njegov otvoreni koncept na pravi način koristi prednosti lokacije [13]. „Kombinacijom valjkastih zaobljenih kontura i izlomljenih pravokutnih aneksa stvoreno je promišljeno rješenje, kao važan arhitektonski iskorak za čitav grad“ [13]. Predviđena i realizirana financijska ulaganja ovog kompleksa iznose preko 200 milijuna eura [13]. Prikaz nebodera B kompleksa Skyline prikazan je slikom 3.1, desno pozicioniran i istaknut, odnosno markiran svjetlije oznakom B.



Slika 3.1 Neboder B kompleksa Skyline (pozicioniran desno i istaknut/markiran svijetlije oznakom B) (Izvor: [13])

Opis građevine i dimenzije pojedinih elemenata prikazanih u nastavku evidentirani su tijekom obilaska gradilišta i proizlaze iz komunikacije s predstavnikom izvođača i projektantom. Pri izgradnji nebodera B, primarno radi smanjenja progiba ploča i redukcije probojnih sila (maksimalni raspon je 11 m), primijenjena je tehnologija PT ploča s pločom konstantne debljine od 24 cm. Prvih 10 etaža čini elipsasti neboder s pravokutnim aneksom veličine 22,0 x 46,0 m, dok narednih (gornjih) 17 etaža poprima tlocrtno, isključivo elipsasti oblik, dimenzije 22,0 x 35,0 m. Naknadno prednapete ploče imaju sto šest tona BBR VT CONA CMM monostrand „unbonded“ kabela. Radovi na konstrukciji nebodera B počeli su u ožujku 2022. godine, a završeni su u travnju 2023. godine. Pored značajnog smanjenja progiba u odnosu na nebodere A i C čije ploče su u klasičnoj AB izvedbi, postignuta je i vremenska ušteda. Da se radi o tehnički suvremenijem i ekonomski isplativijem građenju govori i činjenica da je tijekom građenja postignut tempo izgradnje od 11 dana za izvedbu 630 m<sup>2</sup> svake elipsaste ploče, u dva radna takta. Priloženi tlocrt (slika 3.2) prikaz je tipske elipsaste etaže nebodera B. Označena isprekidana linija predstavlja radni prekid i to kao granicu izvođenja radova po taktovima – svaka etaža nebodera B podijeljena je na dva takta radnim prekidom, a kabeli uzdužnog smjera na radnom taktu nastavljeni su na „kuplerima“ – spojka za osiguranje nastavka.

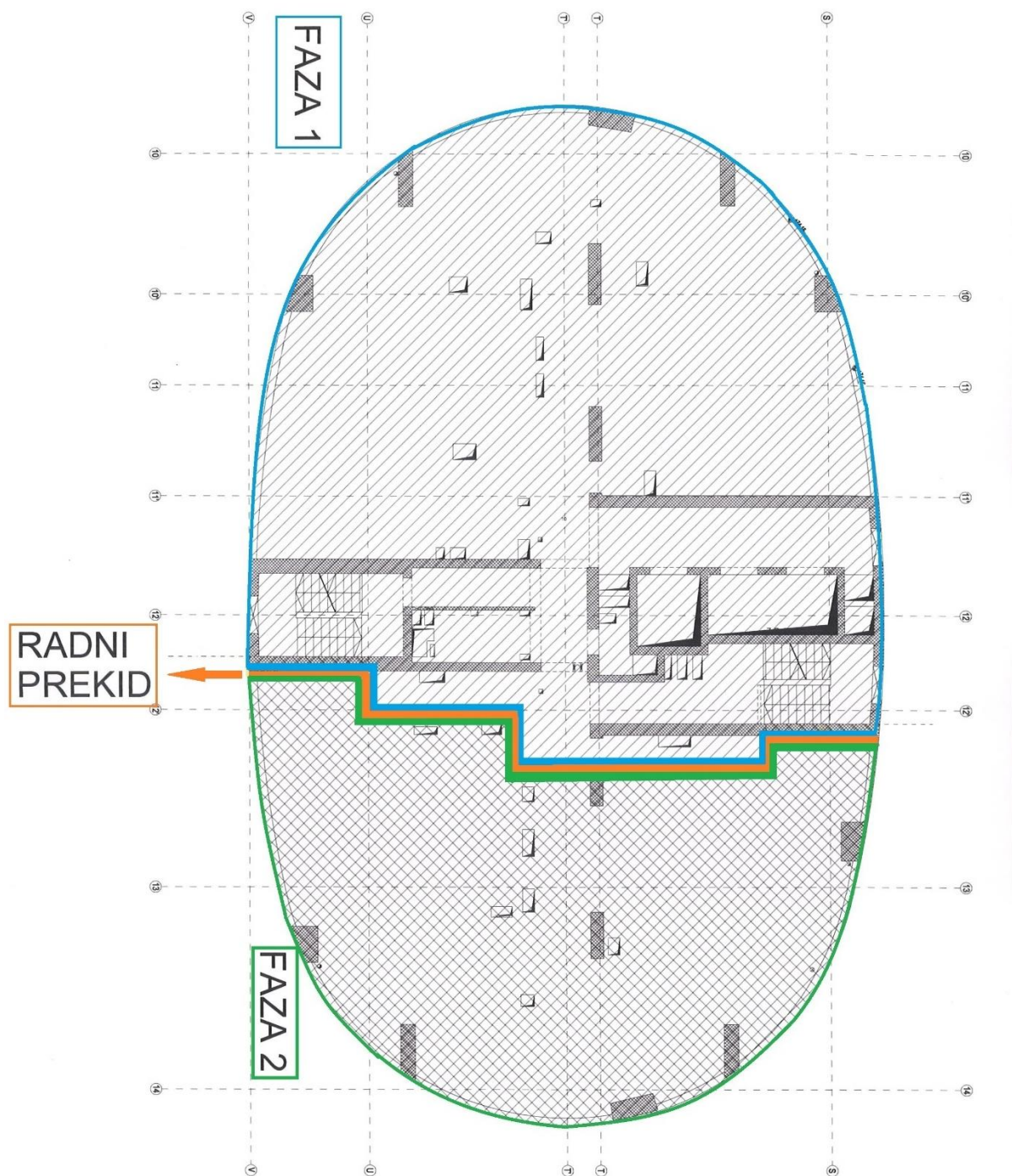




Slika 3.2 Tlocrt etaže nebodera B, ploča debljine 24 cm bez kapitela (Izvor: [14])

U skladu s navedenim, prvi takt djeluje i ponaša se kao privremena zasebna cjelina, a nakon betoniranja i napinjanja drugog takta struktura se pretvara u konačnu PT stropnu ploču.

Slika 3.3 prikaz je taktova betoniranja s radnim prekidom.



Slika 3.3 Taktovi betoniranja s radnim prekidom (Izvor: [14])

Razlog izvođenja u dva radna takta optimizacija je tehnološkog procesa i ljudskih resursa, i to ponajprije u vidu smanjenja "praznoga hoda" radnika.

Uzimajući u obzir problematiku nastalu tijekom građenja nebodera A i C u klasičnoj varijanti ploča poput složenije oplata (kapiteli uz vanjske stupove) i temeljem uočenih problema s progibima, još u toku izgradnje navedenih građevina, investitor je prihvatio ideju građenja stropnih ploča nebodera B kao naknadno prednapetih. I ploče nebodera A i C imaju slične raspone (maksimalno 11 m) između srednje jezgre i fasadnih stupova. Debljina njihovih ploča iznosila je 25 cm s rubnim, ojačanim debljim prstenom ploče i kapitelima, te se slijedom toga, investitor odlučio za primjenu PT ploča pri građenju nebodera B koja bi pored smanjenja progiba bila konstantne debljine 24 cm bez kapitela i ostalih ojačanja debljine. Time se dobiva jednostavnija oplata uz njenu smanjenu debljinu. Navedeno se prikazuje slikom 3.4.



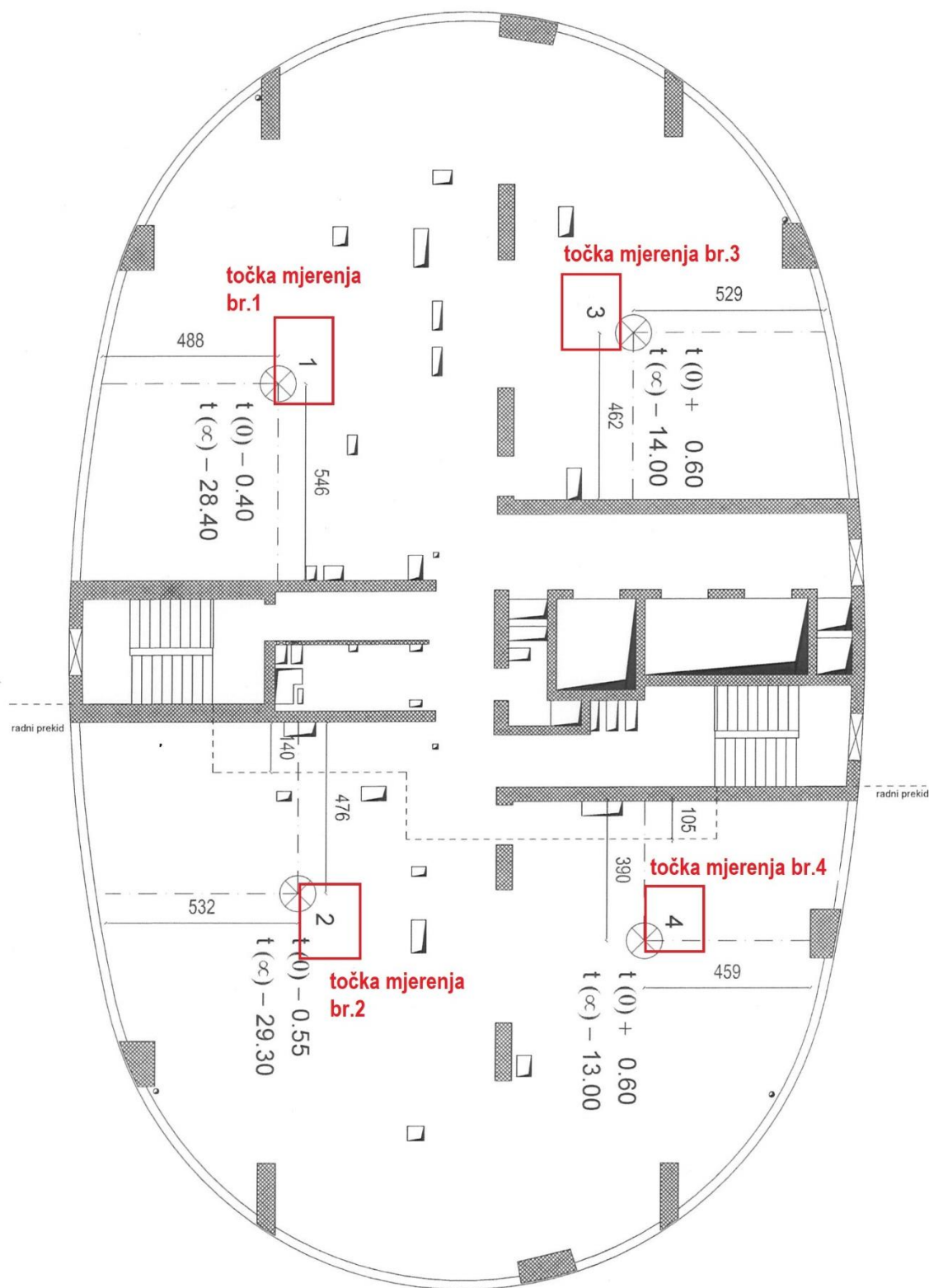
Slika 3.4 Neboder C (lijevo) klasična ploča s kapitelima, neboder B (desno) PT ploča konstantne debljine bez kapitela [Izvor: djelo autora]

Prema Eurokodu 2 (EC2) [15], dopušteni vremenski progibi iznose  $l/250$ , a  $l/500$  u slučajevima kad deformacija ploče može ugroziti sekundarne nosive elemente (primjerice pregradne zidove). Mnogi projektanti na rasponima, poput onih primjenjivanih tijekom građenja nebodera B, nastoje zadovoljiti kriteriji  $l/250$ . No ovaj kriteriji prihvatljiv je za standardne raspone visokih zgrada u iznosu od 6 do 7 metara. Povećanjem raspona preko 10 metara dopušteni progib od primjerice četiri centimetra ( $w=4$  cm) biti će vizualno uočljiv, a predstavljat će i opasnost za nastajanje pukotina u pregradnim zidovima. Na analiziranom predmetnom

neboderu B odlukom projektanta, dopušteni progib je postrožen prema kriteriju srednje veličine kriterija  $l/250$  i  $l/500$  prema izrazu:

$$w = \frac{\frac{l}{250} + \frac{l}{500}}{2} = \frac{l}{375} \quad (3.1)$$

U radu je napravljena analiza na način da je uspoređena PT ploča s pločom u klasičnoj izvedbi prema parametru jednakog progiba,  $\frac{l}{375}$  za obje izvedbe. Analizirane su razlike u debljini ploče i količini armature i visokovrijednog čelika koje pokazuju tehničko ekonomske prednosti PT ploča. Osim u količini materijala zanimljiva je i procjena doprinosa u smanjenju emisije CO<sub>2</sub>, koje su stimulirane u Europskoj uniji u sklopu trenda održivog razvoja. Tijekom građenja vršeno je geodetsko praćenje progiba svake etaže na četiri pozicije – točke mjerenja. Slika 3.5 prikaz je kontrole progiba na 15.-toj etaži nebodera B s naznačenim točkama mjerenja (brojčane oznake 1, 2, 3 i 4), dok slika 3.6 prikazuje instrument za mjerenje, odnosno geodetsko praćenje progiba na samom gradilištu.



Slika 3.5 Kontrola progiba 15. etaže– nacrt (Izvor: [14])

Kontrola progiba izvršena u nultoj elastičnoj kombinaciji pokazala je zadovoljavajuću toleranciju od  $\pm 1-2$  mm što je dobar pokazatelj da će i vremenski progibi biti u okviru

dopuštenih. Početna ideja bila je praćenje svih ploča, međutim nisu izmjerene sve ploče jer je zaključeno da nema potrebe za provjerom svih ploča radi ujednačenih i prihvatljivih rezultata.



Slika 3.6 Mjerenje progiba grede [Izvor: djelo autora]

Početni progibi na prva dva nebodera bili su u centimetrima, a zahvaljujući prednapinjanju, početna faza progiba karakterističnih točaka (vlastita težina + prednapinjanje) rezultira spuštanjem ili odizanjem ploče u granicama  $\pm 1-2$  milimetara što su i pokazale geodetske snimke nulte faze izgradnje. Drugim riječima, u fazi vlastite težine prednapinjanje je „izravnilo“ geometriju ploče kao da progiba nema. Ukupni vremenski progib na prednapetoj ploči, na najkritičnijem mjestu daje rezultat 28 milimetara. Da bi se usporedila klasična i PT ploča tražila se debljina klasične ploče čiji bi vremenski progib bio ekvivalentan onom tanje PT ploči. Elastični progib klasične ploče iznosi 8,0 mm. Vremenski progib prema pojednostavljenoj formuli povećava se 3,5 puta što se prikazuje sljedećim izrazom:

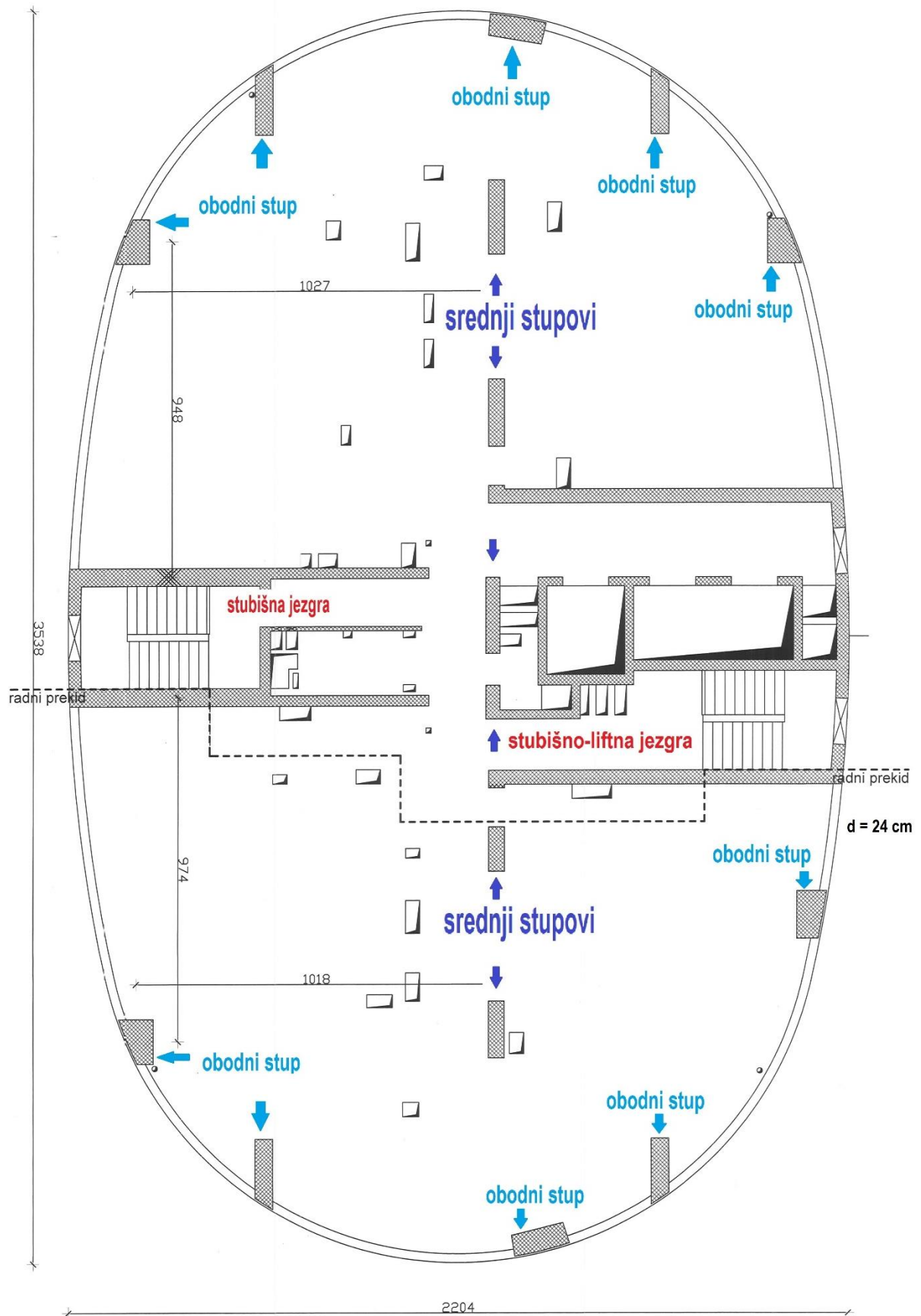
$$w_{\infty} = w_0 \times 3,5 \quad (3.2)$$

gdje  $w_0$  predstavlja nulti elastični progib (vlastita težina, slojevi i 30 % uporabnog opterećenja), a 3,5 procjena je faktora vremenskog povećanja. U konkretnom, vremenski progib dan je izrazom:

$$w_{\infty} = 8,0 \times 3,5 = 28,0 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Pri tom, najveći doprinos vremenskom progibu daje puzanje i smanjenje krutosti ploče otvaranjem pukotina zbog prekoračenja vlačnih rubnih naprezanja. Naknadno prednapete ploče najvećim dijelom ostaju u tlaku po cijelom presjeku što povoljno utječe na smanjenje vremenskih progiba.

Tlocrtna geometrija konstrukcije ima dva karakteristična dijela – na prvih 10 etaža ‘elipsasti presjek’ ima dodatni pravokutni aneks dimenzije 22,0 x 46,0 metara, dok ostale, gornje etaže samo elipsastog tlocrta imaju dimenziju 22,0 x 35,0 metara. Vertikalne nosive elemente čine AB stubišno liftne jezgre u srednjem dijelu presjeka te četiri srednja stupa. Udaljenost između liftnih jezgara i vanjskih stupova daju raspone u iznosu od 8 do 10,5 metara (slika 3.7).

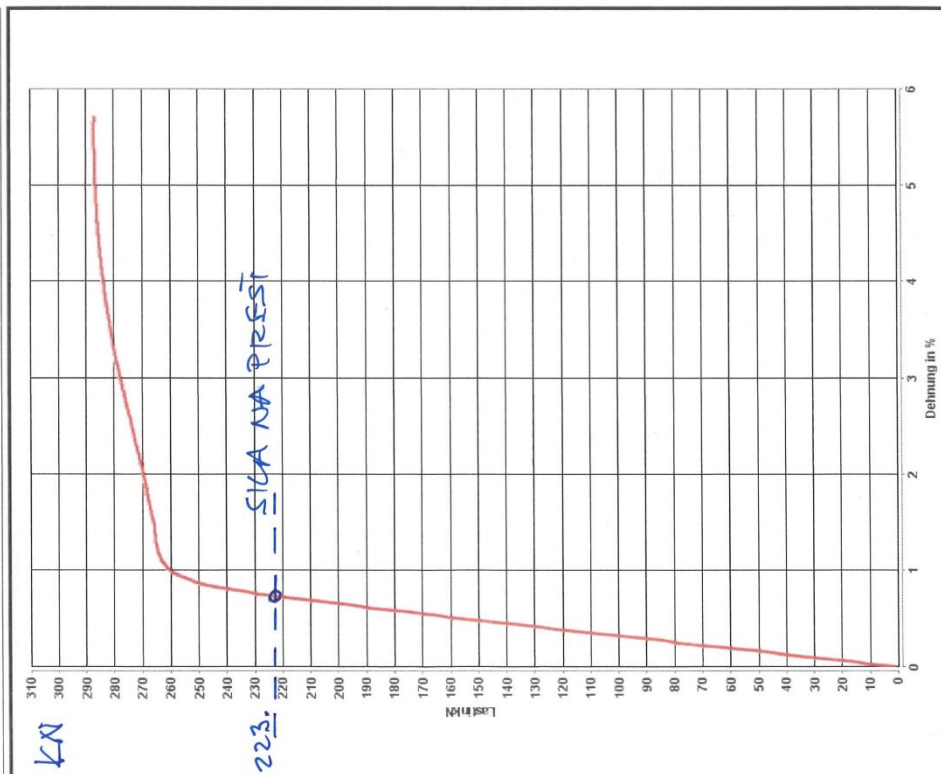


Slika 3.7 Prikaz vertikalnih nosivih elemenata nebodera B



Za naknadno prednapinjanje korišteni su namašćeni kabeli u zaštitnoj plastičnoj cijevi (tehnologije „unbonded“) tipa BBR VT CONA CMM 0106 – 150, promjer 15,7 mm [17]. Kabeli imaju površinu  $A_p = 150 \text{ mm}^2$  i vlačnu čvrstoću 1860 MPa ( $f_{pk}=1860 \text{ MPa}$ ) [18]. Sila prednapinjanja unosi se prešom kada tlačna čvrstoća betona (razred C 30/37) dostigne minimalno 24 MPa (uobičajeno 3 do 4 dana od betoniranja). Sila na preši ograničava se na 80 % od karakteristične vrijednosti maksimalne sile koja odgovara vlačnoj čvrstoći čelika za prednapinjanje i iznosi 223 kN ( $0,8 \times 279 \text{ kN}=223 \text{ kN}$ ). Betoniranje ploče etaže izvedeno je u dva takta s jednim radnim prekidom pomoću „kuplera“. Građenje započinje postavljanjem oplata stropne ploče 1. takta na način da se postavljaju oplatni stolovi poduprti podupiračima. Nadalje, radovi se i dalje odvijaju u 1. taktu. Armatura se postavlja u donju zonu i ugrađuju se kabeli. Potom započinju radovi i na 2. taktu. Ovdje se oplata postavlja za sve okolne stupove i zidove jezgre. Zatim slijedi postavljanje armature u gornju zonu i ugradnja kabela u 1. taktu i time su izvedene pripreme koje prethode betoniranju. Valja napomenuti dok se u 2. taktu izvodi betoniranje stupova i zidova, po kontroli i pregledu građevnog materijala (armature i kabela) 1. takta, započinje se s betoniranjem stropne ploče što u konačnici ove faze, u konkretnom, rezultira stupovima, zidovima 1. i 2. radnog takta te pločom 1. radnog takta. Izvođenje ploče 2. takta započinje nakon što se ukloni oplata sa zidova i stupova te se provodi isti postupak u pogledu postavljanja oplata za ploču 2. takta kao i kod 1. takta. Za to vrijeme započinje građenje naredne etaže 1. takta i postavlja se oplata stupova i zidova. Po uklanjanju oplatnih stolova sa stropne ploče 1. takta, pristupa se napinjanju kabela – postepenim rastom opterećenja na ploču i kabeli se postepeno napinju. Za to vrijeme u 2. radnom taktu armatura se postavlja i u donju i u gornju zonu te se ugrađuju kabeli. Provodi se nadzor i započinje se s betoniranjem ploče 2. radnog takta. Zatim slijedi ponovno postavljanje oplata za ploču naredne etaže 1. takta. Navedenim se ukratko prikazuje postupak betoniranja ploče kroz nekoliko dana. U kontekstu prednosti ovog načina građenja valja istaknuti brzinu i efikasnost koji se postižu upravo tim radnim prekidom, odnosno taktovima izvođenja.

Slikom 3.8 prikazan je radni dijagram ispitivanja visokovrijednog čelika za prednapinjanje. Valja napomenuti kako je u obzir uzeta vrijednost vlačne čvrstoće od 1860 MPa kao garantirana vrijednost na provedenom pokusu, unatoč tomu što radni dijagram pokazuje na vrijednost vlačne čvrstoće od 1917 MPa što se potkrepljuje činjenicom da je i veća vlačna čvrstoća poželjna.



Unsere Auftrags-Nr.:	1711300684 / 8	Nenn Durchmesser:	15,700 mm
Order No.:		Diameter Nominal:	
Charge:	16895805	Nenn Querschnitt:	193,59 mm <sup>2</sup>
Batch:		Section Nominal:	
Schmelze:	2103370C	Interne Norm:	BBR-ADRIA
Heat No.:		Internal Specific:	

Zugfestigkeit	Tensile strength	1917	MPa
Last bei 0,1%	0,1% proof load	256,6	kN
Dehnung bei Höchstlast	Total elongation at max load	5,5	%
Elastizitätsmodul	Modulus of elasticity	201,4	GPa
Durchmesser	Diameter		

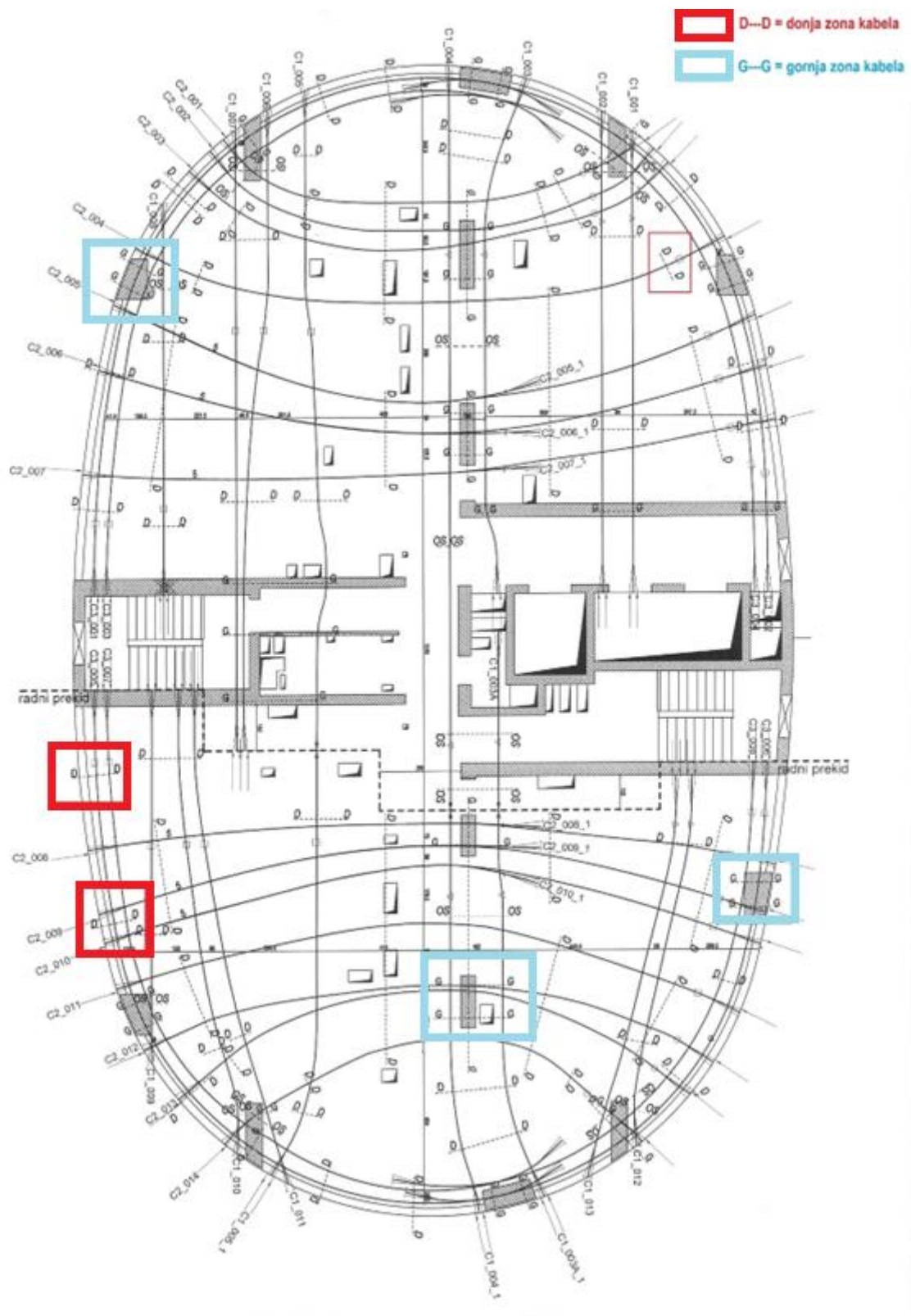
Querschnitt	Cross sectional area	151,08	mm <sup>2</sup>
Metergewicht g/m	Weight per meter g/m	1180,0	g/m

Geprüft:	V496927	Seite	6 / 10	Attest:	5171171496 / 1
Executed:		page		Cert. No.:	

Slika 3.8 Ispitivanje visokovrijednog čelika u laboratoriju – radni dijagram (do sloma) (Izvor: [14])

Radnim dijagramom vidljiva je sila u kabelu od 223 kN koja daje naprezanje od 149,0 MPa ( $223 \text{ kN} \div 0.0015 \text{ m}^2 = 148666 \text{ kN/m}^2$ ).

Pri građenju stropnih ploča predmetne građevine, nebodera B, primijenjena je „unbonded“ tehnologija primjenom namašćene užadi u plastičnim cijevima. Time su se kabeli zaštitili od korozije, postavljanje je bilo brže i lakše, a nije bilo niti dodatnih ograničenja u nepovoljnim temperaturnim uvjetima. Smanjeno je trenje čime su bili omogućeni veći taktovi betoniranja, a ugradnju kabela ubrzala je i primjena slobodnog vođenja kabela gdje je „kabel sam“ formirao liniju između gornjeg i donjeg pridržanja bez visinskih distancera. Tijekom izgradnje, pokazalo se da su „unbonded“ kabeli bili pogodni u optimalnom postizanju skretnih sila predmetom prikazanih složenih tlocrtnih geometrija jer se postigla veća tlocrtna zakrivljenost, a zakrivljenjem kabela zaobišli su se i manji otvori u samoj ploči. Nacrt kabela gornje etaže prikazan je slikom 3.9.



Slika 3.9 Nacrt kabela (Izvor: [14])

U nacrtu prikazano mjesto G---G, položaj je gornje zone kabela, dok je D---D prikaz mjesta donje zone kabela. Između je pad prema slobodnom vođenju.

Ciklusi izvođenja naknadnog prednapinjanja izvode se kako slijedi [5]:

1. Postavljanje oplata,
2. Postavljanje donje zone armature,
3. Postavljanje kabela i usidrenja sustava za prednapinjanje,
4. Postavljanje gornje zone armature,
5. Betoniranje,
6. Skidanje bočne oplata,
7. Napinjanje i mjerenje izduženja i
8. Rezanje viška kabela.

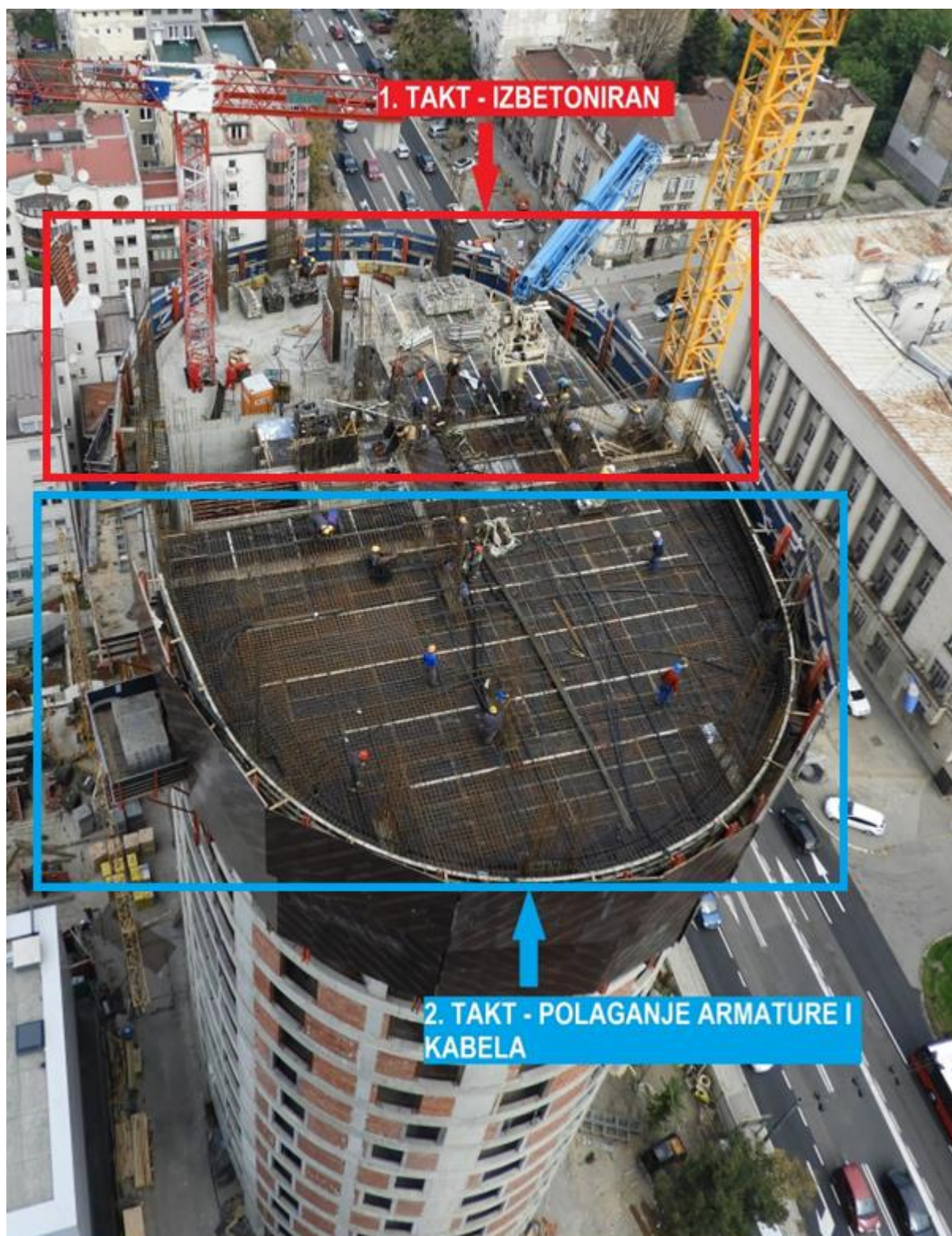
Slikom 3.10 prikazan je dio ploče iz treće faze izvođenja naknadnog prednapinjanja.



Slika 3.10 Dio 3. faze ciklusa – postavljanje kabela i usidrenja sustava za prednapinjanje

[Izvor: djelo autora]

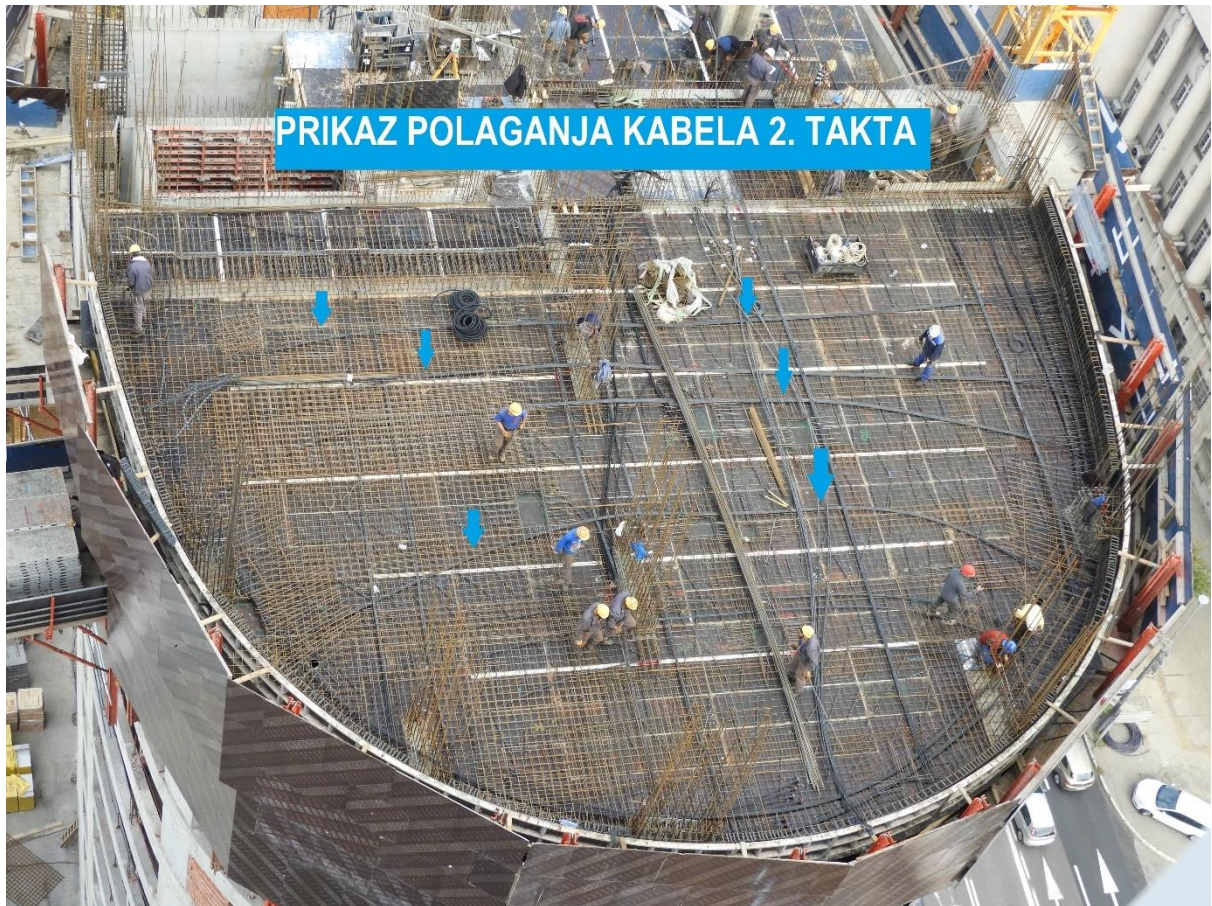
Faza građenja karakteristične ploče s već izgrađenog 36-etažnog susjednog nebodera, prikazana je slikom 3.11 i slikom 3.12 dok slika 3.13 prikazuje pogled na kompleks sa ulice.



Slika 3.11 Izgradnja karakteristične ploče – prikaz dvaju taktova (Izvor: [4])

Već prethodno opisano u radu, sada se potkrepljuje i fotodokumentacijom. U konkretnom, slika 3.11 prikaz je izbetoniranog 1. takta. Betoniranju je prethodila kontrola i pregled armature i

kabela u pogledu pripremljenosti za fazu betoniranja 1. takta, dok je 2. takt u fazi polaganja armature i kabela.



Slika 3.12 Izgradnja karakteristične ploče – prikaz 2. takta (Izvor: [4])

Slika 3.12 prikaz je polaganja kabela. Ovdje valja napomenuti kako se ne radi o konačnom položaju kabela. Kao i kod 1. takta, prije betoniranja provode se kontrole i pregledi koji moraju biti zadovoljeni kako bi se moglo pristupiti istom.



Slika 3.13 Pogled na kompleks s ulice (Izvor: [4])

Proračun PT ploča temelji se na određivanju tlačnih i skretnih sila koje se u superpoziciji sa silama od vertikalnog opterećenja za pojedine faze, uz određene koeficijente sigurnosti, dimenzioniraju se na moment i uzdužnu silu. Od velike je važnosti zadovoljiti pomake i rubna naprezanja u nultoj ( $t_0$ ) i vremenskoj fazi ( $t_\infty$ ). Prema mišljenju jednog od projektanta, kao sudionika u izgradnji ovog projekta, važno je istaknuti i veći spektar rješenja pri analizi PT ploča u odnosu na klasičnu izvedbu AB ploče, jer su ona vezana na odabir broja, rasporeda i oblika linije kabela, a debljinom ploče balansira se težina ploče s kontra skretnim silama, te su one pak proporcionalne strelici kabela unutar debljine ploče [10].

Temeljem prethodno navedenog, prednost primjene PT ploča je brže građenje uslijed bržeg uklanjanja oplata (četiri dana nakon betoniranja). Unošenjem prednapinjanja oplata se može ukloniti odmah čime se građenje ubrzava za minimalno 3 dana po etaži u odnosu na klasičnu monolitnu ploču bez prednapinjanja.



## **4. ANALIZA VARIJANTE NAKNADNO PREDNAPETE STROPNE PLOČE I ARMIRANOBETONSKE (NENAPETE) STROPNE PLOČE**

Prednapinjanje stropnih ploča omogućava sudionicima u gradnji (projektantima, izvođačima i investitorima) mnogobrojne prednosti u usporedbi s građenjem klasičnih AB konstrukcija [19]. Tehničke i ekonomske prednosti PT ploča prema građenju klasične ploče ističu se pri rasponima većim od 8 metara [18]. U nastavku slijede uvodna razmatranja navedenog, a potom i zasebna analiza varijante naknadno prednapete monolitne stropne ploče i analiza varijante AB (nenapete) stropne ploče.

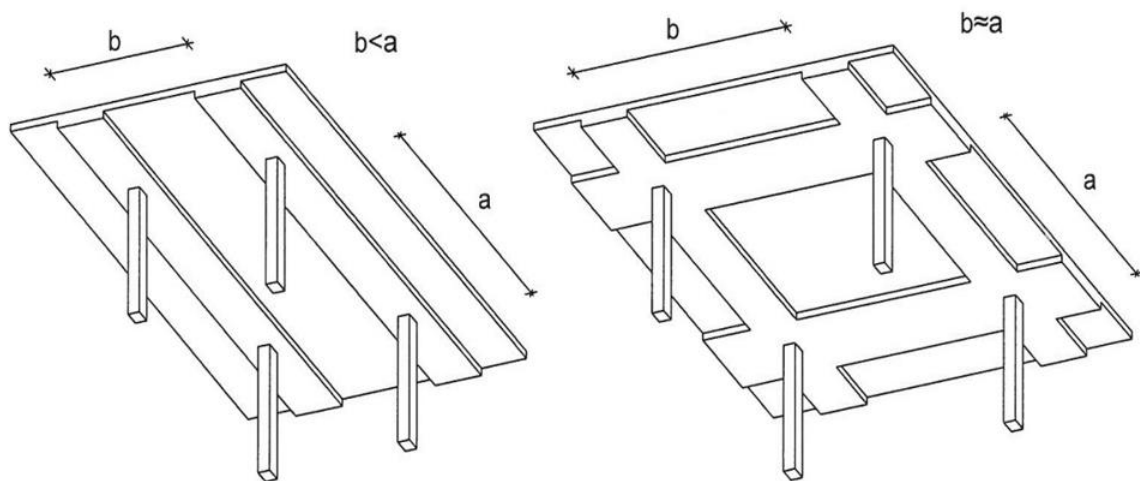
### **4.1. Uvodna razmatranja**

Savladvanje raspona većih od 8 metara uz manju debljinu ploče, moguće je ugradnjom kabela od visokovrijednog čelika. Prilikom napinjanja, preko usidrenja vlačna sila u kabelima u ploču unosi tlačnu silu i pritom ekscentrična linija vođenja kabela izaziva skretne sile koje su u poljima ploča suprotne gravitacijskom opterećenju. Slijedom navedenog, za predmetnu građevinu neboder B izvršena je analiza, odnosno usporedba analize varijante naknadno prednapete monolitne stropne ploče i analize varijante AB (nenapete) stropne ploče. Pri tom, ističu se posljedice interakcije kabela i betona i to [5]:

1. Smanjenje progiba,
2. Reduciranje pukotina zbog povećanja područja tlaka u presjeku ploče,
3. Smanjenje probojne sile u zoni izravnog oslanjanja ploče na stup,
4. Veća brzina gradnje uslijed bržeg skidanja oplata,
5. Manje seizmičke i vertikalne sile – rezultat toga je manja količina armature u vertikalnim elementima i temeljima (manja masa konstrukcije),
6. Manje katne visine mogu smanjiti ukupnu visinu zgrade i dubinu temeljenja,
7. Povećana trajnost konstrukcije uz manje troškove održavanja.

Temeljem podataka dobivenim na samom gradilištu pri izgradnji nebodera B, a koji se odnose na debljinu ploča, klasične AB ploče imaju najčešće debljinu između 14,0 i 24,0 centimetara i savladavaju jednosmjernu rasponu od 5,0 do 6,0 metara, ili 8,0 x 8,0 metara dvosmjerno. Ukoliko se posegne za povećanjem raspona AB ploče, povećat će se i njena debljina što u konačnici rezultira većim utroškom armature, teže su i cjenovno skuplje. Upravo je to potaknulo investitora ovog projekta da posegne za drugim metodama i rješenjima u savladavanju velikih raspona koja su donijela povoljnije rješenje i vremensku uštedu izvedbe

stropnih ploča predmetne građevine. Kvalitetnije mogućnosti oblikovanja prostora ogledaju se kroz vitkije stropne konstrukcije, odnosno najčešće one bez greda i kapitela. Samim time, navedeni veći rasponi ili ukidanje nekih linija stupova rezultiraju estetski uspješnijim rješenjima i boljom funkcionalnosti. Pri izvedbi ovog projekta, projektanti su investitoru istaknuli mogućnost takozvanog „transfer plate-a“, odnosno prijelaz iz manjih raspona gornjih etaža na veće raspone niže etaže. Time su ukazali i na opće prisutne uštede u materijalu. PT ploče konstantne debljine mogu biti tanje i do 30 posto, pa se količina nenapete armature i više nego prepolovi. Uzimajući u obzir prethodno kao i dodatne troškove kabela, cijena ploče u konačnici je manja. S tehničkog aspekta, razlike u cijeni nastaju, odnosno ovisit će i o rubnim uvjetima oslanjanja, broju polja, a najviše o opterećenju na ploču. Veće opterećenje rezultira i većom razlikom u troškovima materijala u korist PT ploča. Veliki značaj na projektu predstavlja i primijenjena „unbonded“ tehnologija, odnosno mogućnost direktnog oslanjanja ploče na stupove bez greda i/ili kapitela jer se koristi efekt smanjenja probojne sile. Time se smanjuju troškovi oplata greda. Dakle, dobiva se na brzini i jednostavnosti postavljanja oplata. Kod većih raspona prednapetih ploča (12 do 20 metara) najefikasnija su ojačanja ploče plitkim širokim gredama u jednom ili dva smjera. Ploče velikih raspona prikazane su slikom 4.1.



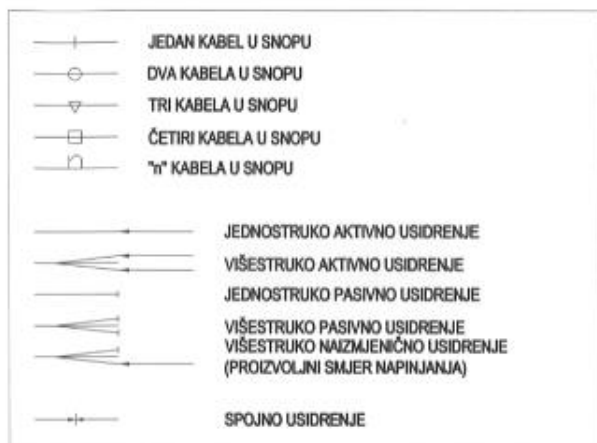
Slika 4.1 PT ploče ojačane plitkim, širokim gredama, za veće raspone (12 – 20 m) (Izvor: [3])

Ovakvim konceptom ojačanja PT ploča savladavaju se veliki rasponi i to s relativno malim debljinama ploče.

U nastavku slijedi prikaz plana polaganja kabela (slika 4.2) tipske etaže sa specifikacijom materijala, navedenim tipom korištenog kabela te navedenim iznosima koeficijentata i sile napinjanja.

# PLAN POLAGANJA KABELA

## KARAKTERISTIČNA ETAŽA Mj.:1:100/20



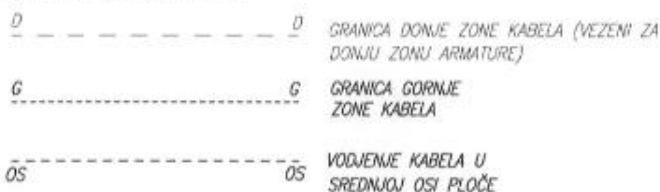
### SPECIFIKACIJE MATERIJALA:

- Min. čvrstoća betona za naprezanje 24MPa (kocka).
- Nenapeta armatura B500 (500MPa).
- Beton C 30/37
- Max. vodocementni faktor=0.45

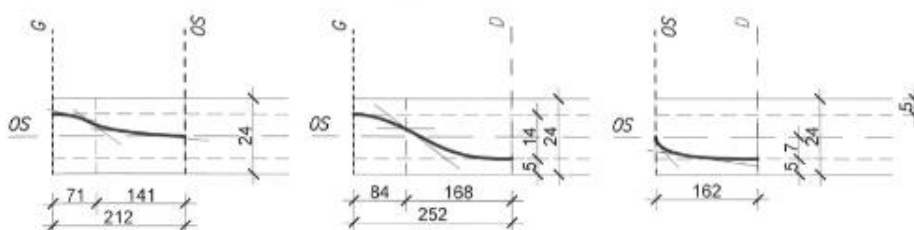
### ZAMAŠĆENI & OBLOŽENI KABELI

- BBR VT CONA CMM 0106 jednožilni kabel (150mm<sup>2</sup>, 1860MPa, F<sub>c</sub>=279kN).
- Koeficijent trenja=0.05 1/rad
- Koeficijent neravnosti kabela =0.00475 1/m
- Sila napinjanja (prije zaklinjavanja)=0.8x F<sub>c</sub>
- Proklizavanje klina = 6mm

### SLOBODNO VODJENJE KABELA:



### HEMA POLAGANJA U PLOČI d=24 cm



Slika 4.2 Plan polaganja kabela tipske etaže (Izvor: [14])

Iz prikaza je vidljiva shema polaganja kabela, a već prethodno u radu, nacrtom kabela (slika 3.9) prikazane su i označene gornja (G---G) i donja (D---D) zona kabela, odnosno naglašeno je zakrivljenje kabela kojim su se zaobišli manji otvori u ploči.

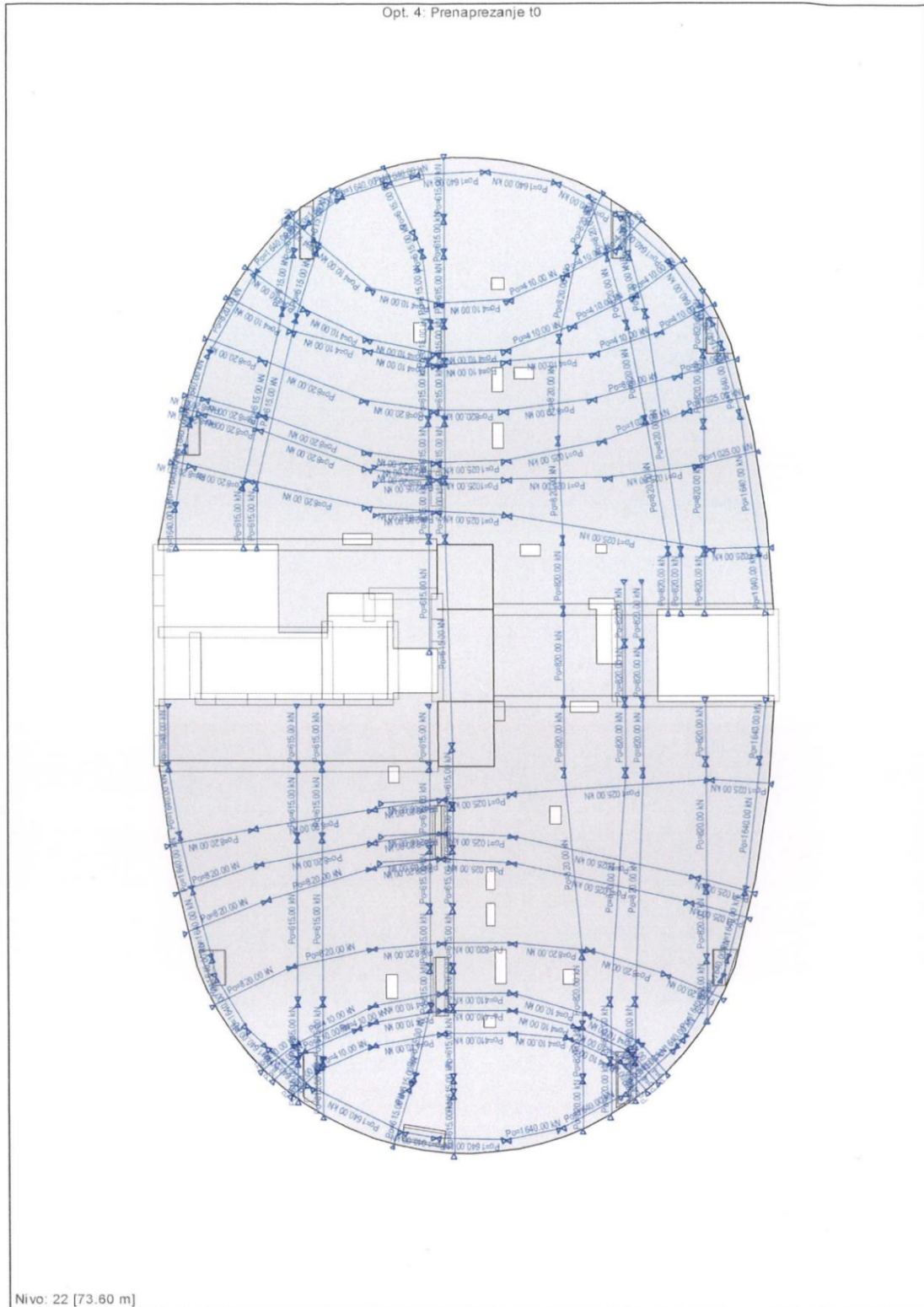
Temeljem susretanja s materijom metode konačnih elemenata tijekom studija kao i komunikacijom s jednim od autora programa GRAFeM-a, za modeliranje stropne ploče izvedene kao klasične AB (nenapete) monolitne ploče radi usporedbe s PT pločom, korišteni su konačni elementi tanke ploče–ljuske, sa šest stupnjeva slobode po svakom čvoru, dok su za modeliranje oslonaca korišteni rubni elementi (eng. boundary). Opterećenje je zadano kao

iznos pritiska na površinu ploče. Program GRAFeM koristi alat za rješavanje iz programa SAP5 gdje se vektor pomaka čvorova dobiva pomoću matrice krutosti i vektora opterećenja direktnom metodom pomoću Gaussove eliminacije [15]. Nadalje, s ciljem usporedbe i izvođenja zaključaka predmetne analize dviju varijanti sustava stropnih ploča na predmetnoj građevini neboder B kompleksa Skyline, slijede izvadci iz statičke analize PT ploče u programu Tower i klasične ploče u programu GRAFeM – programu za statičku i dinamičku analizu konstrukcija metodom konačnih elemenata [14].

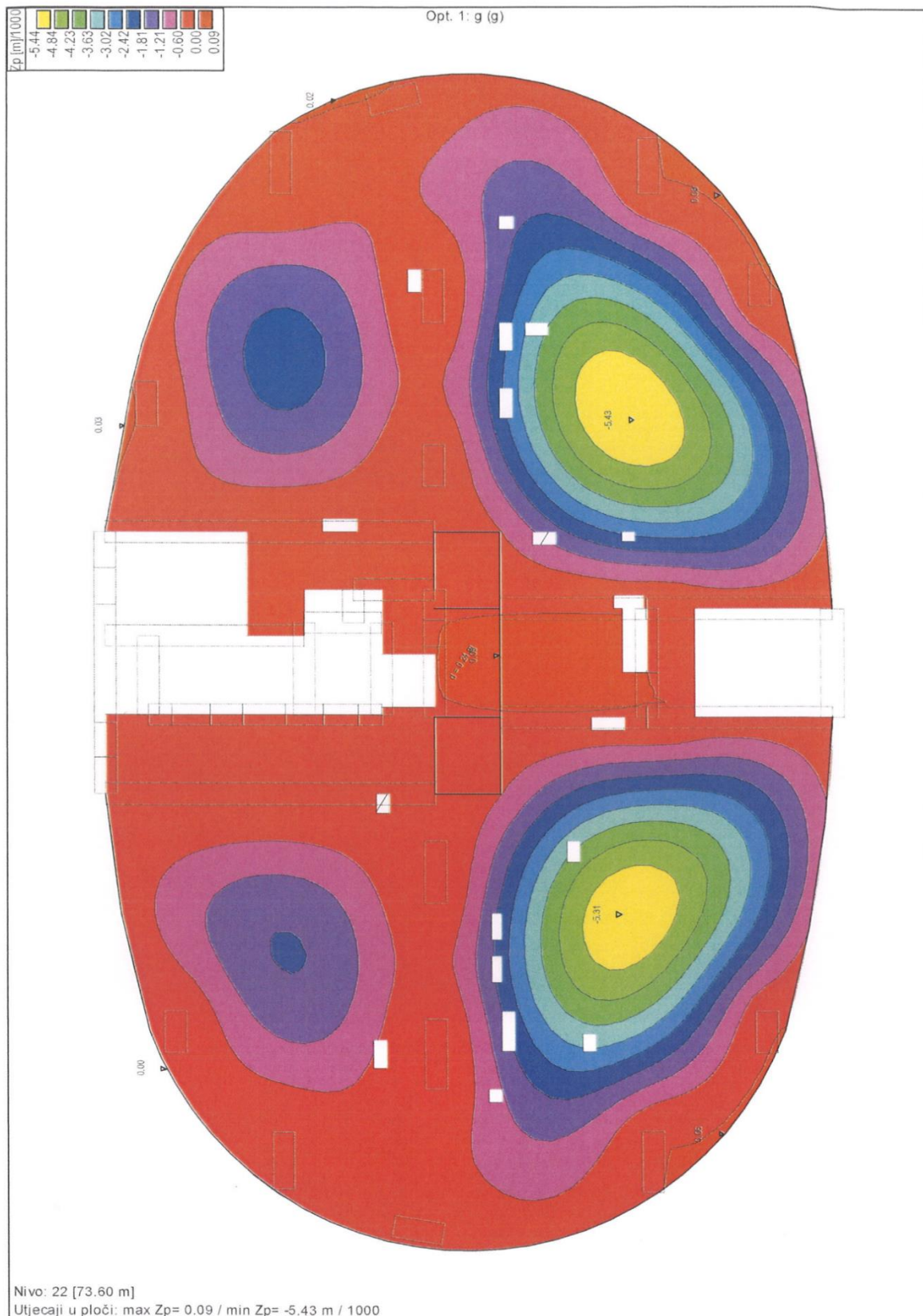
## **5. ANALIZA VARIJANTE NAKNADNO PREDNAPETE MONOLITNE STROPNE PLOČE**

Izvatkom iz statičke analize PT ploče debljine 24 centimetara u programu Tower prikazan je model ploče s linijama kabela i iznosima sila prednapinjanja (slika 5.1). Zatim slijede izolinije elastičnog progiba ploče i to od vlastite težine (slika 5.2) i od prednapinjanja (slika 5.3), te superponirana vlastita težina i prednapinjanje ( $t = 0$ ) koji pokazuju superponirane progibe odizanja i spuštanja ploče u iznosu  $\pm 2$  mm (slika 5.4). U konačnici, prikazan je konačni vremenski progib PT ploče vrijednosti maksimalno 23 milimetara (slika 5.5).

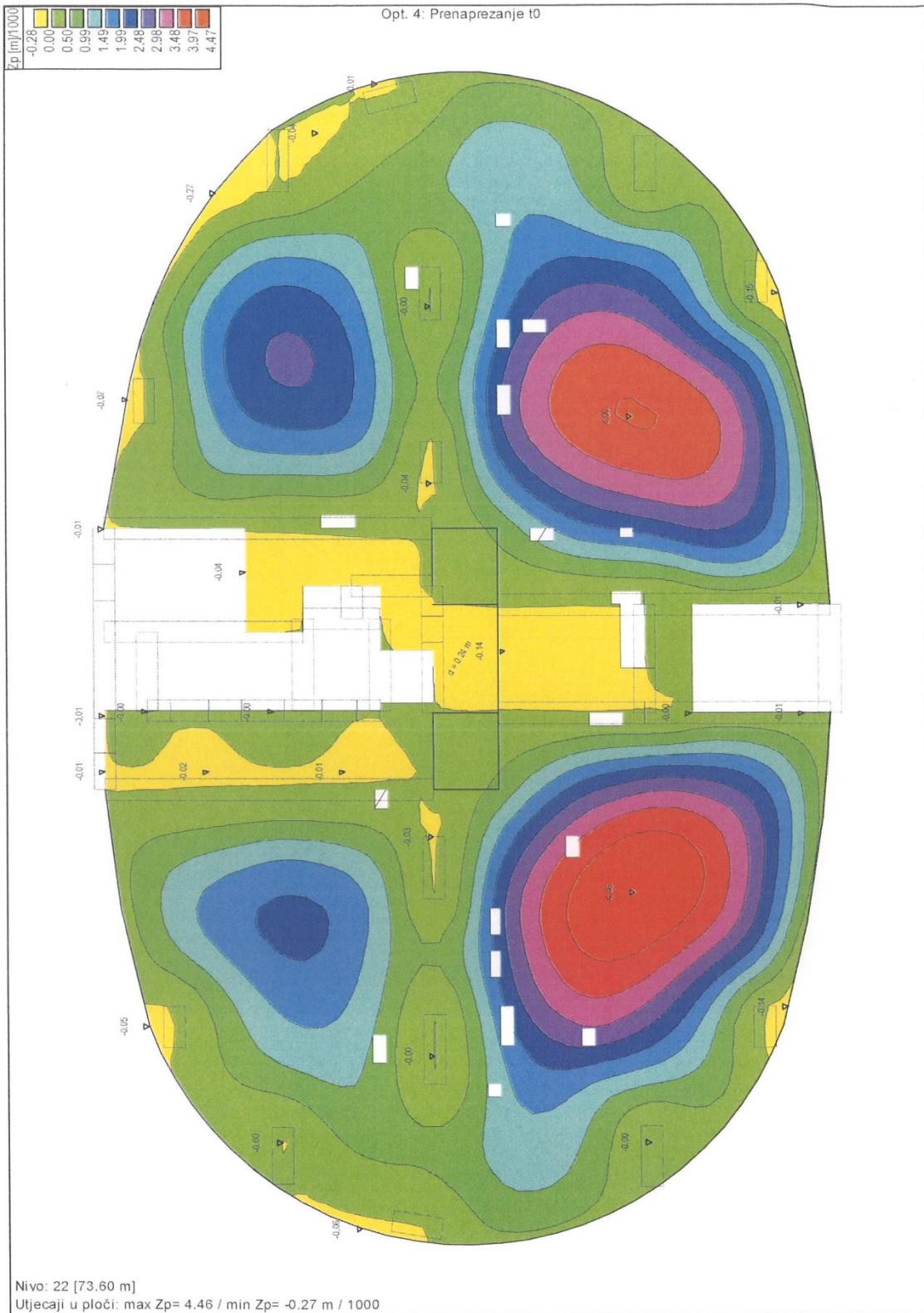
Opt. 4: Prenaprezanje t0



Slika 5.1 Model ploče s linijama kabela i iznosima sila prednapinjanja (Izvor: [14])

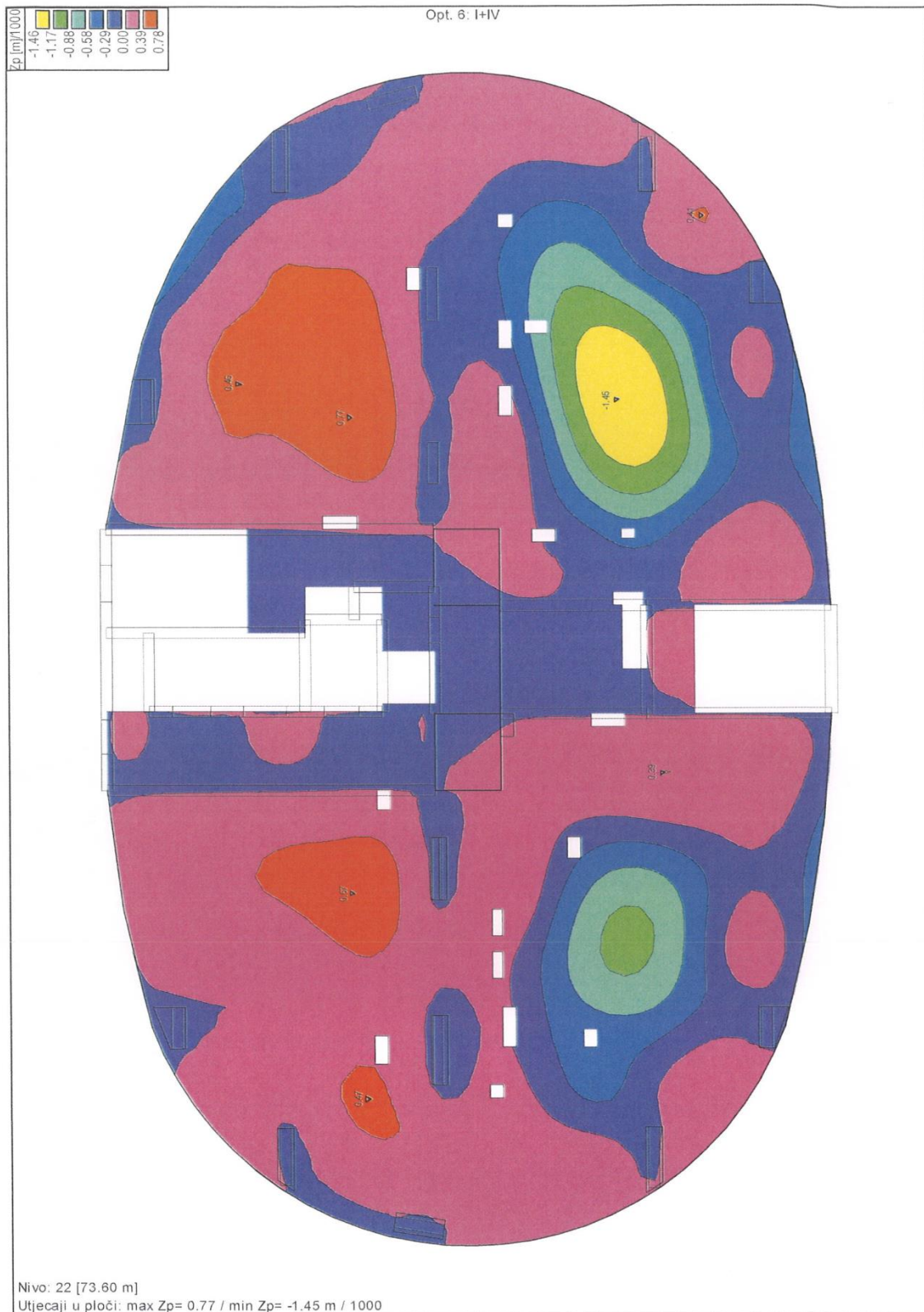


Slika 5.2 Izolinije elastičnog progiba ploče od vlastite težine (max  $z = -5,4$  mm) (Izvor: [14])

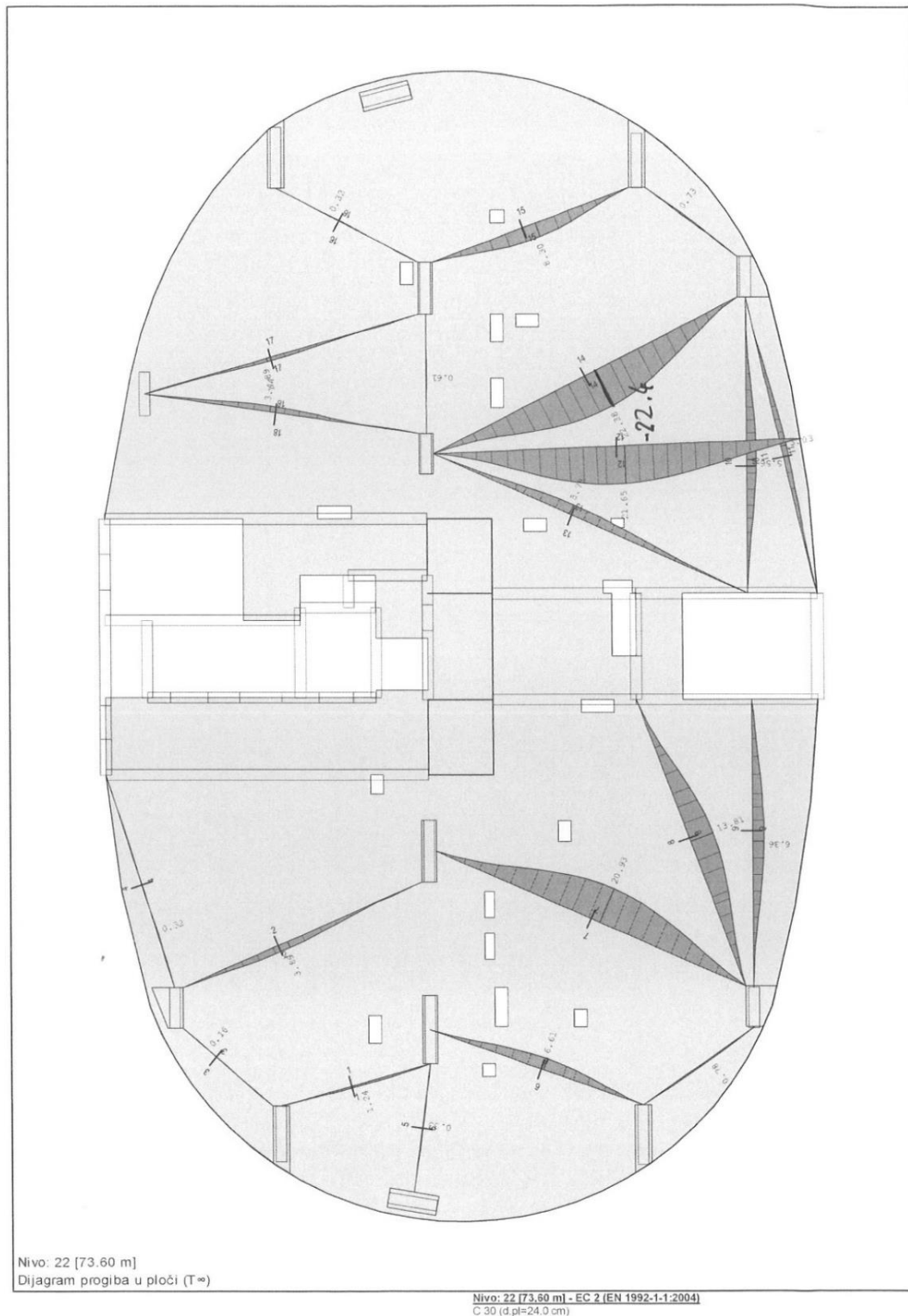


Slika 5.3 Izolinije elastičnog progiba ploče od prednapinjanja (max z = +4,5 mm) (Izvor: [14])





Slika 5.4 Superponirana vlastita težina i prednapon ( $t=0$ ), pokazuje balansirane "ispeglane" progibe na  $\pm 1,5$  mm (Izvor: [14])



Slika 5.5 Konačni vremenski progibi PT ploče, maksimalno 23 mm (Izvor: [14])

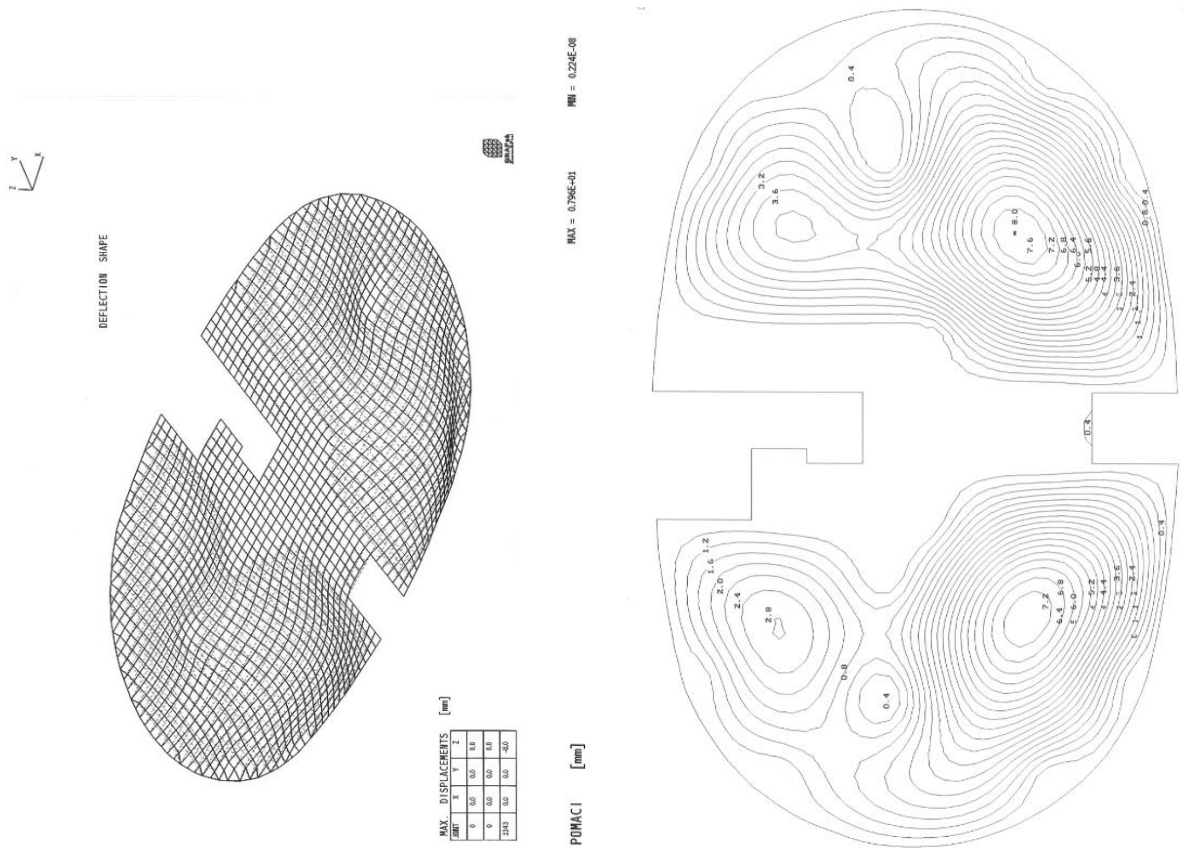
Slijedi izvadak iz statičke analize klasične ploče, debljine 28 cm u programu GRAFeM.

## **6. ANALIZA VARIJANTE ARMIRANOBETONSKE (NENAPETE) STROPNE PLOČE**

Izvadak iz statičke analize za klasičnu AB (nenapetu) ploču debljine 28 cm, prikazuje model ploče tipske etaže u varijantnom rješenju klasične AB (nenapete) ploče debljine 28 centimetara (slika 6.1) i elastične deformacije za maksimalno vertikalno opterećenje (slika 6.2). Pri tom, procijenjeni konačni vremenski progib vrijednost je umnoška elastičnog progiba za maksimalno vertikalno opterećenje i faktora povećanja iznosa 3,5.



Slika 6.1 Model ploče tipske etaže u varijantnom rješenju klasične ploče debljine 28,0 cm (program GRAFeM) (Izvor: [14])

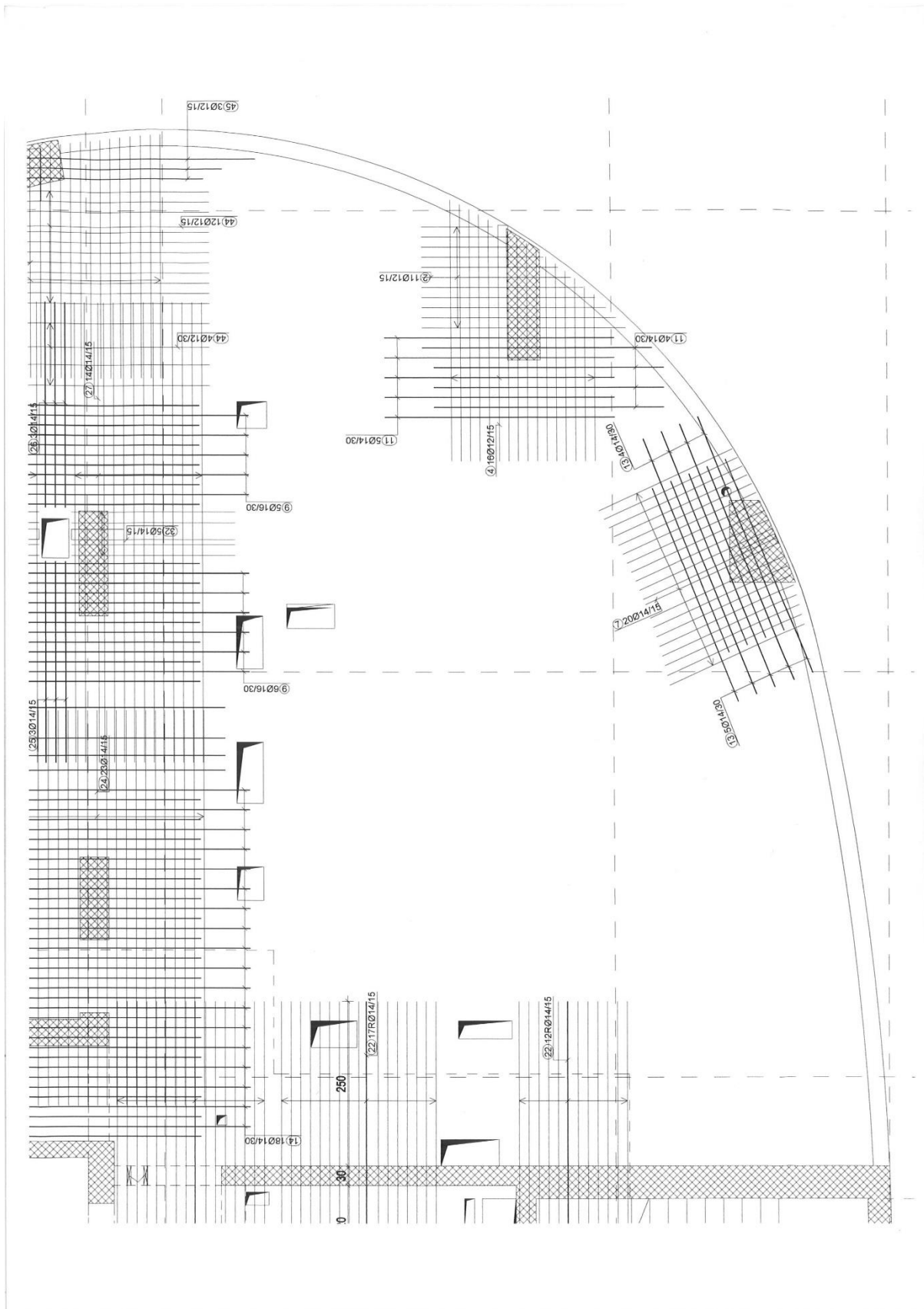


Slika 6.2 Elastične deformacije za maksimalno vertikalno opterećenje, max z = -8,0 mm  
(Izvor: [14])

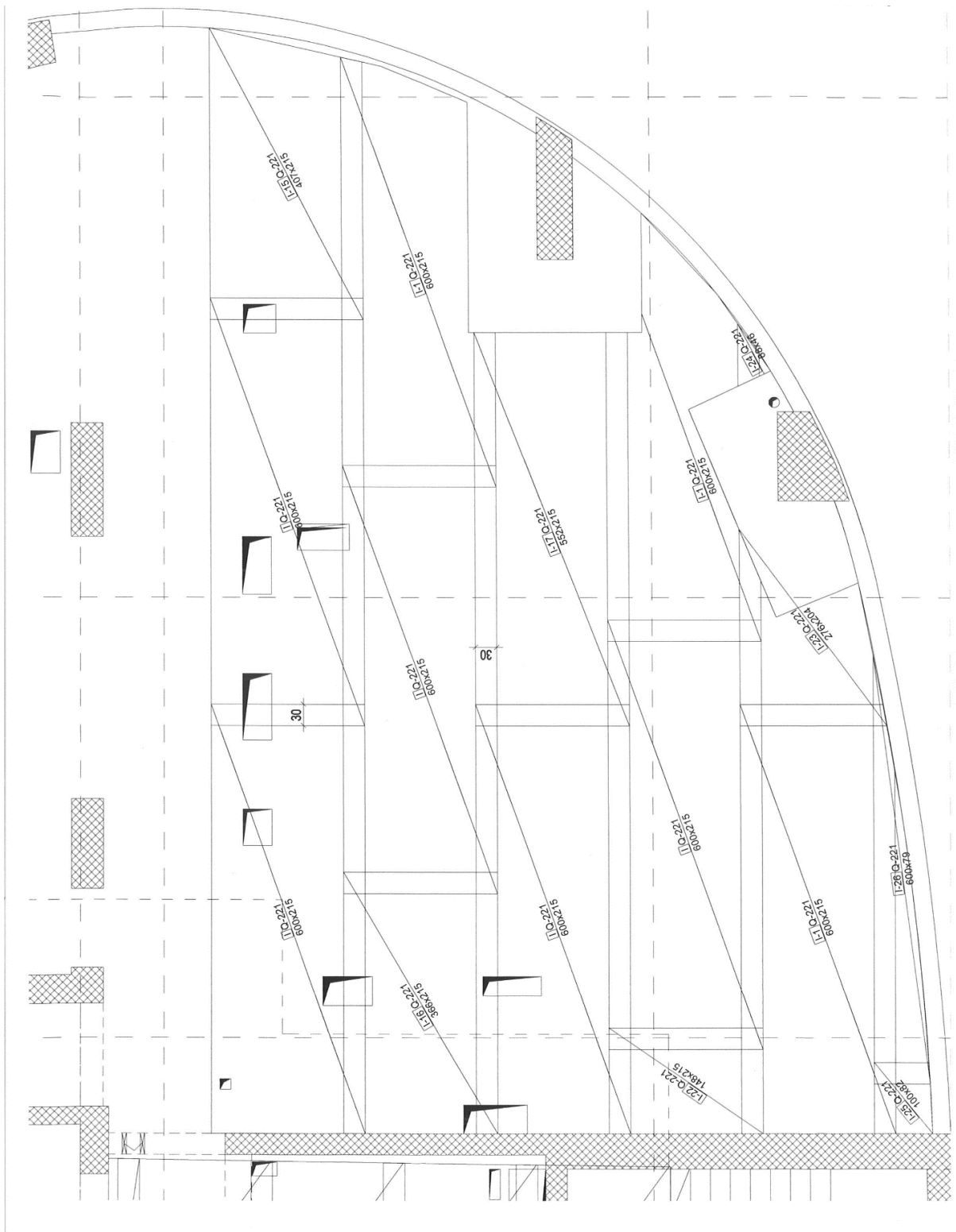
U nastavku slijede armaturni nacrti segmenta PT ploče.

## **7. USPOREDBA ANALIZIRANIH VARIJANTI SUSTAVA STROPNIH PLOČA**

Armaturnim nacrtima prikazani su segmenti PT ploče i to gornje zone armature sa šipkama (slika 7.1) i mrežom (slika 7.2), donje zone s mrežom (slika 7.3) te nacrt armature oko rubova i otvora u pločama (slika 7.4). Nacrti su, kao i prethodni, izvadci iz statičke analize PT ploče, napravljeni programom Tower.



Slika 7.1 Gornja zona armature (šipke) (Izvor: [14])



Slika 7.2 Gornja zona armature (mreže) (Izvor: [14])



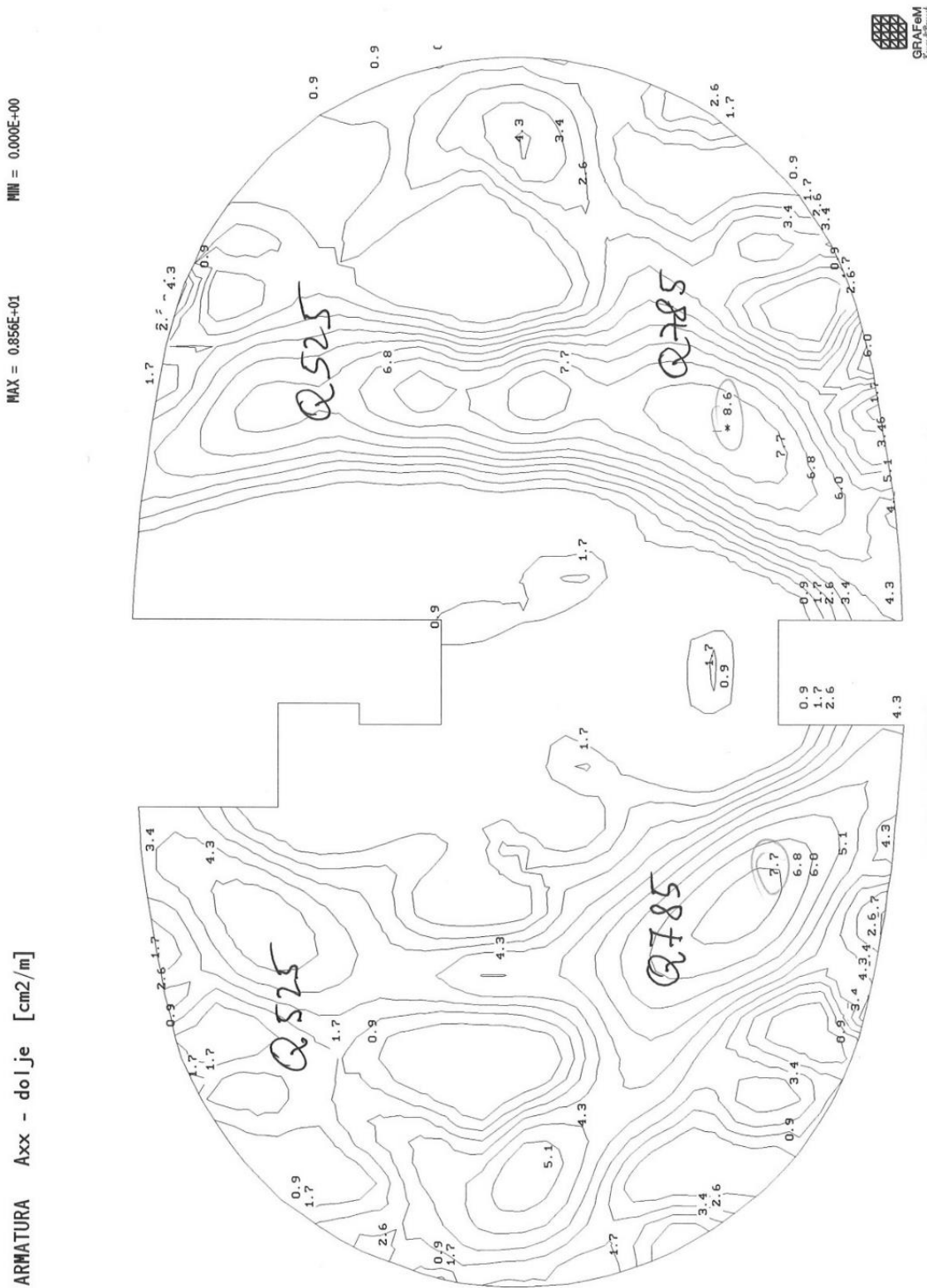




Slika 7.4 Armatura oko rubova i otvora u pločama (Izvor: [14])

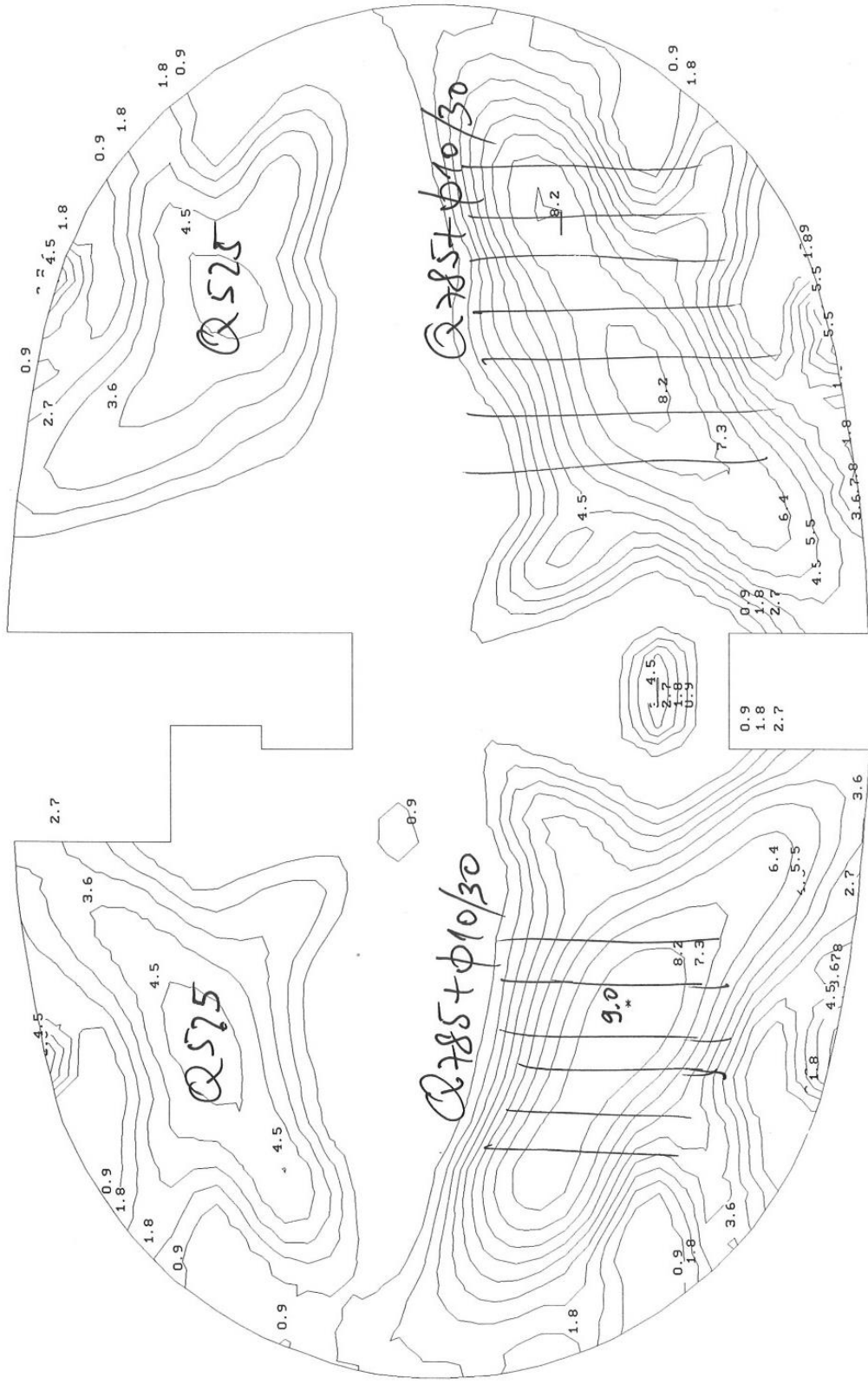
U konačnici, slijedi prikaz izolinija površine armature iz klasične ploče.

Prije same usporedbe i izvođenja zaključka prikazuju se izolocije površine armature iz klasične ploče programom GRAFeM, i to izolocije armature u x i y smjeru donje zone (slika 7.5 i slika 7.6) te izolocije armature u x i y smjeru gornje zone (slika 7.7 i slika 7.8).



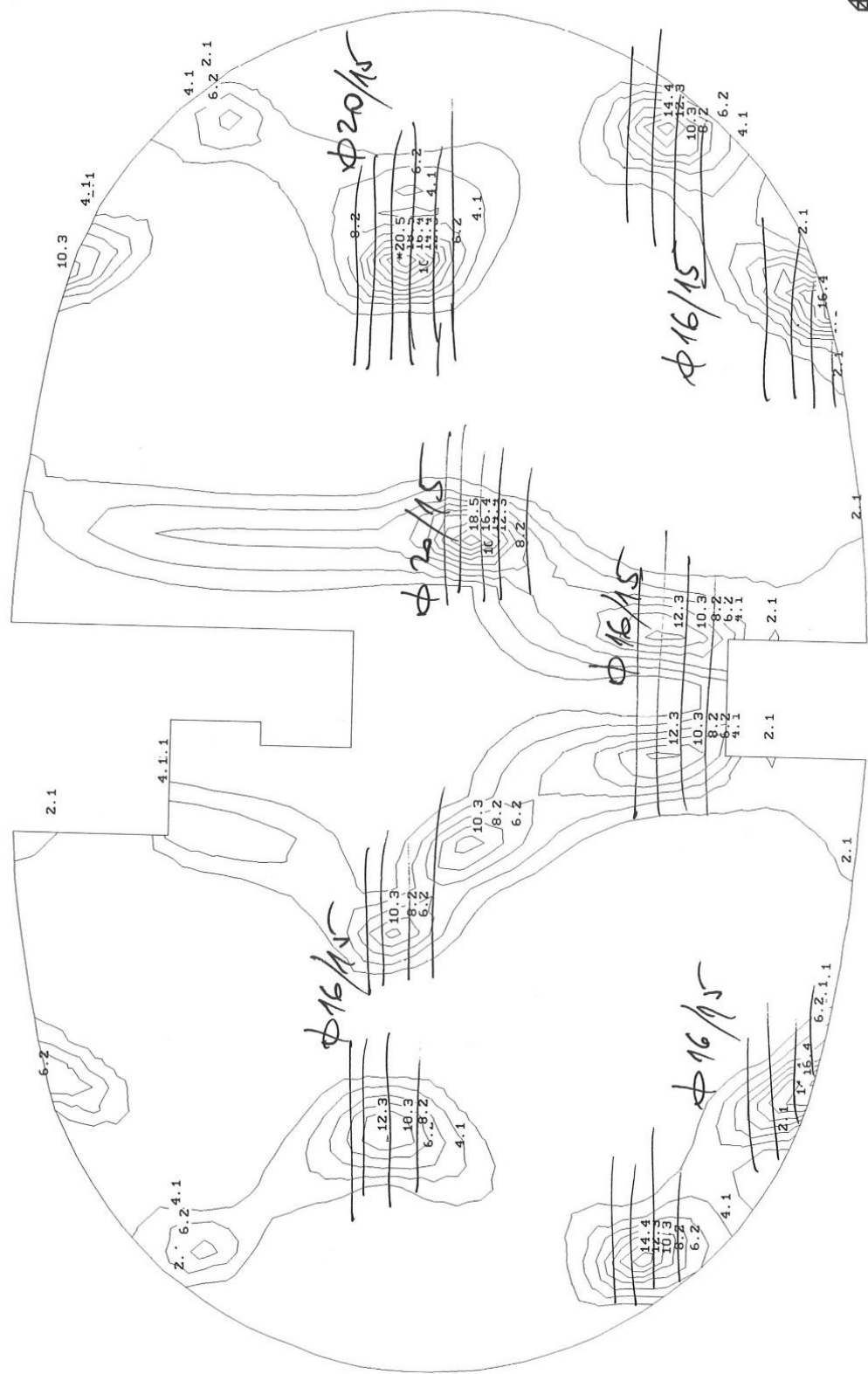
Slika 7.5 Izolocija armature x smjer donje zone (Izvor: [14])

ARMATURA Ayy - dolje [cm<sup>2</sup>/m] MAX = 0.909E+01 MIN = 0.000E+00



Slika 7.6 Izolinija armature y smjer donje zone (Izvor: [14])

ARMATURA Axx - gore [cm<sup>2</sup>/m] MAX = 0.205E+02 MIN = 0.000E+00

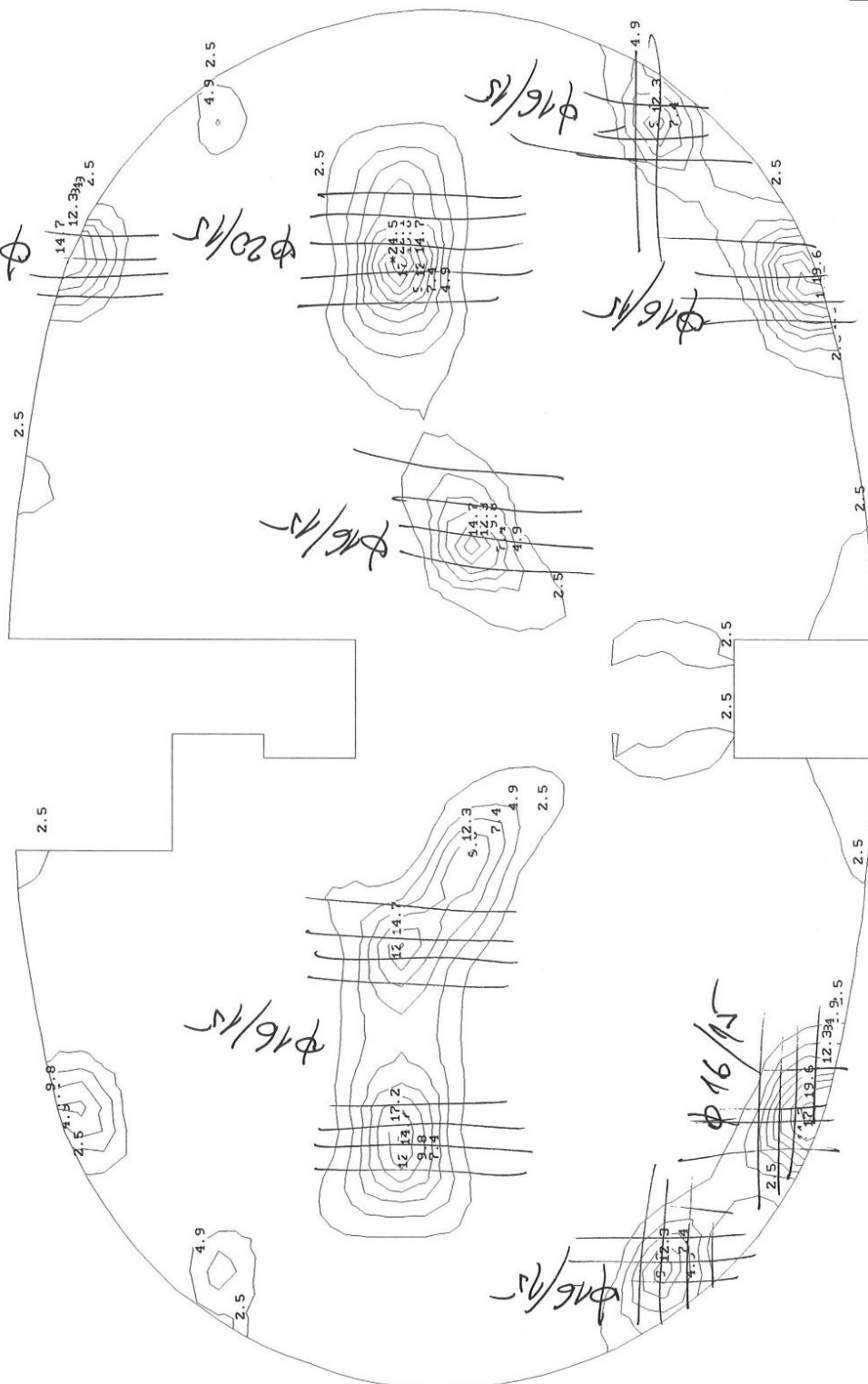


Slika 7.7 Izolinija armature x smjer gornje zone (Izvor: [14])

MIN = 0.000E+00

MAX = 0.245E+02

ARMATURA Ayy - gore [cm<sup>2</sup>/m]



Slika 7.8 Izolinija armature y smjer gornje zone (Izvor: [14])

Temeljem navedenog kroz rad, kao i prethodnih prikaza, izvode se zaključci predmetne analize dvije varijante sustava stropnih ploča nebodera B kompleksa Skyline u Beogradu. Usporedno su analizirane količine materijala – armatura, kabeli i beton PT ploče i klasične AB (nenapete) stropne ploče. Prije završne analize, tabličnim prikazom (tablica 7.1) usporedno se navodi količinski utrošak navedenog materijala potrebnog za izvedbu stropne ploče.

Tablica 7.1 Usporedba količina materijala PT ploče i klasične AB (nenapete) stropne ploče [Izvor: djelo autora]

MATERIJAL	PT ploča	AB (nenapeta) ploča [klasična ploča]
ARMATURA	21,6 kg/m <sup>2</sup>	36,7 kg/m <sup>2</sup>
KABELI	5,4 kg/m <sup>2</sup>	(bez kabela)
BETON (debljina ploče u cm)	24 cm	28 cm

Cijena betona, projektom određenog razreda C 30/ 37, određena je kao odabir najpovoljnije ponude u datom trenutku građenja. S obzirom na oscilacije cijena u periodu izvođenja radova (ožujak 2022. – travanj 2023.) kao posljedica rasta inflacije općenito u Europi, a prema Republičkom zavodu za statistiku Republike Srbije (dalje u tekstu RZS) ista je varirala, no u konačnici vrijednost betona, dobavljanog od lokalnog proizvodnog pogona iznosila je 130,00 eura/m<sup>3</sup> [20]. Prema projektnoj dokumentaciji, ugrađena je armatura klase B500B, uključujući armaturne mreže i rebraste šipke, proračunata prema planu armature, odnosno statičkom proračunu. Temeljem provedene analize, iskazi armaturnih nacrti rezultirali su količinom od 21,6 kg/m<sup>2</sup> armature klase B500B za PT ploču, dok je količina armature temeljem izolacija klasične AB (nenapete) stropne ploče procijenjena na 36,7 kg/m<sup>2</sup>. Rezultati ukazuju na količinsku uštedu armature pri izvođenju PT ploče u odnosu na utrošak armature kod klasične AB (nenapete) stropne ploče. To u konačnici rezultira i manjim ukupnim financijskim troškom građenja stropne konstrukcije. Nadalje, predmetnom analizom definirala se i količina kabela potrebnih za izvedbu PT ploče. Temeljem provedenih rezultata, količina kabela korištena pri izvedbi PT ploče iznosila je 5,4 kg/m<sup>2</sup>. Referirajući se na cijenu ugrađenih kabela i uzimajući u obzir informacije dobivene na gradilištu od strane projektanta, cijena ugrađenih kabela tri puta je skuplja u odnosu na cijenu ugrađene armature. Iz toga proizlazi podatak o 37,8 kg/m<sup>2</sup> ugrađene armature i matematički se prikazuje sljedećim izrazom:

$$\text{PT ploča:} \quad 21,6 + 3,0 \times 5,4 = 37,8 \text{ kg/m}^2 \quad (7.1)$$

Usporedno, za klasičnu AB (nenapetu) ploču (bez kabela) dobiveni su rezultati o utrošku 36,7 kg/m<sup>2</sup> armature što se također prikazuje izrazom u nastavku:

$$\text{AB (nenapeta) ploča} \quad (\text{bez kabela}) \quad = 36,7 \text{ kg/m}^2 \quad (7.2.)$$

Time se zaključuje da je količina potrebne količine betona za izvedbu ploča veća kod klasične AB (nenapete) ploče nego kod PT ploče. Cijena ove razlike u korist PT ploče iznosi 5,2 €/m<sup>2</sup> izgrađene ploče, dobiveno iz umnoška razlike u debljini ploče i cijene koštanja kubika betona (0,04 m x 130,0 €/m<sup>3</sup> = 5,2 €/m<sup>2</sup>) u trenutku građenja, a nabavljenog od i po cijeni lokalnog dobavljača kako je već prethodno navedeno. Sumirajući dobivene količine i uzimajući u obzir cijenu armature koja je u datom trenutku kao i cijena betona poprilično oscilirala (podaci prema RZS-u), u pogledu kabela i armature zaključuje se kako klasična AB (nenapeta) ploča ima manju cijenu ekvivalentu 1,1 kg/m<sup>2</sup> (37,8 kg/m<sup>2</sup> – 36,7 kg/m<sup>2</sup>), odnosno 1,65 €/m<sup>2</sup> (1,1 kg/m<sup>2</sup> x 1,50 €/kg). Vrijednost armature od 1,50 €/kg, uzeta je kao odabir najpovoljnije ponude za nabavu, isporuku i ugradnju armature u trenutku građenja od lokalnog dobavljača [21].

Iz navedenih podataka, količine materijala i cijena, kao i cjelokupne analize predmetne građevine, proizlazi veća isplativost izvedbe ploče u PT varijanti u odnosu na klasičnu AB (nenapetu) stropnu ploču što se sumira u zaključku ovoga rada.



## 8. ZAKLJUČAK

Primjenom tehnologije naknadnog prednapinjanja na stropnim pločama rješavaju se brojne problematike složenih konstrukcija ploča velikih raspona uz dokazanu pouzdanost i trajnost. Naknadno prednapinjanje noviji je vid gradnje koji građenje građevina čini i ekonomski i vremenski isplativijim na većim rasponima. Analizirajući predmetnu građevinu, neboder B kompleksa Skyline, izvode se određeni zaključci na strani tehnologije naknadnog prednapinjanja. Uspoređujući cijenu materijala, i to armature, betona i kabela, provedenom analizom kao isplativija varijanta pokazalo se građenje u varijanti prednapinjanja. Rezultati su pokazali da je cijena PT ploče, u pogledu armature i kabela 1,65 €/m<sup>2</sup> skuplja, ali je u pogledu betona 5,20 €/m<sup>2</sup> jeftinija. U konačnici, cijena materijala ide u korist građenja PT ploče za iznos od 3,55 €/m<sup>2</sup> (5,20 €/m<sup>2</sup> – 1,65 €/m<sup>2</sup>).

Također, uzimajući u obzir danas aktualnu tematiku ukupne emisije stakleničkih plinova, odnosno ugljični otisak i njegov štetni utjecaj u pogledu proizvodnje čelika za izvedbu ploče, PT ploče rezultiraju količinama čelika od 21,6 kg/m<sup>2</sup> armature i 5,4 kg/m<sup>2</sup> kabela bez plastične cijevi. Uzimajući u obzir jedinične vrijednosti za CO<sub>2</sub> emisije za čelik za armiranje i čelik za prednapinjanje od 3500 kg CO<sub>2</sub>/toni odnosno 4333 kg CO<sub>2</sub>/toni emisije vezane za čelik u slučaju PT ploče su oko 20 % niže u odnosu na AB nenapetu ploču u razmatranom primjeru [23]. Prethodno korišteni podaci su iz studije koja se odnosi na Južnu Koreju i ovdje su korišteni samo za grubu usporedbu, budući da potječu iz istog izvora i korištene su i u navedenom istraživanju za usporedbu varijanti na nekim konstrukcijskim elementima. Stvarne vrijednosti svih pokazatelja utjecaja na okoliš, ne samo emisije CO<sub>2</sub>, trebalo bi proračunati sukladno metodologiji međunarodnih ISO normi usvojenih i u Republici Hrvatskoj, ali i ovisno o uvjetima koji su vezani za lokaciju i druge karakteristike pojedinačnog gradilišta. Ako se na u ovom primjeru dobivene količine čelika za armiranje i čelika za prednapinjanje primjene vrijednosti dobivene uvidom u izjave o utjecaju proizvoda na okoliš u bazi podataka ÖKOBAUDAT prema kojoj GWT-total za faze A1-A3 tj. ukupni globalni potencijal zagrijavanja samo za fazu proizvodnje proizvoda iznosi 615,4 kg CO<sub>2</sub>/toni za čelik za armiranje [24], odnosno 2913 kg CO<sub>2</sub>/toni za čelik za prednapinjanje [25], prednost u pogledu tog pokazatelja za samo navedene faze će biti na strani klasične nenapete varijante. Značajan utjecaj je preostalih faza, što uključuje i potencijal recikliranja. Pokazatelji koji se odnose na beton su na strani varijante PT ploče, budući se koristi manja količina betona, a tome bi trebalo pridodati i manje količine dijela konstrukcije na koji je ploča oslonjena budući da su i njihove

dimenzije manje zbog manje težine ploče. Shodno navedenom, s ciljem konkretnijeg iskoraka prema održivijoj građevinskoj industriji, potrebna je transparentnost proizvoda i to povećanjem svijesti kao i pozitivnog utjecaja na okoliš. Izjavama o utjecaju na okoliš (engl. *Environmental Products Declaration = EPD*) (dalje u tekstu EPD) promiče se razvoj navedenog. EPD, u konkretnom primjeru, ali i općenito, omogućavaju izračun utjecaja na okoliš, odnosno razmatranje smanjenja CO<sub>2</sub> otiska odabirom najodrživijeg rješenja. Ono što EPD sadrže jesu sveobuhvatne informacije o utjecaju proizvoda na okoliš, uključujući pojedinosti o potrošnji sirovina, nastajanju otpada i ispuštanju štetnih emisija u zrak ili tlo tijekom životnog ciklusa proizvoda. Uobičajene kategorije utjecaja uključuju potencijal globalnog zatopljenja, potencijal oštećenja ozona, potencijal acidifikacije (zakiseljavanja), potencijal eutrofikacije, te potencijal stvaranja smoga i korištenja primarne energije [26]. Pri tom, slijedi se utvrđena metodologija kroz ISO standarde temeljem izračuna procjene životnog ciklusa proizvoda. U konačnici, može se reći kako EPD pridonose većoj transparentnosti i kakvoći proizvoda građevinskog sektora, omogućavajući usporedbu čime je moguće utjecati na CO<sub>2</sub> otisak zgrada i projekata odabirom adekvatnog odnosno najodrživijeg rješenja.

Izvedbom PT ploča, ujedno se pozitivno utječe i na indirektno troškove. Iako isti nisu predmet ove analize, ističu se pri građenju ploča i to kroz brže vrijeme građenja, manje seizmičke i vertikalne sile koje rezultiraju manjom armaturom u vertikalnim elementima i temeljima zbog lakše konstrukcije te manjim seizmičkim silama generiranim manjom masom konstrukcije. Tehničko-ekonomskim aspektom istaknute su prednosti građenja PT stropnih ploča u odnosu na klasične ploče što se ponajprije ogleda kroz smanjenje količine i cijene materijala, kao i brže građenje.

## LITERATURA

- [1] P. Presečki: Tehnologija naknadnog prednaprezanja monolitnih stropnih ploča, seminarska naloga, Fakultet za gradbeništvo v Mariboru, Maribor, 2016.
- [2] A. Harapin, J. Radnić, N. Grgić, M. Smilović Zulim, M. Sunara, A. Buzov: Osnove betonskih konstrukcija: interna skripta, Fakultet građevinarstva, geodezije i arhitekture Split, Split, 2020.,  
<https://repozitorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A1749/datastream/FILE0/view>,  
dostupno 5. 1. 2024.
- [3] K. Tarnik: Tehnologija stropnih ploča na primjeru građevine „Max Stoja“ u Puli, HKIG, Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva, Opatija, 2020.,  
[https://www.hkig.hr/docs/Opatija\\_2020/prezentacije/Betonske%20konstrukcije/Tehnologija%20stropnih%20ploca%20na%20primjeru%20građevine%20Max%20Stoja%20u%20Puli.pdf](https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2020/prezentacije/Betonske%20konstrukcije/Tehnologija%20stropnih%20ploca%20na%20primjeru%20građevine%20Max%20Stoja%20u%20Puli.pdf),  
dostupno 8. 1. 2024.
- [4] P. Presečki: Naknadno prednapregnute stropne ploče velikih raspona (pozvano predavanje), SFERA 2024, Regionalna konferencija i sajam – Tehnologija betona, Sarajevo, 2024. (prezentaciju predavanja ustupio P. Presečki)
- [5] BBR Adria, <https://www.bbrnetwork.com/technologies/post-tensioning/>, dostupno 5. 1.2024.
- [6] P. Presečki: Naknadno prednapinjanje stropnih ploča, BBR Adria , Zagreb, 2023.
- [7] VSL International, <https://vsl.com/home/technologies/post-tensioning-systems/>, dostupno 6. 1. 2024.
- [8] DYWIDAG, Post tensioning <https://dywidag.com/post-tensioning>, dostupno 5. 1.2024.
- [9] P. Presečki, B. Bošnjak, P. Milić: Thickness reduction of post-tensioned slabs due to punching shear criterion, The 9<sup>th</sup> International Conference "Civil engineering – Science and Practice" GNP 2024 Proceedings, University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, rjeKolašin, 2024., str. 527.-534.
- [10] M. Wicke, K. Maier: Die freie Spanngliedlage, Bauingenieur, Beton- und Stahlbetonbau, Innsbruck, 1998.
- [11] P. Presečki, Ž. Bodiřoga: Naknadno prednapregnute konzolne ploče velikih raspona (pozvano predavanje), konferencija “Savremena građevinska praksa”, Ruma, 2023. (prezentaciju predavanja ustupio P. Presečki)
- [12] A. Vlašić, G. Puž, D. Skokandić: Skripta iz kolegija Visoke građevine, Građevinski fakultet Zagreb, Zagreb, 2018.,

[https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Visoke\\_gradjevine\\_-\\_skripta\\_predavanja\\_i\\_vjezbi%5B1%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Visoke_gradjevine_-_skripta_predavanja_i_vjezbi%5B1%5D.pdf), dostupno 7. 1. 2024.

[13] Skyline Belgrade, <http://www.belgradeskyline.rs/>, dostupno 30. 5.2024.

[14] D. Buha, P. Presečki: Izvadak iz projekta poslovno stambenog kompleksa Skyline Belgrade – izdvojeni nacrti, sheme i fotodokumentacija, AFI Europe Belgrade, Beograd, 2021.

[15] M. Kovač, P. Presečki: GRAFeM – program za statičku i dinamičku analizu konstrukcija metodom konačnih elemenata, Zagreb, 1994.

[16] HRN ENV 1992-1-1:2013, EUROKOD 2: Projektiranje betonskih konstrukcija –1.1 dio: Opća pravila i pravila za zgrade, Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2013.

[17] European Technical Assessment ETA – 06/0165 of 8. 6.2018, [https://www.bbrnetwork.com/fileadmin/userdaten/Zulassungen%20EU/CONA%20CMM%20mono/BBR\\_ETA-06-0165\\_CMM\\_EN\\_Rev6\\_1023.pdf](https://www.bbrnetwork.com/fileadmin/userdaten/Zulassungen%20EU/CONA%20CMM%20mono/BBR_ETA-06-0165_CMM_EN_Rev6_1023.pdf), dostupno 10. 7.2024.

[18] nkHRN EN 10138-1, Čelici za prednapinjanje - 1. dio: Opći zahtjevi (FprEN 10138-1), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, 2010.

[19] B. O. Aalami. POST-TENSIONING Concepts; Design; Construction, PTStructures 2022, San Francisco, 2022

[20] GP BETONSKA BAZA, Beograd, <https://betonskabaza.com/>, dostupno 12. 7.2024

[21] ARMING, Beograd, <https://arming.rs/armatura/>, dostupno 12. 7.2024.

[22] BBR Adria, <http://www.bbr-adria.com/index.php?id=205&L=0>, dostupno 22. 8.2024

[23] MDPI Journal List <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/10600>, dostupno 22. 8.2024

[24] ÖEKOBAUDAT,

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de), dostupno 22. 8.2024

[25] ÖEKOBAUDAT,

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=231073e3-f6ab-44e1-8117-0d38b9c2e526&version=00.06.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=231073e3-f6ab-44e1-8117-0d38b9c2e526&version=00.06.000&stock=OBD_2023_I&lang=de), dostupno 22. 8.2024

[26] Sustainable Facilities Tools, <https://sftool.gov/plan/402/environmental-product-declarations-epds#:~:text=An%20EPD%20reports%20a%20specific,potential%2C%20and%20primary%20energy%20use>, dostupno 22. 8.2024.

## Popis slika i tablica

### 1) SLIKE

Slika 2.1 Smjerovi skretnih sila za parabolično vođenje kabela – ploča oslonjena na stupove, (Izvor:[3]).....	12
Slika 2.2 Hidraulična preša (crvena markacija pokazuje duljinu izduženja kabela) (Izvor: [5]) .....	13
Slika 2.3 Prikaz „bonded“ kabela za naknadno prednapinjanje (Izvor: [7]).....	14
Slika 2.4 Prikaz „unbonded“ kabela za naknadno prednapinjanje (Izvor: [4]).....	15
Slika 2.5 „Unbonded“ tehnologija – kabeli od visokovrijednog čelika (usidrenje i presjek kroz kabel) (Izvor: [4]).....	17
Slika 2.6 Rezanje kabela i montiranje pasivnih usidrenja (Izvor: [3]) .....	17
Slika 2.7 Aktivna usidrenja – primjer na izgradnji dvorane u sklopu hotela Solaris u Šibeniku (Izvor: [4]).....	18
Slika 2.8 Pasivna usidrenja kabela – primjer na dogradnji hotela Punta na Malom Lošinj (Izvor: [8]).....	19
Slika 2.9 Slobodno vođenje kabela (Izvor: [4]) .....	20
Slika 2.10 Polaganje kabela (slobodno vođenje) – plitka, široka greda (slika prije postavljanja gornje zone armature grede) (Izvor: [3]) .....	21
Slika 2.11 Princip slobodnog vođenja kabela i skretne sile u kabelu – shematski prikaz (Izvor: [9]).....	22
Slika 2.12 Grupiranje kabela koji sudjeluju u smanjenju probojne sile (Izvor: [9]).....	22
Slika 2.13 CONA CMI – kružna ploča, plastična cijev (Izvor: [5]) .....	24
Slika 2.14 CONA CME SP – kvadratna prijenosna ploča, plastična cijev (Izvor: [5]) .....	25
Slika 2.15 CONA CMF BT (prijenosna ploča), „kupler H“ za spajanje (Izvor: [5]) .....	26
Slika 2.16 CONA CMM Single i CONA CMM Two/Four (Izvor: [5]) .....	27
Slika 2.17 CONA CMB (Izvor: [5]) .....	27
Slika 3.1 Neboder B kompleksa Skyline (pozicioniran desno i istaknut/markiran svijetlije oznakom B) (Izvor: [13]) .....	30
Slika 3.2 Tlocrt etaže nebodera B, ploča debljine 24 cm bez kapitela (Izvor: [14]) .....	31
Slika 3.3 Taktovi betoniranja s radnim prekidom (Izvor: [14]) .....	32
Slika 3.4 Neboder C (lijevo) klasična ploča s kapitelima, neboder B (desno) PT ploča konstantne debljine bez kapitela [Izvor: djelo autora] .....	33
Slika 3.5 Kontrola progiba 15. etaže– nacrt (Izvor: [14]).....	35

Slika 3.6 Mjerenje progiba grede [Izvor: djelo autora].....	36
Slika 3.7 Prikaz vertikalnih nosivih elemenata nebodera B .....	38
Slika 3.8 Ispitivanje visokovrijednog čelika u laboratoriju – radni dijagram (do sloma) (Izvor: [14]).....	40
Slika 3.9 Nacrt kabela (Izvor: [14]) .....	42
Slika 3.10 Dio 3. faze ciklusa – postavljanje kabela i usidrenja sustava za prednapinjanje [Izvor: djelo autora] .....	43
Slika 3.11 Izgradnja karakteristične ploče – prikaz dvaju taktova (Izvor: [4]).....	44
Slika 3.12 Izgradnja karakteristične ploče – prikaz 2. takta (Izvor: [4]) .....	45
Slika 3.13 Pogled na kompleks s ulice (Izvor: [4]).....	46
Slika 4.1 PT ploče ojačane plitkim, širokim gredama, za veće raspone (12 – 20 m) (Izvor: [3]) .....	48
Slika 4.2 Plan polaganja kabela tipske etaže (Izvor: [14]).....	49
Slika 5.1 Model ploče s linijama kabela i iznosima sila prednapinjanja (Izvor: [14]) .....	52
Slika 5.2 Izolinije elastičnog progiba ploče od vlastite težine (max z = -5,4 mm) (Izvor: [14]) .....	53
Slika 5.3 Izolinije elastičnog progiba ploče od prednapinjanja (max z = +4,5 mm) (Izvor: [14]) .....	54
Slika 5.4 Superponirana vlastita težina i prednapon (t=0), pokazuje balansirane "ispeglane" progibe na ±1,5 mm (Izvor: [14]) .....	55
Slika 5.5 Konačni vremenski progibi PT ploče, maksimalno 23 mm (Izvor: [14]).....	56
Slika 6.1 Model ploče tipske etaže u varijantnom rješenju klasične ploče debljine 28,0 cm (program GRAFeM) (Izvor: [14]) .....	58
Slika 6.2 Elastične deformacije za maksimalno vertikalno opterećenje, max z = -8,0 mm (Izvor: [14]).....	59
Slika 7.1 Gornja zona armature (šipke) (Izvor: [14]) .....	61
Slika 7.2 Gornja zona armature (mreže) (Izvor: [14]) .....	62
Slika 7.3 Donja zona (mreže) (Izvor: [14]).....	63
Slika 7.4 Armatura oko rubova i otvora u pločama (Izvor: [14]) .....	64
Slika 7.5 Izolinija armature x smjer donje zone (Izvor: [14]).....	65
Slika 7.6 Izolinija armature y smjer donje zone (Izvor: [14]).....	66
Slika 7.7 Izolinija armature x smjer gornje zone (Izvor: [14]) .....	67
Slika 7.8 Izolinija armature y smjer gornje zone (Izvor: [14]).....	68

## 2)      **TABLICE**

Tablica 2.1 Prednosti/karakteristike „unbonded“ tehnologije izvođenja kabela (Izvor: [5])...16	
Tablica 7.1 Usporedba količina materijala PT ploče i klasične AB (nenapete) stropne ploče [Izvor: djelo autora] .....	69

**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, DUNJA BOŽIĆ (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom ANALIZA DVIJE VARIJANTE SUSTAVA STROPNIH PLOČA NA PRIMJERU NEBODERA SKYLINE U BEOGRADU (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

DUNJA BOŽIĆ,  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, DUNJA BOŽIĆ (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom ANALIZA DVIJE VARIJANTE SUSTAVA STROPNIH PLOČA NA PRIMJERU NEBODERA SKYLINE U BEOGRADU (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

DUNJA BOŽIĆ,  
(vlastoručni potpis)