

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Lucija Đurković, Dijana Knežević, Katarina Konjevod, Ivan Kukina, Tea Maleš, Dino
Vidić

**UTJECAJ TEMELJENJA NA XPS-u NA TOPLINSKE GUBITKE I
PONAŠANJE PRI POTRESU ZGRADE GOTOVO NULTE ENERGIJE**

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale i na Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Bojana Milovanovića, dipl. ing. građ. i doc. dr. sc. Josipa Atalića, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Popis oznaka

XPS – ekstrudirani polistiren

ZGOE - zgrada gotovo nulte energije

CO₂ – ugljikov dioksid

T – temperatura

Q- količina topline

q – gustoća toplinskog toka koja se prenosi strujanjem

λ – toplinska provodljivost

R – toplinski otpor

U – koeficijent prolaska topline

Ψ – duljinski koeficijent prolaska topline

H_g – koeficijent prijenosa topline u ravnotežnom stanju

EPS – ekspanzirani polistiren

E – modul elastičnosti

σ – naprezanje

τ – posmično naprezanje

G – modul posmika

E – deformacija

F – sila

$\mu\Delta$ - koeficijent duktilnosti

a_g – projektna vrijednost ubrzanja tla

T₁ – osnovni period oscilacija

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Motivacija i hipoteze rada.....	4
3.	Metodologija istraživanja.....	5
4.	Što je građevinska fizika?	6
5.	Temperatura	8
6.	Toplina	9
6.1.	Količina topline	9
6.2.	Prijenos topline	10
6.3.	Prijenos topline vođenjem	10
6.4.	Prijenos topline strujanjem	10
6.5.	Toplinska provodljivost.....	11
6.6.	Toplinski otpor	12
6.7.	Koeficijent prolaska topline.....	12
6.8.	Toplinski mostovi.....	13
6.8.1.	Proračun toplinskih mostova	14
6.8.2.	Duljinski koeficijent prolaska topline ψ	15
6.8.3.	Karakteriziranje toplinskih mostova s obzirom na površinsku temperaturu u prostoriji	17
6.9.	Način izvedbe toplinskog mosta temeljne ploče	17
6.10.	Prijenos topline preko tla.....	19
6.10.1.	Računanje gubitka topline kroz tlo	19
6.10.2.	Analiza spoja zid-pod	20
7.	Ekstrudirani polistiren (XPS).....	21
7.1.	Karakteristike ekstrudiranog polistirena (XPS-a).....	21
7.2.	Proizvodnja XPS –a.....	23

7.3.	Eksperimentalno određivanje svojstava XPS-a.....	24
7.3.1.	Tlačni test XPS-a	24
7.3.2.	Posmični test XPS-a.....	29
7.4.	Određivanje krutosti XPS-a.....	32
7.4.1.	Vertikalna krutost XPS-a	32
7.4.2.	Posmična krutost XPS-a	34
8.	Potresno djelovanje.....	38
8.1.1.	Skale za mjerenje potresa.....	39
8.1.2.	Seizmičnost.....	39
8.2.	Općenito o duktilnosti	40
8.3.	Faktor ponašanja konstrukcije	42
9.	Elastični i projektni spektri prema EC8	43
9.1.	Metoda spektralne analize	43
9.2.	Projektni spektri.....	44
9.2.1.	Projektni spektri prema Eurocodeu 8.....	45
9.2.2.	Elastični projektni spektri	46
9.2.3.	Projektni spektri ubrzanja	47
10.	Postavke modeliranja potresa	49
10.1.	Princip modeliranja potresno opterećenih konstrukcija	50
10.2.	Metode proračuna	51
10.2.1.	Metoda proračuna bočnih sila.....	52
10.2.2.	Model sustava s jednim stupnjem slobode	54
10.2.3.	Diferencijalna jednadžba sustava s jednim stupnjem slobode.....	55
10.2.4.	Modalni proračun spektralnog odziva	56
10.2.5.	Nelinearni statički proračun.....	58
10.2.6.	Nelinearni dinamički proračun	58
11.	Metoda konačnih elemenata	59

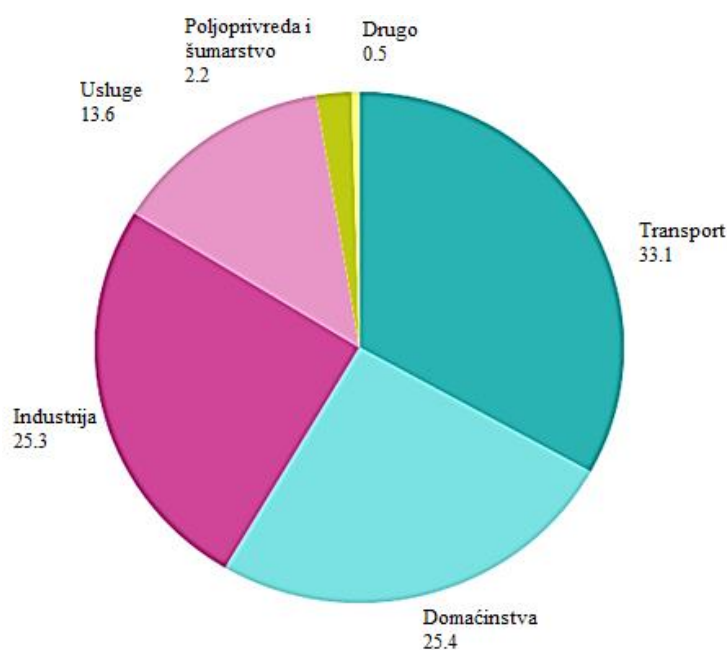
11.1.	Proračun konstrukcije pomoću metode konačnih elementa	59
11.2.	Izbor konačnog elementa.....	59
11.3.	Greške rješavanja metodom konačnih elemenata.....	60
11.3.1.	Greške diskretizacije i greške aproksimacije geometrije.....	60
11.3.2.	Greške povezane s definiranim zakonom ponašanja i greške proračuna...	60
11.4.	Konačni element s četiri stupnja slobode	61
11.4.1.	Nekompatibilni element.....	61
11.4.2.	Kompatibilni element	62
11.5.	Plošni konačni element.....	63
11.5.1.	Pravokutni konačni element.....	63
11.5.2.	Konačni elementi ploče	63
12.	Numerička analiza utjecaja XPS-a na svojstva konstrukcije.....	65
12.1.	Referentni numerički model temeljen na tlu bez sloja XPS-a.....	69
12.2.	Model temeljen na sloju XPS-a iznad sloja tla.....	70
12.3.	Usporedba rezultata numeričkog proračuna referentnog modela i modela na sloju XPS-a.....	70
12.3.1.	Usporedba rezultata za područje Zagreba i temeljnu ploču.....	71
12.3.2.	Usporedba rezultata za područje Zagreba i trakasti temelj.....	74
12.3.3.	Usporedba rezultata za područje Dubrovnika i temeljnu ploču.....	77
12.3.4.	Usporedba rezultata za područje Dubrovnika i trakasti temelj.....	80
12.3.5.	Prikaz modalnih oblika	83
12.4.	Diskusija rezultata numeričkog proračuna	84
13.	Prijenos topline preko tla	90
13.1.	Općenito o Flixu	90
13.2.	Analiza toplinskih mostova	92
13.2.1.	Definiranje slojeva i određivanje rubnih uvjeta.....	92
13.2.2.	Analiza i razrada rezultata	94

14. Zaključak	120
Zahvale.....	122
Popis literature	123
Popis slika.....	125
Popis tablica.....	129
Sažetak.....	131
Summary.....	132
Životopisi.....	133



1. Uvod

Direktivama Europske komisije za energetska učinkovitost 2012. i 2016. godine utvrdili su se ciljevi i mjere za uštedu energije. Velik dio mjera usmjeren je direktno na sektor građevinarstva iz razloga što se za održavanje optimalnih uvjeta u prostorijama boravka ljudi troši mnogo energije. Udio sektora potrošnje energije za potrebe kućanstava prikazan je na slici 1.

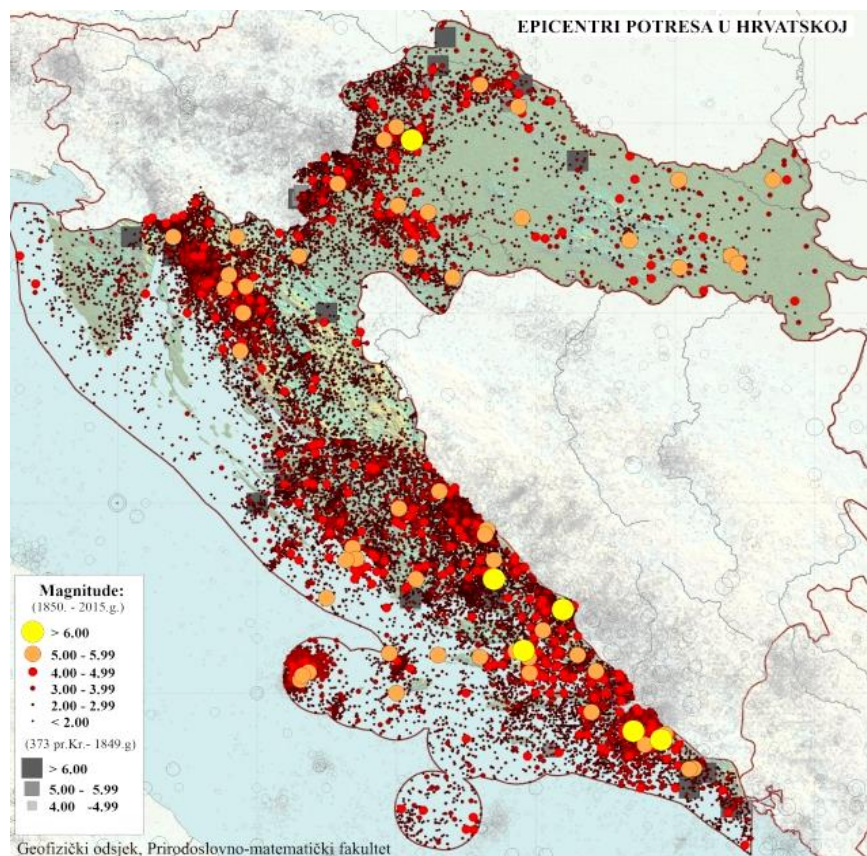


Slika 1. Podjela ukupne potrošnje energije[1]

Dakle, četvrtina ukupne potrošnje energije odlazi na potrebe kućanstva. Ta energija može se uvelike smanjiti pravilnim projektiranjem konstrukcija, odnosno projektiranjem u skladu s načelima održive gradnje. Detaljnije razmatrajući gubitke energije kroz ovojnicu zgrade (ugrađeni dijelovi zgrade koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša [2]), pozornost će se u ovom radu posvetiti gubitcima preko tla, odnosno gubitcima uslijed prolaska energije kroz toplinsku zaštitu temelja. Budući da na gubitke preko tla otpada čak 10% ukupnih toplinskih gubitaka konstrukcije, detaljno će se obraditi toplinska izolacija temelja ekstrudiranim polistirenom (XPS) koja predstavlja najčešći primjer rješavanja takvih detalja. Nažalost, zbog prirode toka energije kroz ovojnicu zgrade dolazi do pojave toplinskih mostova kod kojih je izražen veći protok energije u odnosu na ostale dijelove ovojnice. Kako dolazi do smanjenja otpora toplinskoj propusnosti u odnosu na tipični

presjek konstrukcije, temperatura unutarnje površine pregrade na toplinskom mostu znatno je manja nego na ostaloj površini, čime se povećava opasnost od kondenziranja vodene pare. Ta problematika, u cilju što učinkovitije energetske učinkovitosti zgrade, također će biti obrađivana u sklopu ovog rada.

U razvijenim zemljama Europe (Njemačka, Austrija, itd.) sve je češće prisutno temeljenje zgrada na sloju XPS-a zbog potrebe da se u što većoj mjeri zadovolje kriteriji zgrada gotovo nulte energije, no u većini tih zemalja veći utjecaj potresa nije prisutan. Iz tog razloga u ovom radu proučavati će se, za odabrane konstrukcije i tipove XPS-a, paralelno utjecaj XPS-a na toplinska i seizmička svojstva konstrukcije. To je vrlo zanimljiva tema jer se u Hrvatskoj, za razliku od Njemačke, ne bi smjelo pribjegavati do sada uobičajenoj praksi primjene tehnologije i gotovih rješenja koja nude zemlje bez značajne seizmičke aktivnosti. Takva rješenja potrebno je prvo analizirati u smislu njihove interakcije s konstrukcijom pri dinamičkom opterećenju, što će se provesti u ovome radu.



Slika 2. Epicentri potresa u Hrvatskoj (razdoblje 1850. – 2015.g.)[3]

Sa slike 2. vidljivo je da je velik dio teritorija Republike Hrvatske seizmički aktivan, te je neophodan proračun konstrukcije na potresno djelovanje.

U novije doba, svijest o mogućim posljedicama potresa sve se više podiže. Tomu su razlog mnogobrojni tragični primjeri rušenja konstrukcija, pa čak i cijelih naselja i gradova u samo nekoliko minuta. S druge strane, dimenzioniranje konstrukcija na potres predstavlja značajno veći trošak u odnosu na konstrukciju koja je sposobna podnijeti samo statičko i blago dinamičko opterećenje. Iz tog razloga pribjegava se što jeftinijim rješenjima kako bi se zadovoljili kriteriji nosivosti konstrukcije uslijed potresa. Osim energetske, relativno dobro poznatih toplinskih svojstava XPS-a, dio ovog rada bit će posvećen analizi konstrukcije temeljene na sloju XPS-a pri potresnom djelovanju. Taj fenomen još je uvijek slabo istraženo područje građevinarstva. Odlučeno je testirati karakteristične primjere konstrukcija na potresno djelovanje pomoću numeričkog modela računalnog programa ETABS 2016. Model će biti detaljno razrađen u daljnjem dijelu rada, a sama ideja izrade modela realne konstrukcije temeljene na XPS-u te razmatranje interakcije temeljne ploče i XPS-a bit će izuzetan doprinos znanosti jer je takvih istraživanja vrlo malo u dostupnoj znanstvenoj literaturi, tek pokoji članak u Građevinaru. Iz tog razloga u ovom radu provedena je prethodno spomenuta analiza za dvije lokacije; Zagreb i Dubrovnik, zbog različitih karakteristika tla i seizmičke aktivnosti. Prosječan inženjer ne može se mnogo informirati o tom međudjelovanju konstrukcijskih dijelova koji se u praktičnom projektiranju redovito zanemaruju. Zanemarivanja interakcije temeljne ploče i XPS-a rezultat je neistraženosti ovog područja i relativno kompleksnog numeričkog modela koji bi se tada morao uzeti u obzir.

2. Motivacija i hipoteze rada

Za izradu ovog rada motivirala nas je činjenica da je sve više građevina temeljeno na toplinskoj izolaciji. Naime, prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama gotovo nulte energije propisuju se potrebne vrijednosti prolaska topline i potrošnje energije koje je gotovo nemoguće postići ukoliko građevina nije toplinski izolirana duž temeljne ploče. Iz praktičnih razloga (npr. jednostavno postavljanje termoizolacije, zaštita hidroizolacije od mehaničkih oštećenja te spječavanje nastanka plijesni uslijed kondenzacije) temeljenih na pravilima struke i dugogodišnjeg iskustva, preporuča se termoizolacija temeljne ploče s donje strane odnosno na način da je konstrukcija „polegnuta“ na toplinsko-izolacijski sloj zbog sprječavanja prijenosa topline preko tla te prekida toplinskih mostova.

Zbog svojih izuzetnih svojstava poput vodonepropusnosti, visoke tlačne čvrstoće, niskog koeficijenta toplinske provodljivosti, najčešće korišteni toplinsko izolacijski materijal u tom slučaju je XPS, a njegovi učinci pri prijenosu sila s temeljnog tla na konstrukciju vrlo su malo istraženi i ispitani. Upravo ta činjenica motivira nas da detaljnije proučimo sveobuhvatnost takvog konstrukcijskog sklopa, potkrijepimo ga rezultatima detaljnih numeričkih modela (izrađenih na primjerima realnih konstrukcija) te dobijemo prijeko potrebna znanja o toj temi. Nadalje, uvjereni smo da će inženjerska struka s odobravanjem pozdraviti razjašnjenje ovog problema kojeg izgleda, još uvijek nitko nije detaljno obradio, pogotovo iz pogleda utjecaja XPS-a na toplinski tok, analogno s njegovim utjecajem na potresne sile u konstrukciji, što je, uzimajući u obzir sigurnost i zdravlje ljudi, uz energetske učinkovitost vrlo bitna stavka.

Dakle, vidljivo je da će zgrada temeljena na toplinsko izolacijskom sloju XPS-a biti detaljno obrađena s ciljem da se projektantu pruži uvid u interakciju XPS-a i konstrukcije pri potresu, a investitoru troškovno najpovoljniji model konstrukcije. Gledano s ekonomskog aspekta, to je izuzetno bitna stavka jer građevinarstvo kao jedna od temeljnih grana razvoja društva mora biti isplativo, a „pametnim“ projektiranjem investitori štede novac.

3. Metodologija istraživanja

Kako bi se dobili željeni rezultati i ostvarile hipoteze iz prethodnog poglavlja postavljen je plan istraživanja. On se sastoji najprije od prikupljanja dostupne literature od istraživanom problemu. Kroz taj korak dodatno se uvidjela važnost provedbe ovog istraživanja zbog izuzetno male prisutnosti znanstvenih radova i članova o ovom problemu. Nakon pregleda dostupne literature, donesen je zaključak da je krajnji cilj ovog rada prikazati jasnu analizu interakcije XPS-a i konstrukcije iz aspekta toplinske učinkovitosti i seizmičkog utjecaja XPS-a na konstrukciju. Sljedeći korak odabir je karakteristične konstrukcije, koja mora kroz svoje rezultate dati relativno jasne i relevantne zaključke. Nakon odabira stambene zgrade od 10 katova, pravilnog tlocrta i armiranobetnske konstrukcije, odabrale su se različite vrste XPS-a čiji će se utjecaj pri temeljenju ispitivati. Osim XPS-a, definirani su i ostali varijabilni parametri kako bi se obuhvatio što veći opseg promatranih slučajeva. Nakon definiranih svojstava konstrukcije, XPS-a i parametara koji će se varirati, odabrani su numerički programi (ETABS 2016 i FLIXO) koji će poslužiti kao alat za provedbu ranije navedenih varijacija toplinskih i seizmičkih, odnosno modalnih proračuna. Nadalje slijedi prikupljanje, obrada i evaluacija dobivenih rezultata te analiza istih kako bi se čitaocu dalo na uvid kako određena vrsta XPS-a za određeni slučaj konstrukcije, temeljenja i lokacije utječe na svojstva konstrukcije u toplinskom i seizmičkom pogledu. Donesen je zaključak o prihvatljivosti promatranih načina temeljenja te o važnosti provedbe ovakvih analiza ukoliko se želi racionalno i sigurno projektirati konstrukcije temeljenje na slojevima XPS-a.

4. Što je građevinska fizika?

Građevinska fizika novija je znanstvena disciplina koja proučava fizikalne pojave poput topline, zvuka, vlage, požara na relaciji unutarnji-vanjski prostor te na granicama građevinskog objekta.

Ona pokriva tri potpodručja:

- Higrotermiku: prijenos topline, vlage i zraka kroz materijale, elemente, u samim građevinama te između građevina i vanjskog okoliša
- Građevinsku akustiku: problemi vezani za buku u građevini te između građevine i vanjskog prostora
- Osvjetljenje: problemi vezani uz dnevno svjetlo i umjetno osvjetljenje te njihov utjecaj na potrošnju energije

U posljednje se vrijeme sve češće spominju pojmovi kao što su 'pasivna kuća', 'niskoenergetska zgrada', 'ZG0E', 'zelena kuća'. Navedeni pojmovi zasnivaju se na istom principu, a to je smanjenje stvaranja štetnog otpada, kao i korištenje što manje prirodnih resursa. To su ujedno i osnovni principi održivog razvoja.

Rezultati dosadašnjih ispitivanja pokazuju da se u Europi više od 25% proizvedene energije troši u zgradama (grijanje, hlađenje, uređaji, osvjetljenje), a zgradarstvu se pripisuje i trećina emisija CO₂. U Hrvatskoj više od 80% građevina ne zadovoljava propise iz 1987. Sve navedeno dovodi do potrebe za promjenom u gradnji. [4]

Direktivom EU 2010/31 uvodi se pojam Zgrade gotovo nulte energije. Od 31.12.2018. sve nove zgrade javne uprave moraju biti ZG0E (zgrade gotovo nulte energije), a od 31.12.2020. sve nove zgrade moraju biti ZG0E. [5]

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama („Narodne novine“ broj 128/15), zgrada gotovo nulte energije je zgrada koja ima visoka energetska svojstva, a niska količina energije podmiruje se iz obnovljivih izvora koja se nalazi na samoj zgradi ili u njenoj neposrednoj blizini. Ukupna potrošnja primarne energije u

koju je uključena energija za grijanje, hlađenje, pripremu tople vode te za ventilaciju ne smije prelaziti vrijednosti:

- 30kWh (m²a) kad je srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade > 3°C
- 40kWh (m²a) kad je srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade < 3°C

U već navedenom Tehničkom propisu određene su i najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline koje treba ispuniti pri projektiranju novih i rekonstrukciji postojećih zgrada.

Tablica 1. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenta prolaska topline

Redni broj	Građevni dio	U [W/m ² K]			
		$\Theta_{int,set,H} \geq 18^{\circ}C$		$12^{\circ}C < \Theta_{int,set,H} < 18^{\circ}C$	
		$\Theta_{c,mj,min} \leq 3^{\circ}C$	$\Theta_{c,mj,min} > 3^{\circ}C$	$\Theta_{c,mj,min} \leq 3^{\circ}C$	$\Theta_{c,mj,min} > 3^{\circ}C$
1	Vanjski zidovi, zidovi prema garaži, zidovi prema provjetravanom tavanu	0,30	0,45	0,5	0,60
2	Zidovi prema tlu, podovi na tlu	0,40	0,50	0,65	0,80

5. Temperatura

Temperatura je fizikalna veličina kojom se opisuje stupanj zagrijanosti nekog tijela. Mjeri se termometrom. Celzijeva temperaturna skala dobivena je tako da je ledištu vode proizvoljno propisana vrijednost temperature 0°C , a vrelištu vode 100°C . Termodinamička temperatura T prihvaćena je kao osnovna fizikalna veličina u međunarodnom sustavu mjernih jedinica (Système International d'Unités (SI)).[6] Jedinica je kelvin (K). Termodinamička temperaturna skala definirana je pomoću termodinamičke temperature trojne točke vode koja predstavlja ravnotežu točaka između čvrstog, tekućeg i plinovitog stanja vode. Trojnoj točki dodijeljena je vrijednost $273,16$ (K). [6]

Jedinica kelvin (K) definira se prema izrazu:

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,16 \quad (1)$$

Celzijeva temperatura t može se prikazati izrazom:

$$t = T - T_0 \quad (2)$$

gdje je:

$T_0 = 273,16$ K - vrijednost termodinamičke temperature ledišta vode.[9]

Temperatura je fizikalna veličina koja opisuje stupanj zagrijanosti nekog tijela i proporcionalna je srednjoj kinetičkoj energiji gibanja molekula. Povećanjem srednje brzine kretanja molekula tijela, povećava se njegova temperatura. Gornja granica temperature ne postoji jer brzina kretanja molekula može biti sve veća. U području niskih temperatura postoji jedna krajnja temperaturna točka koja je nazvana apsolutna nula, a nalazi se na $t = -273,15^{\circ}\text{C}$, odnosno $T = 0K$. Apsolutna nula postoji samo u teoriji jer primjenom bilo kojeg postupka nije moguće svesti temperaturu sistema na apsolutnu nulu u konačnom broju pokušaja (3. zakon termodinamike). [7]

6. Toplina

Toplina je energija koja prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature dok se temperature ne izjednače, odnosno do uspostavljanja toplinske ravnoteže. Kinetičko-molekularna teorija može opisati toplinu i njezine pojave pomoću kretanja molekula. Bez obzira na agregatno stanje, sva materija koja nas okružuje sastoji od molekula koje su u neprekidnom, nesređenom gibanju. Molekule čvrstih tijela međusobno nezavisno vibriraju oko nekog položaja ravnoteže. Kod tekućina i plinova molekule se kreću u raznim pravcima te se sudaraju i pri tome mijenjaju smjerove gibanja i brzinu gibanja. Na taj način mijenjaju svoju kinetičku energiju. Toplina nekog tijela jednaka je zbroju kinetičkih energija nesređenog gibanja svih njegovih molekula.

6.1. Količina topline

Toplinska energija koja prelazi s jednog tijela na drugo predstavlja količinu topline Q . Količina topline je fizikalna veličina definirana u međunarodnom sustavu mjernih jedinica (Système International d'Unités (SI)). Jedinica je Joule [J]. [10]

Količina topline računa se prema izrazu:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T [J] \quad (5)$$

gdje je:

m [kg] – masa tijela,

c [J/kgK] – specifični toplinski kapacitet,

ΔT [°C] – promjena temperature. [7]

6.2. Prijenos topline

Uslijed razlike u temperaturama nekog sustava ili između dvaju sustava dolazi do prijenosa topline. Pri tome se prijenos topline vrši s područja više temperature u područje niže temperature.

Postoje tri načina prijenosa topline. To su vođenje (kondukcija), prijelaz strujanjem (konvekcija) i prijelaz zračenjem (radijacija).[8]

6.3. Prijenos topline vođenjem

Kod prijenosa topline vođenjem razlikuje se predaja topline između molekula ovisno o agregatnom stanju. Pomoću kinetičke teorije topline, odnosno zbog kaotičnog gibanja i stalnog sudara molekula, dolazi do vođenja topline kroz plinove na način da brže molekule predaju dio svoje kinetičke energije susjednim sporijim molekulama, a one svojim susjedima i tako dolazi do prenošenja topline kroz plin iz područja više temperature u područje niže temperature. U tekućinama se toplinska energija prenosi djelovanjem elastičnih titranja molekula, a za vođenje topline kroz metale moguć je prijenos topline titranjem rešetki ili elastičnim zvučnim valovima. [6]

6.4. Prijenos topline strujanjem

Prilikom širenja topline konvekcijom potrebna je struja nekog fluida pri čemu fluid prima toplinu na jednom mjestu i odnosi je svojom strujom na neko drugo mjesto. Tu toplinu predaje nekom hladnijem čvrstom tijelu ili se miješa s hladnijim dijelom fluida i njemu predaje toplinu.[6] Postoje prirodna i prisilna konvekcija. Prirodna konvekcija nastaje gibanjem dijela fluida zbog razlika u gustoći nastalih nejednolikom temperaturom. Prisilna konvekcija nastaje kad je struja fluida izazvana nekim mehaničkim uređajem, pumpom ili ventilatorom. Prijenos topline konvekcijom može se prikazati primjerom zagrijavanja prostorije radijatorom pri čemu se toplina prenosi s radijatora po cijeloj prostoriji. Poznato je da topli zrak kreće prema gore dok je hladniji zrak dolje. Na tom principu funkcionira radijator. [6]

Prijenos topline strujanjem računa se prema izrazu:

$$q = h_c \cdot (T_p - T_f)[W] \quad (6)$$

gdje je :

$q [W/m^2]$ – gustoća toplinskog toka koja se prenosi strujanjem,

$T_p [K]$ – temperature plohe uz koju struji fluid,

$T_f [K]$ – temperature fluida dalje od granične plohe,

$h_c [W/m^2]$ – koeficijent konvekcije.[6]

6.5. Toplinska provodljivost

Svojestvo građevnih materijala da provode toplinu naziva se toplinska provodljivost. Toplinska provodljivost je jednaka toplinskom toku kroz materijal sa slojem jedinične debljine 1 m uslijed razlike temperatura materijala na suprotnim stranama sloja od 1 K:

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} [W/mK] \quad (7)$$

gdje je :

$Q [J]$ – količina topline,

$d [m]$ – debljina materijala,

$A [m^2]$ – površina materijala,

$\Delta T [K]$ – razlika temperature,

$t [s]$ – vrijeme prolaza topline.

Količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka 1 m² i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperature 1 K predstavlja toplinsku provodljivost koja se označava sa λ .

Toplinska provodljivost glavni je pokazatelj je li materijal dobar toplinski izolator ili vodič.

Toplinska provodljivost ovisi o :

- temperaturi materijala,
- kemijskom sastavu materijala,
- sadržaju vlage u materijalu,
- volumnoj gustoći materijala. [12]

6.6. Toplinski otpor

Toplinski otpor R je veličina koja karakterizira svojstvo toplinske izolacije građevnog dijela. Veća vrijednost toplinskog otpora čini materijal boljim izolatorom.

Toplinski otpor građevnog dijela jednak je omjeru debljine i toplinske provodljivosti:

$$R = \frac{d}{\lambda} [m^2K/W] \quad (8)$$

gdje je:

d [m] – debljina građevnog dijela,

λ [W/mK] – toplinska provodljivost. [4]

6.7. Koeficijent prolaska topline

Koeficijent prolaska topline U je parameter koji karakterizira prenošenje topline. Jednak je količini topline koja u jedinici vremena prijeđe okomito kroz jedinicu površine građevnog elementa pri jediničnoj razlici temperature zraka s objiju strana elementa.

Što je veća vrijednost U nekog elementa, to će kroz taj element prolaziti veći toplinski tokovi, tj. gubitci topline bit će veći:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_{se}}} [W/m^2K] \quad (9)$$

gdje je:

d [m] – debljina građevnog dijela,

λ [W/mK] – toplinska provodljivost,

h_{si} [m²K/W] – unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline,

h_{se} [m²K/W] – vanjski plošni koeficijent prijelaza topline,

h_{si} – količina topline koja u jedinici vremena prijeđe sa zraka u prostoriju na jedinicu ploštine građevinskog elementa pri jediničnoj razlici temperature zraka i površine elementa,

h_{se} – količina topline koja u jedinici vremena prijeđe s jedinice vanjske ploštine građevinskog elementa na vanjski pri jediničnoj razlici temperature površine elementa i zraka.

6.8. Toplinski mostovi

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj upotrebi energije i toplinskoj zaštiti o zgradama (NN 128/15) toplinski mostovi su: „manja područja u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koji je toplinski tok povećan radi promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela.“ [2] Pojava toplinskih mostova na toplinsko-izolacijskom plaštu zgrade predstavlja veliki problem za udobnost stanovanja, a i uvelike utječe na povećanje toplinskih gubitaka. Da bi se toplinski mostovi kod vrlo dobrih niskoenergetskih konstrukcija što bolje izveli, potrebno je sve pomno isplanirati već u samoj fazi izrade projektne dokumentacije. Veliku pozornost potrebno je također posvetiti i nadzoru njihove izvedbe. [10]

Prema obliku toplinski mostovi mogu biti:

- a) Linijski toplinski mostovi
- b) Točkasti toplinski mostovi

Toplinski mostovi prema područjima zgrade na kojima djeluju:

- a) Geometrijski toplinski mostovi

Javljaju se na mjestima promjene geometrije građevinskog elementa, na kutovima i uglovima neke prostorije.

- b) Toplinski mostovi uzrokovani materijalom

Ovisno o toplinskoj provodljivosti susjednih materijala može doći do potpunog ili djelomičnog prodiranja topline kroz omotač zgrade.

- c) Kombinirani toplinski mostovi

Javljaju se na mjestima promjene oblika i materijala konstrukcije, npr. na mjestima konzolnih balkona koji prodiru kroz toplinsku ovojnicu.

- d) Konstruktivni toplinski mostovi

Pojavljuju se na mjestu različitih unutarnjih i vanjskih ploha, na spoju zida, poda i stropa. Javljaju se zbog različitih debljina zidova te različitih dimenzija utjecajnih zona s gornje i donje strane međukatne ploče. Mogu nastati zbog proboja nosive konstrukcije kroz ovojnicu.

- e) Zračni ili konvektivni toplinski mostovi

To su gubitci topline uslijed nekontroliranih propuhivanja kroz zazoru prozora ili kao utjecaj zračnih šupljina i proreza unutar toplinske izolacije.

f) Toplinski mostovi uzrokovani okolinom

Gubitci su uslijed prekomjernog zagrijavanja na pojedinim mjestima na omotaču zgrade. To mogu biti dovod pare, kotlovnica, radijator ispod prozora i slično.[5]

6.8.1. Proračun toplinskih mostova

Toplinske mostove može se proračunati :

- numeričkim metodama,
- ručnim metodama,
- pretpostavljenim vrijednostima,
- katalozima.

Numeričke metode vrijede samo za izotropne materijale, a neki od programa koji to omogućuju su Flixo, HEAT 3D, Psi-Therm 3D, BKI, Mold i drugi.[5]

Proračun se vrši prema sljedećim normama:

- **HRN EN ISO 10211:2008** Toplinski mostovi u zgradarstvu – Toplinski tokovi i površinske temperature – Detaljni proračuni
 - Dani su detaljni podaci o 3D i 2D geometrijskom modelu toplinskih mostova za numeričke proračune
 - Zadani su rubni uvjeti: temperature i plošni otpori prijelaza topline
 - Određen je postupak validacije numeričkih metoda proračuna toplinskih mostova
- **HRN EN ISO 10211-2:2008** Toplinski mostovi u zgradarstvu – Toplinski tokovi i površinske temperature – 2.dio: Linijski i toplinski mostovi
 - Dane su specifikacije za 2D geometrijski model linijskog toplinskih mostova za proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline Ψ (psi) i proračun donje granice najmanjeih površinskih temperatura

- **HRN EN ISO 6346:2002** Građevni dijelovi i građevni dijelovi zgrada – Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline – Metoda proračuna
 - U dodatku D – ispravci za zračne šupljine i mehaničke spojnice
 - Određivanje vrijednosti X

6.8.2. Duljinski koeficijent prolaska topline ψ

Duljinski koeficijent prolaska topline ψ [W/mK] predstavlja utjecaj linijskog toplinskog mosta na ukupni toplinski tok. Za dobivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline ψ spoja dvaju elemenata (zida i poda) koriste se ručne i numeričke metode ili se izražava pomoću kataloga sa standardnim primjerima. Numeričkim proračunom može doći do maksimalne greške od 5% dok ručnim proračunom i pronalaženjem vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline uz pomoć kataloga dolazi do odstupanja od točne vrijednosti i za 20%.

Vrijednost duljinskog koeficijenta prolaska topline može se odrediti pomoću sljedećeg izraza [4]:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (10)$$

gdje su:

L_{2D} [W/mK] - koeficijent toplinske veze dobiven iz 2-D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša

U_j [W/m^2K] – plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente j koja razdvaja dva promatrana okoliša

l_j [m] – duljina na koju se odnosi U_j

N_j – broj 1-D komponenata

Promjenom geometrije (npr. u kutovima) mijenja se i prijenos topline. Važno je definirati odnosi li se ψ vrijednost na vanjske ili unutarnje dimenzije kod računanja toplinskog mosta (slike 3. i 4.) jer se može javiti velika razlika između njihovih vrijednosti.

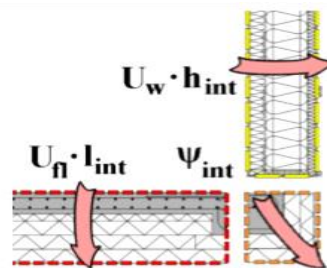
Za unos detalja u kojem će se promatrati prijenos topline preko tla i vrijednost duljinskog koeficijenta prolaska topline koristit će se program Flixo. Vanjske i unutarnje dimenzije spoja

zida i poda definirane su prema normi HRN EN ISO 10211:2017 (Toplinski mostovi u zgradarstvu – Toplinski tokovi i površinske temperature).

Kod proračuna toplinskih mostova u tlu dimenzije temeljne ploče i toplinska provodljivost izolacije na tlu imaju značajan utjecaj na vrijednost veličine ψ .

Pri korištenju unutarnjih dimenzija, krajnji element odvojen je od zida i elementa jer oba mogu biti računata pomoću U -vrijednosti. Kut je umjesto toga definiran pomoću ψ -vrijednosti. [11]

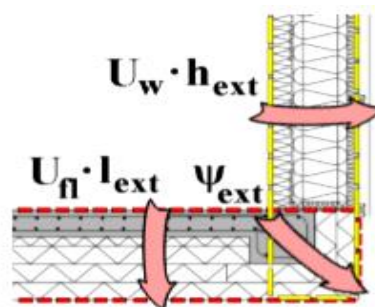
Na slici 3. su prikazani razdvojeni slučajevi elemenata da bi se pokazala 3 načina prijenosa topline kroz element; jedan kroz zid iznad kuta, jedan kroz pod unutar granica zida, te jedan kroz kut.



Slika 3. Prijenos topline kroz elemente [11]

Prema Hannesu Nybergu: "Ako se koriste vanjske dimenzije zida i poda, oba zida $U \cdot h$ vrijednosti i poda $U \cdot l$ vrijednosti uključit će kutni element. Budući da se podni i zidni elementi u ovoj metodi međusobno preklapaju, ukupni prijenos topline elementa sadržavat će više materijala nego što je zapravo u konstrukciji. Zbog toga vrijednost ψ može biti negativna." [11]

Jednako tako postoji način definiranja dimenzija pomoću ukupnih unutarnjih dimenzija. Te dimenzije ne odvajaju etaže i prostorije, već uključuju debljinu pregradnih zidova i podova.



Slika 4. Prijenos topline kroz elemente s ukupnim unutarnjim dimenzijama [11]

6.8.3. Karakteriziranje toplinskih mostova s obzirom na površinsku temperaturu u prostoriji

Temperatura na površini toplinskih mostova sa strane prostorije karakterizira se:

- Faktorom temperature na unutarnjoj površini f_{Rsi}

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (11)$$

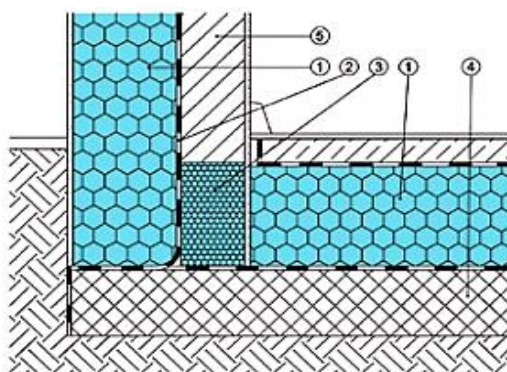
- $f_{Rsi} = 1 \rightarrow$ površinska temperatura sa strane prostorije jednaka je temperaturi zraka u prostoriji
- $f_{Rsi} = 0 \rightarrow$ površinska temperatura sa strane prostorije jednaka je temperaturi vanjskog zraka

- f_{Rsi} se proračunava numeričkim metodama koje su u skladu s normom HRN EN ISO 10211-1
- Cilj proračuna je dobiti najmanju površinsku temperaturu te odrediti njeno mjesto, kako bi se procijenila opasnost od površinske kondenzacije

$$\theta_{si} = f_{Rsi}(\theta_i - \theta_e) + \theta_e \quad (12)$$

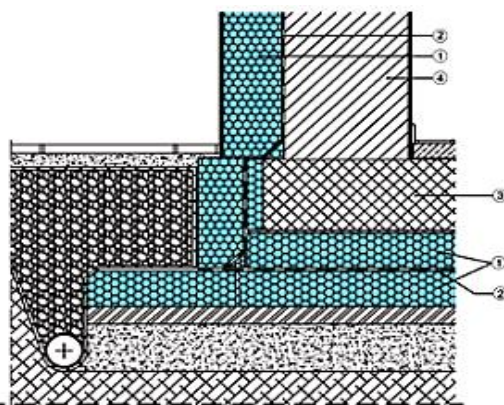
6.9. Način izvedbe toplinskog mosta temeljne ploče

Termoizolacija koja se postavlja ispod temeljne ploče ili trakastog temelja građevine sprječava pojavu toplinskog mosta na kontaktu konstrukcije s temeljnim tlom, a samim time smanjuje potrošnju energije kod zgrada gotovo nulte energije. Najčešće se upotrebljava XPS, granulat staklene pjene te (elastificirani polistiren) EPS. Takav trend usvojen je iz zemalja sjeverne i srednje Europe. Da se ne bi ugrozila potresna sigurnost konstrukcije, prekidi toplinskih mostova izolacijskom bazom nisu dozvoljeni bez uporabe odgovarajućih nadomjesnih baza, uz odgovarajuće provjere za slučajeve opterećenja koji svakako onda uključuju i djelovanje na potres. Slika 5. i slika 6. pokazuju jedan od načina pravilne izvedbe toplinskih mostova kod temeljne ploče.[12]



LEGENDA:
1 – toplinska izolacija; 2 – hidroizolacija; 3 – izolacijska baza (λ : s
0.12 W/(mK), 4 – AB ploča; 5 – zid od opeke

Slika 5. Spoj vanjskog zida i podne ploče- prekid toplinskog mosta izolacijskom bazom[17]



LEGENDA:
1 – toplinska izolacija; 2 – hidroizolacija; 3 – AB ploča; 4 – zid od opeke

Slika 6. Spoj vanjskog zida i podne ploče temeljene na toplinskoj izolaciji – spoj bez toplinskog mosta [17]

Pri ugradnji toplinske izolacije ispod temeljne ploče potrebno je paziti da:

- se uslijed djelovanja potresa ne smiju prekoračiti projektirana posmična i tlačna naprezanja te deformacije u izolaciji ispod temeljne ploče,
- ne smije doći do nekontroliranoga povećanja djelovanja potresa na gornju konstrukciju zbog promjena oblika titranja zgrade uzrokovanih mekanom toplinsko-izolacijskom podlogom. [12]

6.10. Prijenos topline preko tla

6.10.1. Računanje gubitka topline kroz tlo

Kao što je prikazano u radu H.Nyberga kod prijenosa topline kroz tlo koriste se elementi koji odvajaju vanjski od unutarnjeg dijela preko tla, kroz tlo, kroz zidove podruma i poda, te se koeficijent prijenosa topline računa na sljedeći način:

$$H_g = A \cdot U_g + P \cdot \psi_g \quad [W / K]$$
$$H_g = A \cdot U_{bf} + P \cdot \psi_{bg} + z \cdot P \cdot U_{bw} \quad [W / K] \quad (13)$$

H_g [W/K] - koeficijent prijenosa topline u ravnotežnom stanju

A [m^2] - površina poda/podruma

U_g [W/ m^2 K] - prijenos topline podne ploče i tla

P [m] - opseg poda

ψ_b [W/mK] - linearni prijenos topline spoja zid-pod iznad tla

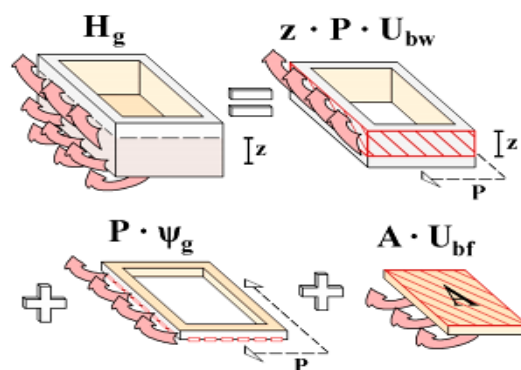
U_{bf} [W/ m^2 K] - prijenos topline podruma

ψ_{bf} [W/mK] - linearni prijenos topline spoja zid-pod podruma

z [m] - dubina podruma

$z \cdot P$ [m^2] - ukupna površina zida podruma

U_{bw} [W/ m^2 K] - prijenos topline podrumskih zidova [11]



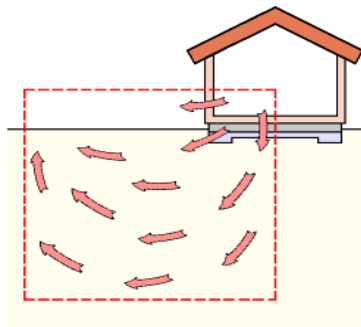
Slika 7. Toplinski tok kroz ovojnicu podruma [11]

Na slici 7. prikazana je odvojena omotnica podruma s pojednostavljenim toplinskim tokom. Gornji dio koji je prikazan svijetlosivom bojom nalazi se iznad razine tla i nije uključen u

proračun gubitaka topline kroz tlo. Kod prijenosa topline kroz podrum sudjeluje samo homogeni dio zida $z \cdot P \cdot U_{bw}$. Spoj dijelova je umjesto toga uključen u ψ_g vrijednost koja se množi s parametrom P. Sve podne površine unutar zidova uključene su u izraz $A \cdot U_f$.

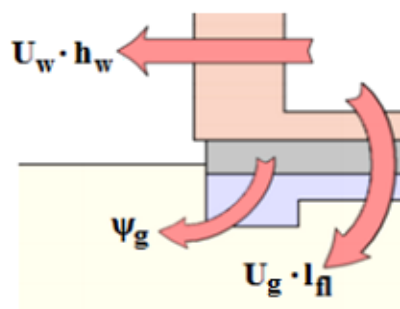
6.10.2. Analiza spoja zid-pod

Prikazuje se odrezani dio građevine koji je svojim kutom okrenut prema vani kao što je prikazano na slici 8.



Slika 8. Shema prijenosa topline u kutu kuće [11]

U obzir je uzet veći dio tla te dobiveni broj predstavlja pojednostavljenje cijelog sustava. Glavna ideja predočena u normi je analiziranje odvojenog dijela (slika 9), a zatim odvajanje pojedinog elementa za prijenos topline kako bi se pronašao linearni toplinski prijenos.



Slika 9. Shema prijenosa topline kroz elemente u kutu [11]

Pri korištenju unutrašnjih dimenzija, krajnji element odvojen je od zida i elementa jer oba mogu biti računata pomoću U-vrijednosti. Kut je umjesto toga definiran pomoću ψ -vrijednosti.

7. Ekstrudirani polistiren (XPS)

7.1. Karakteristike ekstrudiranog polistirena (XPS-a)

Ekstrudirani polistiren (XPS) je termoizolacijski materijal s izvanrednim termoizolacijskim svojstvima, visokom tlačnom čvrstoćom i velikom otpornošću na klimatske uvjete. Zbog svoje zatvorene strukture sitnih ćelija sprječava prodor vlage te je otporan na starenje i propadanje. Spada u grupu anorganskih umjetnih materijala za toplinsku izolaciju. XPS-a u procesu proizvodnje prikazan je na slici 10.



Slika 10. Ekstrudirani polistiren (XPS)

Tablica 2. Svojstva XPS-a [4]

sTOPLINSKO IZOLACIJSKI MATERIJAL	GUSTOĆA ρ (kg/m ³)	TOPLINSKA PROVODLJIVOST λ (W/mK)	POTREBNA DEBLJINA (cm) ZA U $= 0,35$ W/m ² K	FAKTOR OTPORA DIFUZIJE VODENE PARE - μ	RELATIVNI TROŠAK ZA $U = 0,35$ W/m ² K
Ekstrudirana polistirenska pjena (XPS) prema HRN EN 13164 (stirodur)	≥ 25	0,030 – 0,040	8 -10	150	2,5

Prednosti ekstrudiranog polistirena:

- Ne upija vodu
- Ima visoku tlačnu čvrstoću (250-700 kPa)
- Dugi vijek trajanja
- Lagan
- Jednostavna obrada
- Otporan na truljenje i starenje
- Ne nadražuje kožu [5]

Zbog svoje fine strukture, sitnih, zatvorenih ćelija odličan je toplinski izolator s dobrim mehaničkim svojstvima i niskim stupnjem upijanja vlage. Pogodan je za ugradnju na mjestima s visokim tlačnim opterećenjem i na mjestima gdje je prisutna voda i vlaga.

Koristi se kao toplinska izolacija temelja (tamo gdje je kontakt s hladnim tlom najveći), ispod temelja, podova u industrijskim halama, pruga, kao perimetarna izolacija (toplinska izolacija vanjskih podrumskih zidova), kao toplinska izolacija ravnih krovova i ostalo.

Pravilnom ugradnjom XPS-a njegova svojstva se ne mijenjaju, pa je njegova trajnost veća od životnog vijeka zgrade u kojoj je ugrađen. Biološki je neutralan, nema nikakvog kemijskog utjecaja na prirodne procese te nema hranjive vrijednosti za biljke i životinje.

Najčešća primjena XPS-a je u obliku ploča raznih debljina, ali postoje i posebni elementi za zidove (kalupi za betoniranje zidova), ploče za postavu podnog grijanja, elementi za zadržavanje vode u zelenim krovovima, granule za ispunu u laganim betonima i glazurama i drugo.

Ploče mogu biti s preklapom i bez preklopa (falca). Mogu biti jednostrano ili obostrano kaširane s raznim materijalima za postizanje dodatnih karakteristika ili primjena (npr : drvolitom, hidroizolacijom, parnom branom ili geotekstilom).[14]

7.2. Proizvodnja XPS –a

Polistiren je plastomer linearnih makromolekula. To je vrlo važan polimer zbog svojih dobrih mehaničkih, toplinskih i izolacijskih svojstava te niske cijene. Tvrd je i krhak, male udarne žilavosti i velikog indeksa loma. Može se primjenjivati samo do temperature od 70°. Otporan je na djelovanje kiselina, uz izuzetak dušične i ledene octene kiseline.

Polistiren se industrijski proizvodi lančanom polimerizacijom stirena $C_6H_5 - CH = CH_2$ uz slobodne radikale. Polimerizacijom čistog stirena nastaje polistiren kao homopolimer kojemu se prema potrebi dodaju antistatici, svjetlosni stabilizatori, bojila i pigmenti, sredstva protiv gorenja i sl. Kombinacijom plastomera i elastomera dobivaju se kvalitetni materijali. Stiren lako tvori kopolimere s mnogim monomerima.[15]

Polistiren se u građevinskoj industriji koristi u dvama oblicima:

- ekspanzirani polistiren (EPS) i
- ekstrudirani polistiren (XPS).

Ekstrudirani polistiren (XPS) se proizvodi propuštanjem pred-ekspanzirane smjese kroz ekstruder prilikom čega se zrna polistirena stišću u zatvorenu strukturu koja ima značajno veću mehaničku tvrdoću i otpornost upijanja vode.

Proizvodnja XPS-a je manje ugodna za okoliš nego proizvodnja EPS-a. Potrebno je više energije i koriste se plinovi štetni za ozonske slojeve (nove generacije XPS-a bez štetnih plinova).[16]

Prikaz procesa proizvodnje od sirovine do gotovog proizvoda prikazan je na slici 11.



Slika 11. *Proces proizvodnje XPS-a*

7.3. Eksperimentalno određivanje svojstava XPS-a

Eksperimentalna ispitivanja provedena su na uzorcima XPS-a različitih krutosti i debljina. Uzorci su podvrgnuti tlačnom i posmičnom testu. Test se provodio kao monotoni i ciklički prema normama EN 826: 1996. i EN 12090: 1997 (obje povučene iz HRN-a).

Test se provodio u hidrauličkoj preši Roell Amsler s kapacitetom od 100kN. Deformacije su mjerene s LVDT uređajima. Senzori su postavljeni na površinama uzorka.

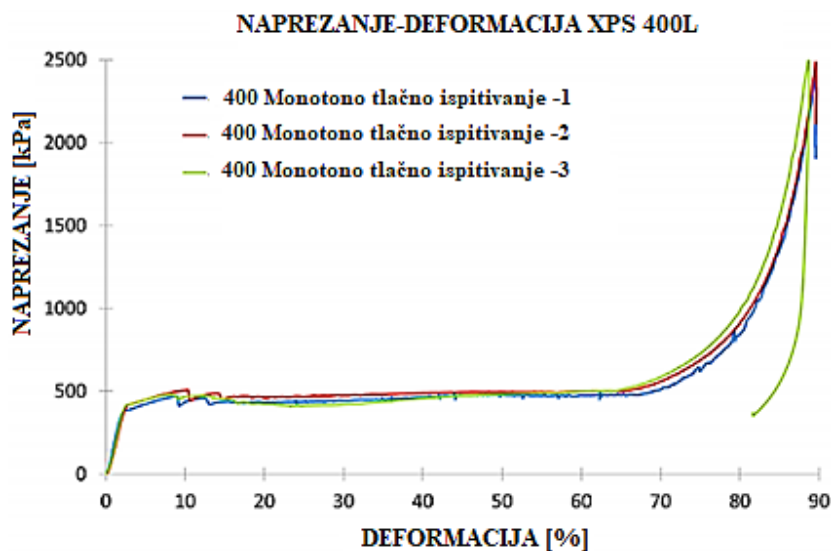
7.3.1. Tlačni test XPS-a

Postupak ispitivanja za XPS krutosti 400 kPa (400-L) i XPS krutosti 700 kPa (700-L) je identičan, pa će se prikazati samo za jedan od uzoraka.

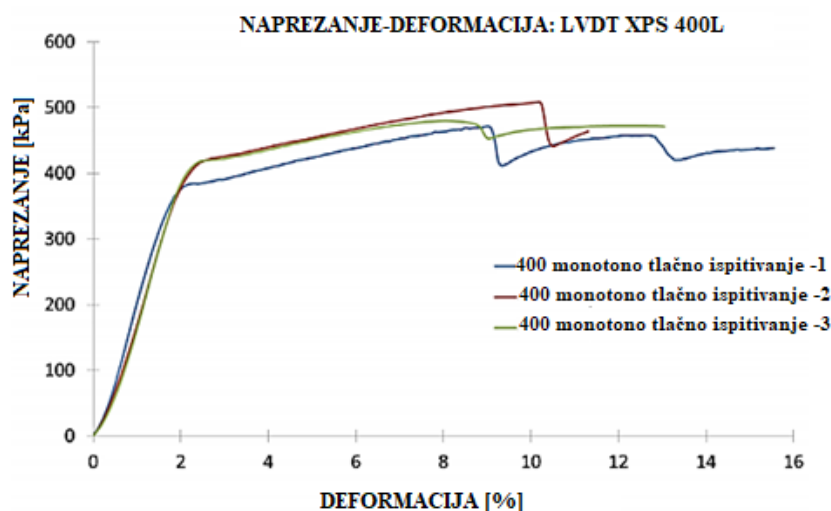
Kao što je već navedeno, za ispitivanje je korištena norma EN 826: 1996. Monotoni testovi su u potpunosti provedeni prema toj normi, dok su za cikličke testove standardni postupci modificirani. Tlačni test proveden je na dvama različitim uzorcima. XPS 400-L s debljinom od 120mm i XPS 700-L s debljinom 100 mm. Dimenzije uzorka su: duljina 200 mm, širina 200 mm, te visina koja odgovara debljini uzorka.

7.3.1.1. Rezultati ispitivanja za XPS 400-L

Rezultati testa provedenog na tri uzorka (slike 12. i 13.) XPS-a 400-L prikazuju ponašanje materijala na tlačno opterećenje. Za XPS su određene dvije karakteristične vrijednosti povezane s maksimalnim naprežanjem: tlačno naprežanje σ_{10} koje pripada deformaciji od 10% i tlačno naprežanje σ_m koje pripada maksimalnoj sili. Modul elastičnosti E također je određen testom.



Slika 12. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 400-L [17]



Slika 13. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 400-L - početni dio grafa [17]



Slika 14. Faze opterećenja/rasterećenja uzorka XPS 400-L[17]

Na slici 14 prikazan je uzorak 400 L i njegova deformacija prije i nakon ispitivanja.

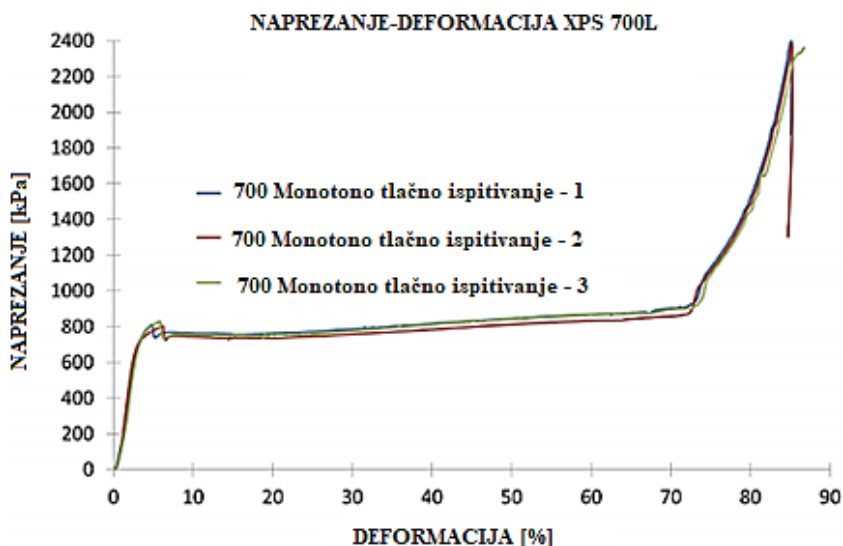
Tablica 3. Karakteristike XPS 400-L u skladu s EN 826: 1996. [17]

Broj uzorka	σ_{10} (kPa)	σ_m (kPa)	modul E (kPa)
1. mon.	433	472	24500
2. mon.	507	508	22300
3. mon.	466	480	23400
PROSJEČNO mon.	469	487	23400
COV. mon. (%)	7,95	3,93	4,7
1. cikl.	470	n.d.	24800
2. cikl.	498	n.d.	22800
3. cikl.	494	n.d.	25200
4. cikl.	502	n.d.	26200
PROSJEČNO cikl.	491	n.d.	24700
COV. cikl. (%)	2,94	n.d.	5,9

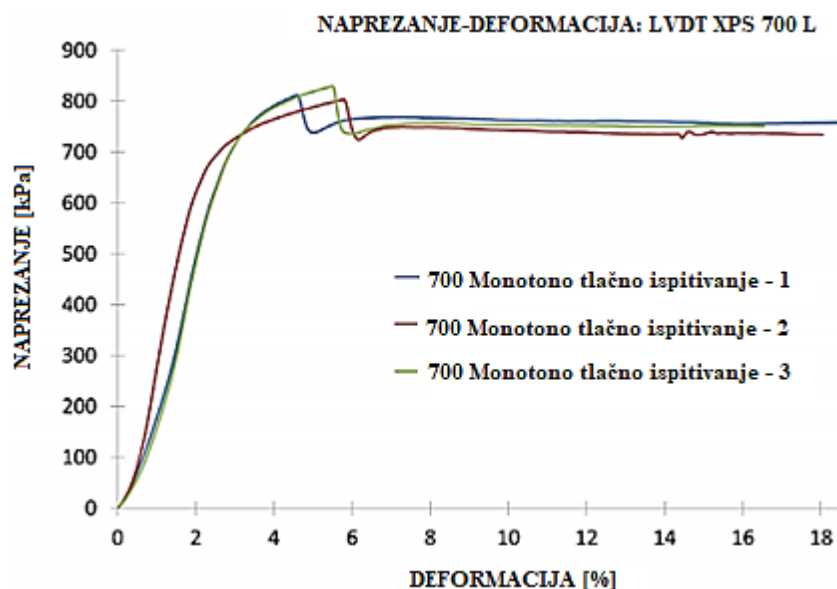
Rezultati monotonog ispitivanja daju vrijednosti naprezanja σ_{10} (465 - 510 kPa) koji su slični kao i kod cikličkog ispitivanja (470 - 505 kPa).

7.3.1.2. Rezultati ispitivanja za XPS 700-L

Rezultati testa provedenog na tri uzorka (slike 15. i 16.) XPS-a 700-L prikazuju ponašanje materijala na tlačno opterećenje. Za XPS su određene dvije karakteristične vrijednosti povezane s maksimalnim naprežanjem: tlačno naprežanje σ_{10} koje pripada deformaciji od 10% i tlačno naprežanje σ_m koje pripada maksimalnoj sili. Modul elastičnosti E također je određen testom.



Slika 15. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 700-L [17]



Slika 16. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 700-L - početni dio grafa [17]



Slika 17. Faze opterećenja/rasterećenja uzorka XPS 700-L [17]

Na slici 17. prikazan je uzorak 700 L i njegova deformacija prije i nakon ispitivanja, dok su u tablici 4. prikazani svi rezultati.

Tablica 4. Karakteristike XPS 700-L u skladu s EN 826: 1996. [17]

Broj uzorka	σ_{10} (kPa)	σ_m (kPa)	modul E (kPa)
1. mon.	763	812	35000
2. mon.	753	803	35300
3. mon.	743	830	34300
PROSJEČNO mon.	753	815	34900
COV. mon. (%)	1,32	1,65	1,47
1. cikl.	744	n.d.	39150
2. cikl.	758	n.d.	35730
3. cikl.	740	n.d.	38600
4. cikl.	758	n.d.	44390
PROSJEČNO cikl.	752	n.d.	38500
COV. cikl. (%)	1,2	n.d.	9,71

7.3.2. Posmični test XPS-a

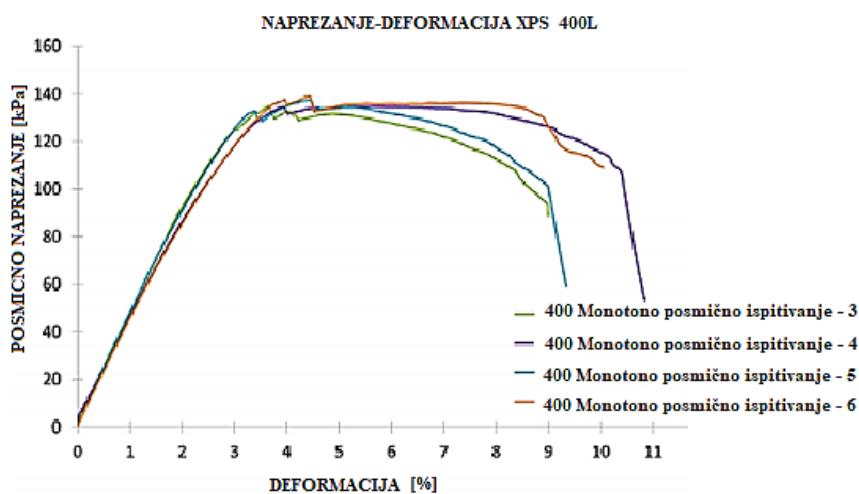
Postupak ispitivanja za XPS 400-L i XPS 700-L je identičan, stoga će se prikazati samo za jedan od uzoraka.

Kao što je već navedeno, za ispitivanje je korištena norma EN 12090: 1997. Monotoni testovi su u potpunosti provedeni prema normi, dok su za cikličke testove standardni postupci modificirani. Uzorci su prvo rasterećeni, a zatim ponovno opterećeni većim opterećenjem koja su izazvala veće deformacije.

Posmični test proveden je na dva različita uzorka. XPS 400-L s debljinom od 120mm i XPS 700-L s debljinom 100mm. Dimenzije uzorka su: duljina 200mm, širina 100mm, te visina koja odgovara debljini uzorka. Ispitivanje se provodi postavljanjem dva uzorka koja su lijepljena na nepomični sistem od tri krute paralelne ploče. Vanjske ploče su učvršćene, dok je srednja ploča pričvršćena na pomični dio uređaja. Srednja ploča se opterećuje te dolazi do posmika uzoraka.

7.3.2.1. Rezultati ispitivanja za XPS 400-L

Rezultati monotonog testa na posmik, koji su provedeni na četiri uzorka XPS 400-L, prikazani su na sljedećoj slici kao $\tau - \varepsilon$ dijagram. Uz pomoć dijagrama određeni su maksimalno posmično naprežanje τ i modul posmika G prema normi EN 12090: 1997. Rezultati su dani u tablici 5. Na slici 19. vidi se način ispitivanja uzorka 400L na posmik.



Slika 18. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim posmičnim ispitivanjem XPS-a 400-L [17]



Slika 19. Posmični test primijenjen na posmičnom stroju [17]

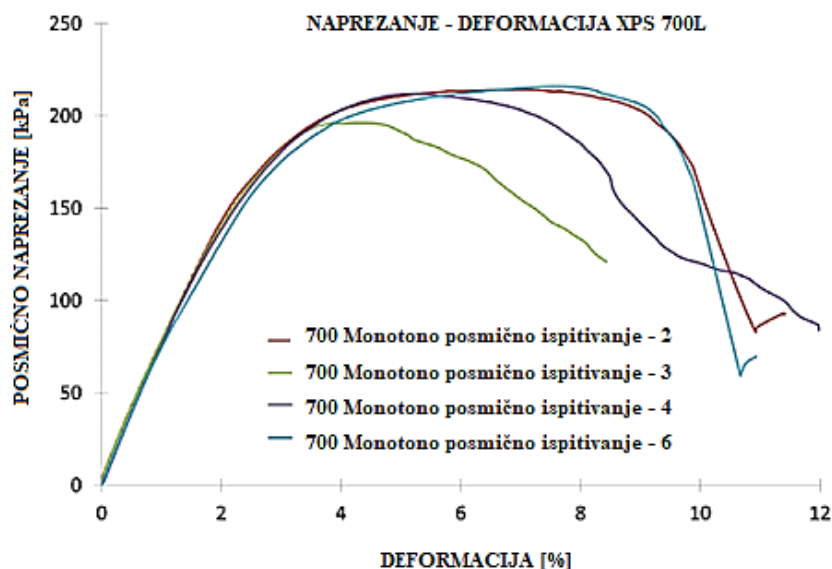
Tablica 5. Karakteristike XPS 400-L u skladu s EN 21090: 1997 [17]

Broj uzorka	σ_+ (kPa)	σ_- (kPa)	modul G (kPa)
3. mon.	135	n.d.	4637
4. mon.	135	n.d.	4283
5. mon.	137	n.d.	4735
6. mon.	139	n.d.	4465
PROSJEČNO mon.	136	n.d.	4530
COV. mon. (%)	1,54	n.d.	4,39
1. cikl.	140	-132	4775
2. cikl.	138	-136	4830
3. cikl.	135	-130	4409
4. cikl.	141	-126	4252
5. cikl.	140	-128	4278
PROSJEČNO cikl.	139	-131	4509
COV. cikl. (%)	1,82	3,04	6,1

Rezultati monotonog ispitivanja daju vrijednosti naprezanja τ_+ (135 - 139 kPa) koji su sličn kao i kod cikličkog ispitivanja (135 – 141 kPa).

7.3.2.2. Rezultati ispitivanja za XPS 700-L

Rezultati monotonog testa na posmik, koji su provedeni na četiri uzorka XPS 700-L, prikazani su na sljedećoj slici kao $\tau - \varepsilon$ dijagram. Prema normi EN 12090: 1997 uz pomoć dijagrama određeno je maksimalno posmično naprezanje τ i modul posmika. Rezultati su dani u tablici 5.



Slika 20. Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim posmičnim ispitivanjem XPS-a 700-L [17]

Tablica 6. Karakteristike XPS 700-L u skladu s EN 21090: 1997 [17]

Broj uzorka	σ_+ (kPa)	σ_- (kPa)	modul G (kPa)
3. mon.	214	n.d.	7438
4. mon.	197	n.d.	7304
5. mon.	219	n.d.	7658
6. mon.	216	n.d.	7169
PROSJEČNO mon.	210	n.d.	7392
COV. mon. (%)	4,27	n.d.	2,82
1. cikl.	240	-197	7649
2. cikl.	223	-222	7620
3. cikl.	213	-206	7333
4. cikl.	227	-219	7262
5. cikl.	221	-214	7666
PROSJEČNO cikl.	225	-212	7506
COV. cikl. (%)	4,43	4,7	2,57

7.4. Određivanje krutosti XPS-a

Krutost uzoraka određena je pomoću dobivenih dijagrama za pojedinu čvrstoću XPS-a. Vrijednost krutosti dobivena je koristeći se relacijama danim u normama EN 826: 1996. i EN 12090: 1997. U nastavku će se prikazati proračun krutosti pojedinih uzoraka.

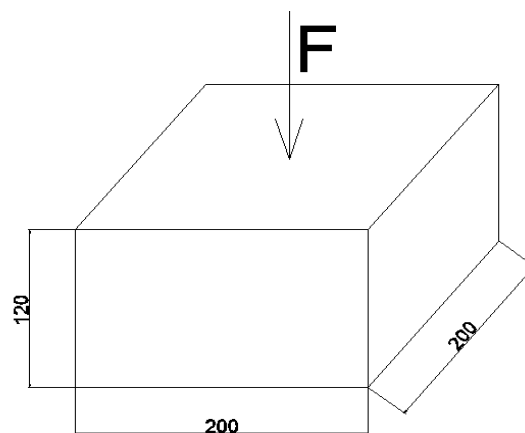
7.4.1. Vertikalna krutost XPS-a

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

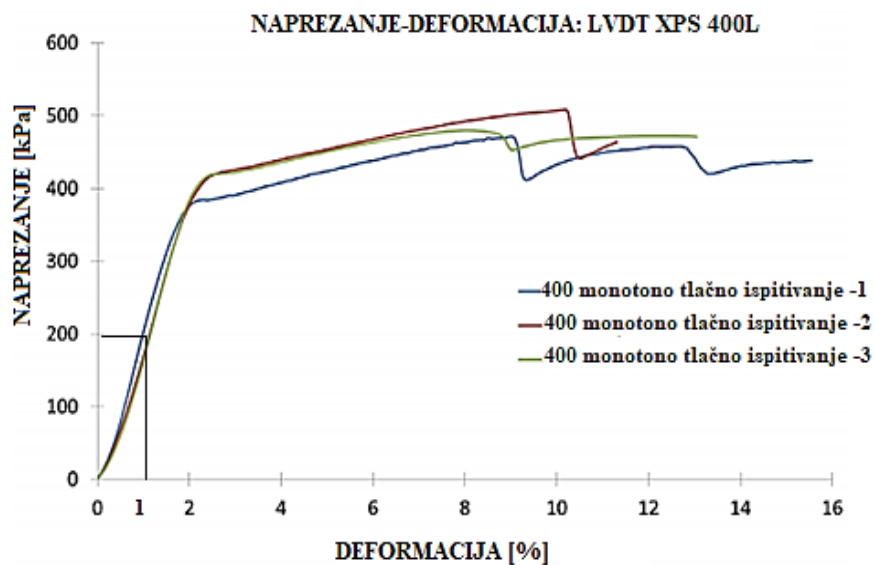
$$A = a \cdot b \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [%]}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} \left[\frac{kN}{m} \right]$$



Krutost XPS 400L



Očitano:

$$\sigma = 200 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 1 \%$$

$$A = a \cdot b = 20 \cdot 20 = 400 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma \cdot A = 200 \cdot 400 = 8000 \text{ N} = 8 \text{ kN}$$

Debljina 0,120 m

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = 0,01 \cdot 0,12 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

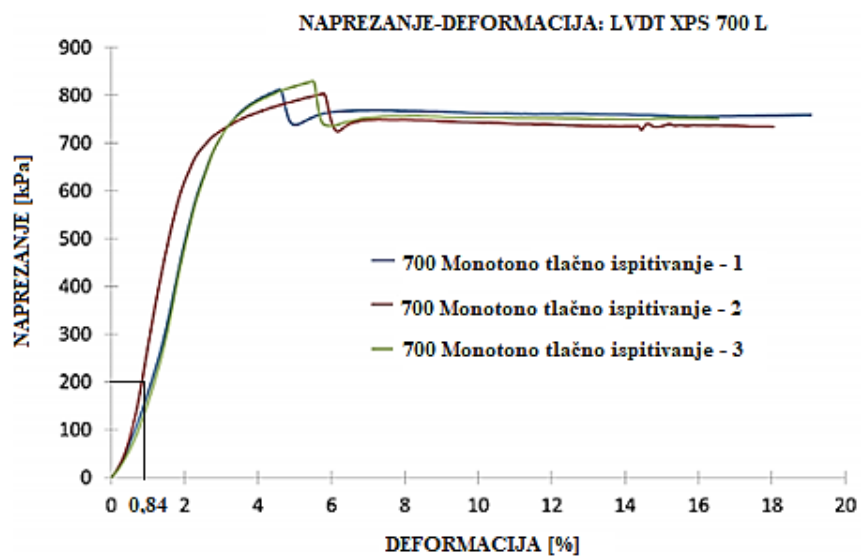
$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{8}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 6666,67 \text{ kN/m}$$

Debljina 0,240 m

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = 0,01 \cdot 0,24 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{8}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 3333,33 \text{ kN/m}$$

Krutost XPS 700L



Očitano:

$$\sigma = 200 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,84 \%$$

$$A = a \cdot b = 20 \cdot 20 = 400 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma \cdot A = 200 \cdot 400 \\ = 8000 \text{ N} = 8 \text{ kN}$$

Debljina 0,100 m

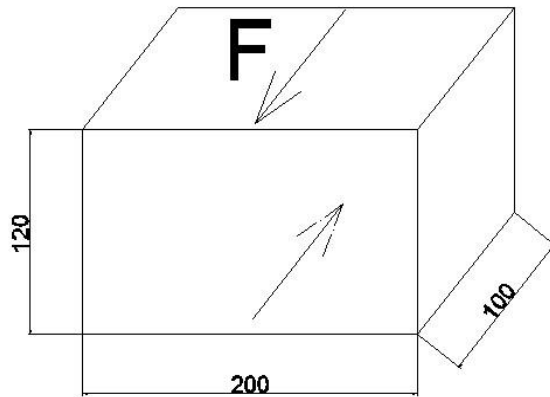
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = 0,0084 \cdot 0,10 = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{8}{8,4 \cdot 10^{-4}} = 9523,81 \text{ kN/m}$$

Debljina 0,200 m

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \varepsilon = 0,0084 \cdot 0,20 = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{8}{1,68 \cdot 10^{-3}} = 4761,12 \text{ kN/m}$$



7.4.2. Posmična krutost XPS-a

$$\tau = \frac{F}{A} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

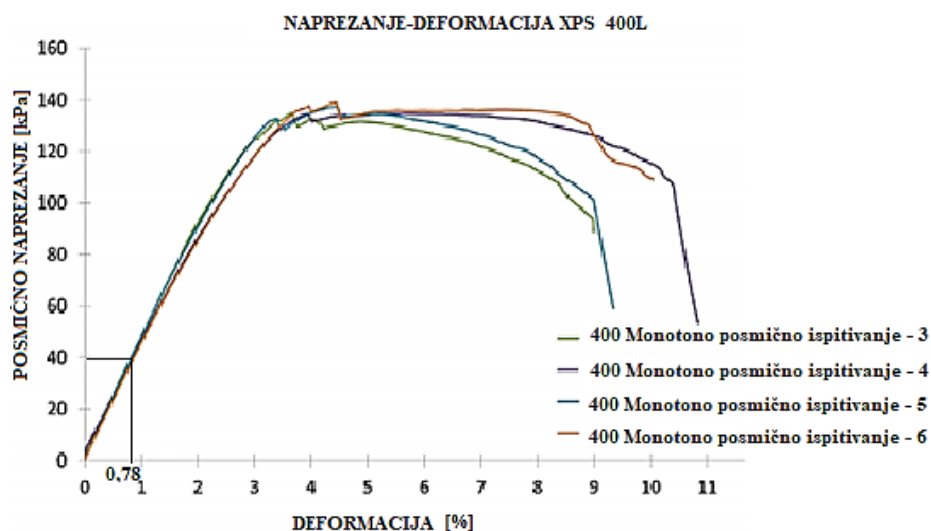
$$A = a \cdot b \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\text{tg}\alpha = \text{strain} \text{ [%]}$$

$$\Delta l = d \cdot \text{tg}\alpha \text{ [m]}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right]$$

Krutost XPS 400L



Očitano:

$$\sigma = 40 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,78 \%$$

$$A = a \cdot b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma \cdot A = 40 \cdot 200 = 800 \text{ N} = 0,8 \text{ kN}$$

Debljina 0,120 m

$$\Delta l = d \cdot \text{tg} \alpha = 0,012 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 9,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

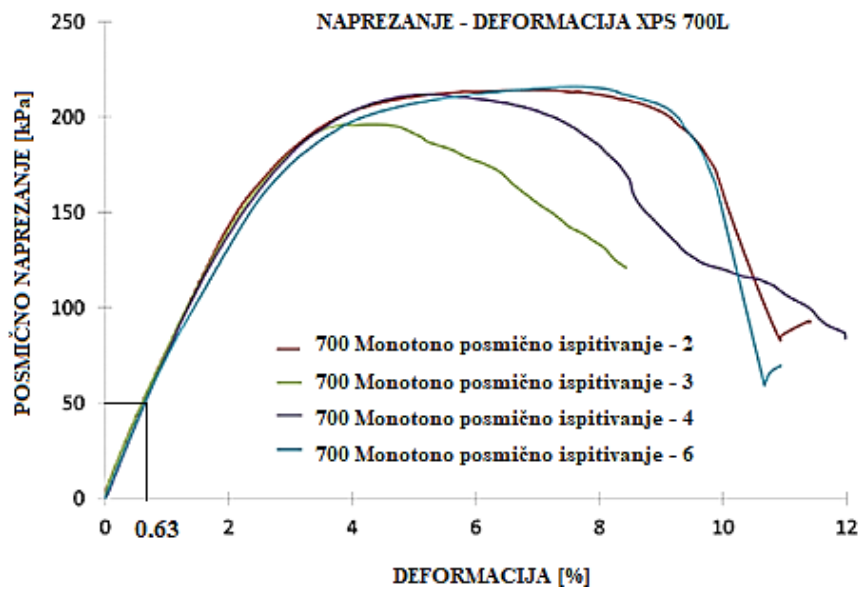
$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{0,8}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 853,79 \text{ kN/m}$$

Debljina 0,240 m

$$\Delta l = d \cdot \text{tg} \alpha = 0,024 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 1,872 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{0,8}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 426,84 \text{ kN/m}$$

Krutost XPS 700L



Očitano:

$$\sigma = 50 \text{ kPa}$$

$$\varepsilon = 0,63 \%$$

$$A = a \cdot b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow F = \sigma \cdot A = 50 \cdot 200 = 1000 \text{ N} = 1 \text{ kN}$$

Debljina 0,100 m

$$\Delta l = d \cdot \operatorname{tg} \alpha = 0,010 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{1,0}{6,3 \cdot 10^{-4}} = 1587,30 \text{ kN/m}$$

Debljina 0,200 m

$$\Delta l = d \cdot \operatorname{tg} \alpha = 0,020 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{1,0}{1,26 \cdot 10^{-3}} = 793,65 \text{ kN/m}$$

Krutosti XPS-a najvažniji su parametri koji se unose za modeliranje izolacije ispod temeljne ploče i temeljnih traka. U slijedećoj tablici prikazane su krutosti koje su izračunate prema pripadajućim propisima .

Tablica 7.. Vertikalna i posmična krutost XPS-a

XPS		Vertikalna krutost (kN/m)	Posmična krutost (kN/m)
400-L	12 cm	6666,67	853,79
	24 cm	3333,33	426,84
700-L	10 cm	9523,81	1587,30
	20 cm	4761,12	793,65

8. Potresno djelovanje

Djelovanjem prirodnih sila dolazi do prirodnih katastrofa, a jedna od njihovih manifestacija je nastanak potresa. Potres je endogeni proces do kojeg dolazi uslijed pomicanja tektonskih ploča, a posljedica je podrhtavanje Zemljine kore zbog oslobađanja velike količine energije.

Bitna činjenica je da je u posljednjih 4000 godina poginulo oko 13 milijuna ljudi od čega 1 milijun u posljednjih sto godina. Iz tog razloga postoji velika doza zabrinutosti za sigurnost ljudi, pa se iz tog razloga sve više obraća pozornost na potres. [20]

Djelovanje i posljedice potresa:

- najbolnije posljedice: gubitci ljudskih života,
- oštećenja ili rušenje: zgrada i mostova,
- oštećenja ili rušenje specijalnih objekata: nuklearne elektrane, velike brane, cjevovodi za nafte i plin, postrojenja kemijske industrije.

Svi potresi se na osnovi vjerojatnosti pojavljivanja mogu vezati za određeni povratni period, a u Hrvatskoj postoje karte za povratne periode od 50, 100, 500, 1000 i 10 000 godina.

Za uobičajene zgrade prema europskim propisima (EUROCOD 8) definira se povratni period za sigurnosni potres od 475 godina. [21]

Pojedinim konstrukcijskim rješenjima potrebno je osigurati duktilnost konstrukcije. Zbog toga se primjenjuje proračun prema sposobnosti nosivosti gdje se na odabranim mjestima dozvoljava plastifikacija i na taj način osigurava nelinearan rad konstrukcije.

Detaljna analiza konstrukcije prati se primjenom nelinearne dinamičke analize. Pretpostavljaju se različiti dijagrami sila – pomak, dok se opterećenje obično zadaje u obliku akcelerograma.

Drugi način je metoda spektra konstrukcije. Ukupan odgovor konstrukcije dobiva se kao kombinacija odgovora u pojedinim vlastitim oblicima, dinamički sustav sa n međusobno zavisnih stupnjeva slobode transformira se u n nezavisnih stupnjeva slobode.

8.1.1. Skale za mjerenje potresa

Skale za mjerenje potresa neophodne su da bi se odredila jačina potresa. Postoji više vrsta skala, a obzirom na njihove osnovne karakteristike, mogu se podijeliti u dvije grupe:

- magnitudne skale,
- skale za mjerenje potresa.[23]

Mjera oslobođene energije u hipocentru potresa koja se dalje predaje u formi elastičnih ili seizmičkih valova definirana je magnitudom M . [22]

Najpoznatija magnitudna skala je Richterova koja je zadana u logaritamskom mjerilu. Ona nosi naziv prema njenom utemeljitelju Richteru (1935). Računa se na osnovi seizmograma pojedinog potresa, izračunavanjem ukupne oslobođene energije u hipocentru potresa.

Mjeru jačine potresa s obzirom na njegovo djelovanje na okolinu daju skale intenziteta. Veličina koja opisuje djelovanje potresa na nekom promatranom mjestu je intenzitet I . Djelovanje potresa ogleda se kroz štetne posljedice na određenom lokalitetu. Trenutno se koristi nekoliko skala intenziteta, a većina je s 12 stupnjeva.[24] Između njih ne postoje značajnije razlike u vrednovanju pojedinih stupnjeva.

8.1.2. Seizmičnost

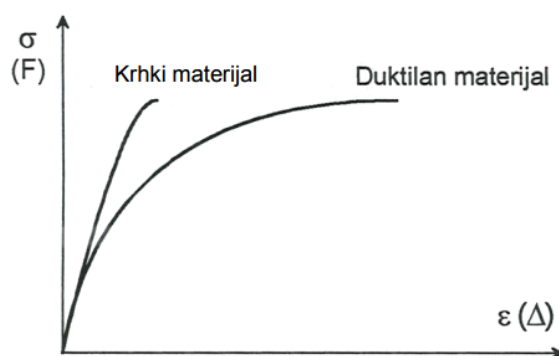
Seizmičnost nekog područja je skup karakteristika potresa, promatranih u prostoru i vremenu. Bitne značajke seizmičnosti nekog područja su:

- položaj hipocentra potresa koji je određen trima koordinatama,
- oslobođena energija, odnosno magnituda potresa. [19]

8.2. Općenito o duktilnosti

Duktilnost je jedno od bitnih svojstava koje konstrukcija mora posjedovati. Može se smatrati kao sposobnost nelinearnog odgovora nosive konstrukcije u seizmičkom području. Nelinearni odgovor konstrukcije ovisi o svojstvima materijala koji čine konstrukciju, kao i o načinu konstruiranja i oblikovanja detalja konstrukcije (spojevi i sl.). Seizmička energija koja se unosi u konstrukciju tijekom potresa troši se plastičnim deformiranjem konstrukcije.

Ponašanje materijala može se opisati kao krhko ili duktilno.



Slika 21. Radni dijagrami krhkog i duktilnog materijala

Iz radnog dijagrama na slici 21. može se zaključiti da se krhki materijal ponaša gotovo linearno-elastično i da prije loma ima jako male nelinearne relativne deformacije dok duktilni materijal prije sloma može pretrpjeti značajne nelinearne deformacije. [20]

Duktilni lom povoljniji je u odnosu na krhki lom prilikom otkazivanja konstrukcije jer je najavljeno otkazivanje kao formiranje plastičnih zglobova (drobljenjem betona uslijed tlaka, popuštanjem armature uslijed vlaka). Cikličkim opterećenjima koja simuliraju djelovanje potresa današnje armiranobetonske konstrukcije pokazuju dobro duktilno ponašanje. [20]

Koeficijent duktilnosti prikazan je sljedećom jednačinom:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (14)$$

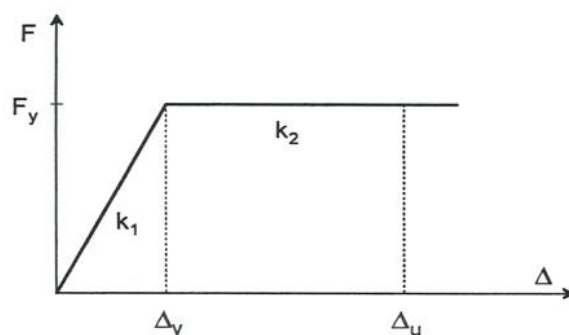
gdje je:

μ_{Δ} - koeficijent duktilnosti pomaka,

Δ_u - ukupni elastoplastični pomak,

Δ_y - pomak na granici plastifikacije.

Koeficijent duktilnosti fizikalna je veličina koja predstavlja mjeru duktilnosti. Predstavlja vezu deformacija na granici popuštanja i ukupne elastoplastične deformacije (deformacija na granici loma). Idealno elastoplastično ponašanje prikazano je bilinearnim dijagramom na slici 22.



Slika 22. Bilinearni dijagram sila-pomak

Kod stvarnih armiranobetonskih konstrukcija dijagram ponašanja materijala je zakrivljen zbog postepenog razvijanja plastifikacije uslijed pojave prvih pukotina do formiranja plastičnih zglobova.

U Eurocodeu 8 (propis za projektiranje seizmičkih otpornih konstrukcija) dane su smjernice za konstrukcijsko oblikovanje seizmički otpornih duktilnih konstrukcija.

Lokalna duktilnost predstavlja sposobnost kritičnih područja (poprečni presjeci konstruktivnih elemenata ili spojeva) da ostvare velike plastične deformacije koje utječu na duktilnost konstrukcije. Ostvaruje se projektiranjem na način da se konstrukcija povoljno ponaša za vrijeme djelovanja potresa.[20]

8.3. Faktor ponašanja konstrukcije

Uglavnom propisi predviđaju linearnu analizu koja se temelji na reduciranom spektru odziva, „metoda sila“ (Forcebased design) s ciljem izbjegavanja opsežne nelinearne analize koja obuhvaća trošenje energije kroz duktilno ponašanje, viskozno prigušenje i ostale mehanizme. Prema Eurocodeu 8, faktorom ponašanja q reducira se elastični spektar odziva. Faktor ponašanja q ovisi o nosivom sistemu i njegovoj regularnosti i o razredu duktilnosti.

Eurocode 8 definira načine određivanja faktora ponašanja q . Potrebno je što točnije predvidjeti ponašanje same konstrukcije u potresu na način utvrđivanja količine duktilnosti konstrukcije u cjelini i njenih elemenata. Smanjenje elastičnog nivoa nosivosti prikazano je koeficijentom umanjenja ili njegovom recipročnom vrijednošću, faktorom ponašanja konstrukcije q . Veličina umanjenja elastične nosivosti F_{el} ovisi o odabranom (eksperimentalno ili analitički utvrđen) koeficijentu duktilnosti $\mu\Delta$. Koeficijent duktilnosti $\mu\Delta$ je odnos između ukupnog elastoplastičnog pomaka i pomaka na granici popuštanja (plastifikacije).

$$F_y = \alpha_\mu F_{el} = \frac{F_{el}}{q} \quad (15)$$

Gdje je:

F_y - nosivost na granici plastifikacije (umanjena elastična nosivost),

α_μ - koeficijent umanjenja,

F_{el} - nosivost konstrukcije koja se pri najjačem potresu ponaša elastično,

q - faktor ponašanja konstrukcije.[20]

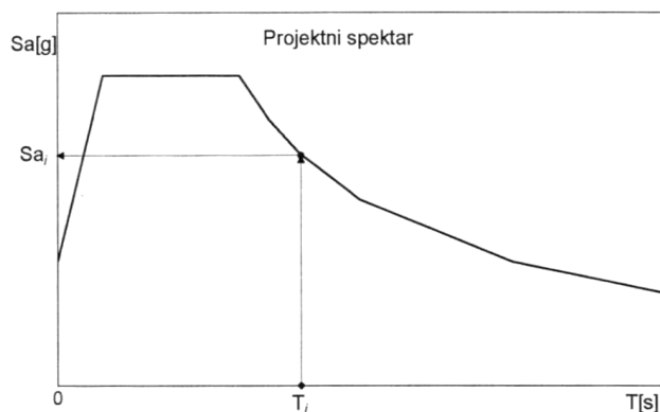
9. Elastični i projektni spektri prema EC8

9.1. Metoda spektralne analize

Zbog ortogonalnosti vlastitih vektora sistem dinamičkih jednadžbi ravnoteže (matrice formata $m \cdot m$) može se transformirati u sistem od m nezavisnih jednadžbi ravnoteže. Mogu se promatrati oscilacije sistema u svakoj vlastitoj formi (mode) posebno. Vodeći se tim zaključkom, postupak rješavanja oscilacija sistema s više stupnjeva slobode naziva se modalna analiza. U prvoj fazi metoda spektralne analize koristi postupak modalne analize.

Potrebno je pronaći vlastite vrijednosti (frekvencije i periodi) za originalni sistem (međusobno spregnute dinamičke jednadžbe ravnoteže). Vektor nepoznatih pomaka prikazuje se preko novih generaliziranih pomaka (transformacija varijabli) uz pomoć matrice vlastitih formi. Sistem od m nezavisnih jednadžbi ravnoteže preko generaliziranih pomaka dobije se kada se cijeli sistem jednadžbi ravnoteže transformira uz pomoć svojstva ortogonalnosti vlastitih vektora. Zatim se radi povratna transformacija. Na taj način dolazi se do rješenja za originalne nepoznate pomake. Ukupni pomak jednak je kombiniranju odgovora u više vlastitih mode-ova.

Upotrebom zaglađenih spektara ubrzanja iz odgovarajućih tehničkih propisa dobije se opterećenje potresom. Pronalazi se traženi period osciliranja T_i na apcisi te iz projektnog spektra odgovora neke vlastite forme, a zatim se očitava mjerodavna veličina spektralnog ubrzanja S_a na ordinati.[20]

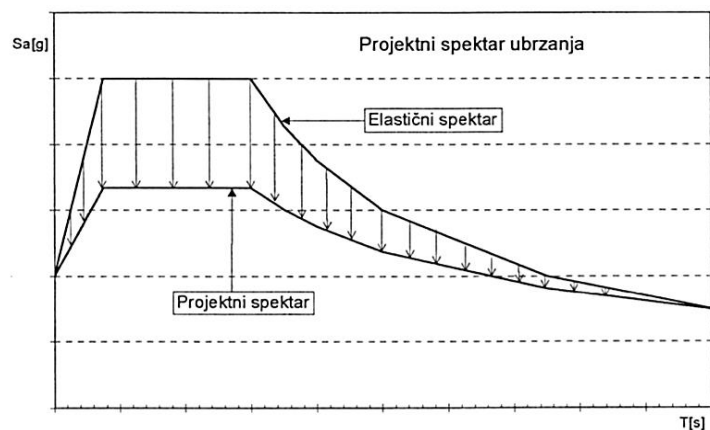


Slika 23. Mjerodavno spektralno ubrzanje za određeni period osciliranja

9.2. Projektni spektri

„Jedan spektar odgovora za odabrani zapis kretanja tla vrijedi samo za taj potres, odnosno odabrani akcelerogram.“ (M.Meštrović) Za potrebe određivanja akcelelograma budućih potresa potrebno je u proračun uključiti veliki broj zapisa kretanja tla. Oni funkcioniraju na principu prikupljanja podataka s akcelelograma potresa koji su zabilježeni na nekom području i proračuna se spektar odgovora. Dobiveni se rezultati pomoću srednje vrijednosti i sličnih statističkih metoda „usrednjavaju“ s ciljem dobivanja spektralne linije koja ima izravne vrhove i doline (pravilnijeg je oblika) i na taj način obuhvaća više mogućih potresa. Potres je kratkotrajno i slučajno djelovanje pa se prilikom potresa naprezanja konstruktivnih elemenata približavaju graničnoj vrijednosti, a u nekim slučajevima i dostižu graničnu vrijednost. Tada konstrukcije pružaju nelinearni odgovor, odnosno nalaze se u nelinearnom području rada materijala (konstrukcije od čelika i betona).

Elastični spektri ubrzanja koriste se za dimenzioniranje konstrukcija koje prije loma ne mogu podnijeti nelinearne deformacije (krte konstrukcije). U današnje vrijeme prevladavaju čelične i betonske konstrukcije koje se duktilno ponašaju prije loma, pa se za njihov proračun i dimenzioniranje koriste projektni spektri odziva.



Slika 24. *Elastični i projektni spektri odziva*

Na slici 24. vidi se da su ordinate projektnih spektara manje od elastičnih jer uzimaju u obzir i nelinearno ponašanje konstrukcije.

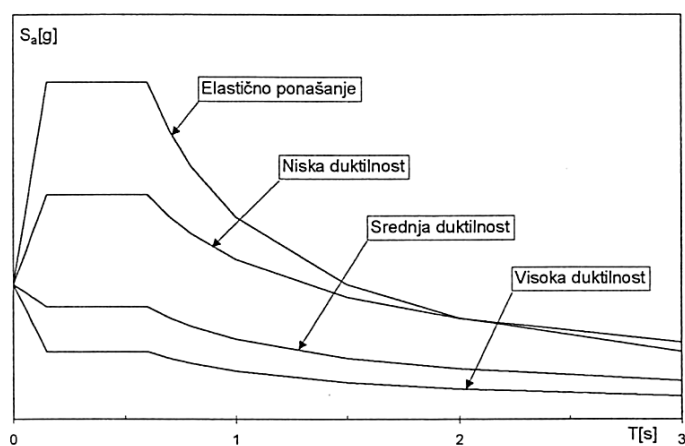
Korištenjem projektnih spektara u svrhu dimenzioniranja, konstrukcija omogućava vitke i racionalnije konstrukcije, ali prilikom nelinearnog odgovora doći će do oštećenja konstruktivnih elemenata. Moguće je pomoću nelinearne dinamičke analize sistema s jednom masom i jednim stupnjem slobode dobiti neelastične spektre odgovora. [20]

9.2.1. Projektni spektri prema Eurocodeu 8

Svjesno se dopušta prijelaz konstrukcije u nelinearno područje rada materijala kako bi projektiranje konstrukcija i za vrijeme najjačih potresa ostalo u linearno-elastičnom području ponašanja, ali bi bilo neracionalno (u estetskom aspektu konstrukcije, ali i s ekonomskog stajališta).

Najčešće se primjenjuju metoda spektralne analize i metoda ekvivalentne statičke analize. Temelje se na pretpostavci o linearno-elastičnom ponašanju materijala. Nelinearno ponašanje konstrukcije za vrijeme potresa uzima se u obzir smanjenjem nosivosti konstrukcije kako bi se za očekivani potres ponašala linearno-elastično.

Projektni spektri odziva sastavni su dio tehničkih propisa za projektiranje i izvođenje građevina u seizmički aktivnim područjima.

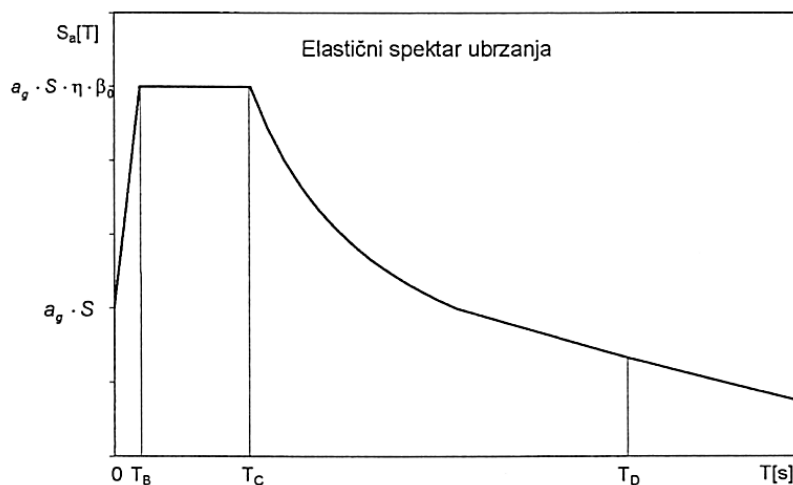


Slika 25. Spektri odgovora prema Eurocodeu 8

Projektni spektri dobivaju se smanjivanjem ordinate elastičnog odziva, a to ovisi o duktilnosti konstrukcije (sposobnosti nelinearnog ponašanja), o materijalu i vrsti konstrukcije. Na slici 25. prikazani su projektni spektri za različite duktilnosti. Povećanjem duktilnosti dolazi do smanjenja ordinate projektnog spektra.

Elastični spektar je projektni spektar za krte konstrukcije. Projektni spektri su skoro jednaki elastičnim spektrima odziva. Za konstrukcije koje čine armiranobetonski zidovi, čelični okviri i slični seizmički zahtjevi u vidu neelastičnosti znatno su manji. [20]

9.2.2. Elastični projektni spektri



Slika 26. Elastični projektni spektar

Sa slike 26. vidljivo je da postoje četiri frekventna područja. Proračun ordinata spektra vrši se na ovaj način:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T \leq T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right] \\
 T_B \leq T \leq T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \\
 T_C \leq T \leq T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^k \\
 T_D \leq T & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T_D} \right]^{k_1} \cdot \left[\frac{T_D}{T} \right]^{k_2}
 \end{aligned} \tag{16}$$

gdje je:

$S_e(T)$ – Ordinate elastičnog spektra odziva,

T - period osciliranja linerarnog sistema s jednim stupnjem slobode,

a_g - projektno ubrzanje tla za odgovarajući povratni period i seizmičku zonu,

S - parametar tla,

β_0 – faktor amplifikacije spektralnog ubrzanja za viskozno prigušenje od 5 %,

T_b, T_c – granice područja s konstantnim spektralnim ubrzanjem,

T_D – period za koji počinje područje konstantnih spektralnih pomaka,

k_1, k_2 – eksponenti koji oblikuju spektar odziva za periode veće od T_c odnosno T_D ,

H – koeficijent korekcije utjecaja prigušenja s referentom vrijednošću $\eta = 1$ za viskozno prigušenje od 5%. [20]

9.2.3. Projektni spektri ubrzanja

U Eurocodeu 8 propisani su uvjeti za proračun mjerodavnog koeficijenta ponašanja konstrukcije q za različite materijale i nosive konstrukcije. Preko q iskazana je sposobnost nelinearnog ponašanja nosive konstrukcije o čemu i ovise projektni spektri.

Ordinate projektnog spektra dobivaju se iz sljedećih formula:

$$\begin{aligned} 0 \leq T \leq T_B & \quad S_d(T) = a \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{\beta_0}{q} - 1 \right) \right] \\ T_B \leq T \leq T_C & \quad S_d(T) = a \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \\ T_C \leq T \leq T_D & \quad S_d(T) = a \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^{k_{d1}} \geq [0.20] \cdot \alpha \\ T_D \leq T & \quad S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T_D} \right]^{k_{d1}} \cdot \left[\frac{T_D}{T} \right]^{k_{d2}} \geq [0.20] \cdot \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

gdje je:

$S_d(T)$ – ordinate projektnog spektra ubrzanja normiranog s g ,

α – odnos između projektnog ubrzanja tla za odgovarajući povratni period i seizmičku zonu i Zemljinog ubrzanja g ,

q – faktor ponašanja,

k_{d1}, k_{d2} – eksponenti koji oblikuju projektni spektar za periode veće od T_c odnosno T_D . [20]

Prema Eurocodeu 8 postoji 5 kategorija tla: A, B, C, D, E. Postoje i dva tipa spektra za sve kategorije tla (S_1 i S_2).

Država je podijeljena u seizmičke zone i svaka zona ima pripadajuće referentno maksimalno ubrzanje tla.

Kao mjerodavni potres uzima se onaj s povratnim periodom od 475 godina. On podrazumijeva oštećenja konstrukcije, ali ne i njeno rušenje.

Projektna vrijednost ubrzanja tla $a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$, referentno maksimalno ubrzanje tla a_{gR} množi se s faktorom važnosti γ_1 . Referentno maksimalno ubrzanje a_{gR} vezano je za klasu tla A prema Eurocodeu 8.

Prema nacionalnim dodatcima uz Eurocode 8 za svaku državu posebno, mogu se primijeniti pojednostavljeni postupci seizmičkog proračuna i projektiranja ovisno o granicama niske ili veoma niske seizmičnosti. Kao niska seizmičnost može se uzeti u obzir situacija u kojoj za tlo kategorije A projektno ubrzanje tla a_g nije veće od 0.08g ili da je $a_g \cdot S < 0.1g$. Kao veoma niska seizmičnost može se uzeti u obzir situacija u kojoj za tlo kategorije A projektno ubrzanje tla a_g nije veće od 0.04g ili da je $a_g \cdot S < 0.05g$. [20]

10. Postavke modeliranja potresa

Prije izrade numeričkog modela opterećenog potresnim djelovanjem valja najprije razmotriti kakve su karakteristike promatrane konstrukcije. Ukoliko je to moguće, u fazi projektiranja trebalo bi utjecati na glavne značajke konstrukcija u pogledu odgovora na potres, a ukoliko nije moguće utjecati na te parametre, odnosno u slučaju analize postojeće konstrukcije, valja te značajke uzeti u obzir prilikom izrade numeričkog modela i interpretacije rezultata. Glavne značajke konstrukcija uslijed potresnog djelovanja su:

- jednostavnost konstrukcije,
- ujednačenost, simetrija i višestruka statička neodređenost,
- dvosmjerna otpornost i krutost,
- torzijska otpornost,
- djelotvornost stropnih konstrukcija,
- odgovarajuće temeljenje.

Jednostavnost konstrukcije podrazumijeva čistoću nosivog sustava i mogućnost izravnog prijenosa potresnih sila. Kod takvog sustava jasniji je tok sila te je numeričko rješenje točnije i s manje nesigurnosti, a lakše se ostvaruje predviđeno ponašanje konstrukcije te racionalnost zgrade u cjelini.

Ujednačenost, simetrija i višestruka statička neodređenost nadovezuje se na prethodni zahtjev jednostavnosti konstrukcije. Iz tog zahtjeva proizlazi jednolika raspodjela sila inercija koje nastaju u težištu masa po konstrukciji. Ujednačenost po visini također je vrlo značajna, pogotovo u pogledu jednolike raspodjele učinaka potresa, a time i disipacije seizmičke energije. Višestruko statički neodređeni sustavi posjeduju veći broj kritičnih mjesta, odnosno mjesta nastanka plastičnih zglobova, što će omogućiti veću i jednoliku disipaciju potresne energije na plastično deformiranje.

Dvosmjerna otpornost i krutost konstrukcijskog sustava bitna je zbog mogućnosti konstrukcije da se odupire horizontalnim inercijalnim silama u dvama dominantnim smjerovima. Pravilnim rasporedom krutosti konstrukcije umanjuju se učinci sila potresa, prije

svoga nastanak prekomjernih pomaka koji zahtijevaju složeniji proračun teorijom drugog reda.

Torzijska otpornost vrlo je bitna stavka konstrukcije kod koje nije izražen koncept simetričnog oblikovanja i rasporeda krutosti i masa. U tom slučaju pogodan je smještaj nosivih elemenata, koji su u mogućnosti prenijeti torzijske sile potresa što bliže vanjskom rubu konstrukcije.

Djelotvornost stropnih konstrukcija očituje se kod prenošenja inercijalnih sila na vertikalna ukrućenja gdje stropna konstrukcija osigurava jednake pomake svih vertikalnih ukrućenja u razini etaže, što općenito pridonosi otpornosti na potres.

Odgovarajuće temeljenje neophodno je za prihvatanje svih učinaka potresnog djelovanja bez opasnosti od otkazivanja. Temelji u interakciji s temeljnim tlom (i u interakciji sa slojem XPS-a koji će biti analiziran u ovom radu) moraju biti odgovarajuće armirani i dimenzionirani kako bi bez oštećenja prenijeli potresne sile s konstrukcije u temeljno tlo.[20]

10.1.Princip modeliranja potresno opterećenih konstrukcija

Prilikom modeliranja konstrukcije potrebno je u numerički model ugraditi odgovarajuću raspodjelu masa i krutosti kako bi proračun inercijalnih sila i vlastitih oblika titranja bio što točniji, odnosno kako bi u što većoj mjeri odgovarao izvedenom stanju konstrukcije. Kroz model bi bilo preporučljivo u tom kontekstu uvažiti i utjecaje sekundarnih nenosivih elemenata koji imaju utjecaj na ukupni odziv glavnog nosivog sustava.

Od pojednostavljenja modela u pravilu se primjenjuju sljedeći naputci. U slučaju vrlo velike krutosti dijafragme stropova zgrade u odnosu na vertikalne elemente, mase i momenti tromosti svake etaže mogu se koncentrirati u njihovom središtu. Nadalje, kod konstrukcija koncipiranih po kriterijima pravilnosti u tlocrtu, proračun se može provesti primjenom dvaju ravninskih modela, uobičajeno jedan za svaki smjer.

Osim kod vrlo točnih proračuna, raspucanost elementa pretpostavlja se prema teoriji elastičnosti. Pri tome se dopušta da je krutost $1/2$ odgovarajuće krutosti neraspucalog presjeka.

10.2. Metode proračuna

Postoje dvije metode proračuna, linearna statička metoda i nelinearna dinamička metoda.

Linearne statičke metode mogu se proračunavati na dva načina:

- Linearni statički proračun primjenom ekvivalentnog statičkog djelovanja,
- Linearni dinamički proračun spektrima odgovora. [20]

Nelinearne dinamičke metode mogu se proračunavati na dva načina:

- Nelinearna statička metoda postupnog guranja,
- Nelinearni dinamički proračun uporabom zapisa ubrzanja u vremenu (time history). [20]

Nelinearni proračun koristi se u slučajevima kada je potrebno zbog relevantnosti rezultata proračuna modela u obzir uzeti nelinearno ponašanje materijala i geometrije promatrane konstrukcije. Time se također podrazumijeva da se krutost u armiranobetonskim i zidanim zgradama nelinearno-elastičnog dijagrama sila-deformacija definira na osnovu raspucanog presjeka. Također krutost onih elemenata čelika koja obuhvaća i plastične deformacije treba zamijeniti sekantnom krutošću do granice popuštanja. Nadalje, kod nelinearnog proračuna treba uzeti u obzir uzdužne sile u elementima kod određivanja dijagrama sila-deformacija.

Linearno-elastični proračun konstrukcije, ovisno o razredu važnosti zgrade, može se provoditi primjenom dvaju ravninskih modela iako kriteriji za pravilnost u tlocrtu nisu zadovoljeni. Međutim, da bi takva primjena ravninskih modela bila zadovoljavajuća, pretpostavlja se da su ispunjeni sljedeći kriteriji:

- zgrada treba imati dobro raspoređen i relativno krut omotač (vanjski zidovi) kao i pregrade,
- visina zgrade ne smije prelaziti 10 metara,
- krutost stropova mora biti dovoljno velika u odnosu na bočne krutosti vertikalnih elemenata konstrukcije, tako da se njihova ponašanja mogu pretpostaviti u proračunu kao zadovoljavajuće kruto,
- središta bočne krutosti i masa svih stropova trebaju biti približno na vertikalnom pravcu i u oba horizontalna smjera proračuna zadovoljavati uvjete:

$$r_x^2 > I_s^2 + e_{ox}^2 \quad (18)$$

$$r_y^2 > I_s^2 + e_{oy}^2 \quad (19)$$

gdje je:

I_s - radijus rotacije,

r_x i r_y - torzijski učinci,

e_{ox} i e_{oy} - ekscentričnosti.

Zgrade koje nisu u skladu s prethodno navedenim kriterijima moraju se računati prostornim modelom. [20]

10.2.1. Metoda proračuna bočnih sila

Ovaj način modeliranja utjecaja potresnog djelovanja na konstrukciju aplicira se kod konstrukcija čiji odziv nije značajno osjetljiv na doprinose oblika oscilacija većih od osnovnog oblika u svakom od glavnih smjerova. Dakle, zgrade koje se mogu modelirati na taj način moraju zadovoljiti sljedeća dva uvjeta:

- Osnovni period oscilacija T_1 mora biti u oba glavna smjera manji od:

$$T_1 < 4T_1 < 2,0 \text{ s}$$

- Ispunjava prethodno navedene kriterije pravilnosti u vertikalnom presjeku

Tada se proračun zasniva na određivanju seizmičke bočne sile F_b za svaki razmatrani horizontalni smjer:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (20)$$

gdje je:

$S_d(T_1)$ - ordinata proračunskog spektra odziva kod osnovnog perioda T_1 ,

T_1 – osnovni period osciliranja konstrukcije,

m – ukupna masa konstrukcije iznad temelja koja odgovara seizmičkoj proračunskoj situaciji,

λ - korekcijski faktor vrijednosti:

- $\lambda = 0,85$ ako je $T_1 < 2T_c$ i za zgrade više od 2 kata
- $\lambda = 1,0$ za druge primjere.

Nakon proračuna seizmičke bočne sile, određuje se raspodjela horizontalnih seizmičkih sila. Osnovna deformacija sustava u horizontalnim smjerovima može se odrediti primjenom dinamičkog proračuna za konstrukcije ili na osnovi pretpostavke linearnog povećanja pomaka s visinom.

Horizontalne sile potresa F_i tada se dobiju prema izrazu:

$$F_i = F_b \frac{S_i \cdot m_i}{\sum S_j \cdot m_j} \quad (21)$$

gdje su:

S_i, S_j – pomaci masa m_i i m_j u osnovnom deformiranom stanju sustava,

m_i, m_j – mase katova „i“ i „j“.

Kada se osnovni oblik deformiranja zamijeni linearnim oblikom, horizontalne sile F_i se dobiju prema izrazu:

$$F_i = F_b \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \quad (22)$$

gdje su:

S_i, S_j – pomaci masa m_i i m_j u osnovnom deformiranom stanju sustava,

z_i, z_j – visine masa m_i i m_j iznad gornje razine temelja.

Tada se horizontalne sile raspodjeljuju na bočno nosivi sustav uz pretpostavku apsolutno krutog stropa u svojoj ravnini.[20]

10.2.2. Model sustava s jednim stupnjem slobode

Oscilacije koncentrirane mase uzrokovane su kretanjem tla iskazanog u obliku vremenskog zapisa ubrzanja tla. Javlja se na mjestu pričvršćenja sustava za podlogu. Ukupni pomak konstrukcije sastoji se od pomaka uslijed deformacije konzole (relativni pomak) i pomaka tla gdje se cijeli sustav pomiče iz prvobitnog u novi položaj.

m – koncentrirana masa s 1SS,

c – prigušenje,

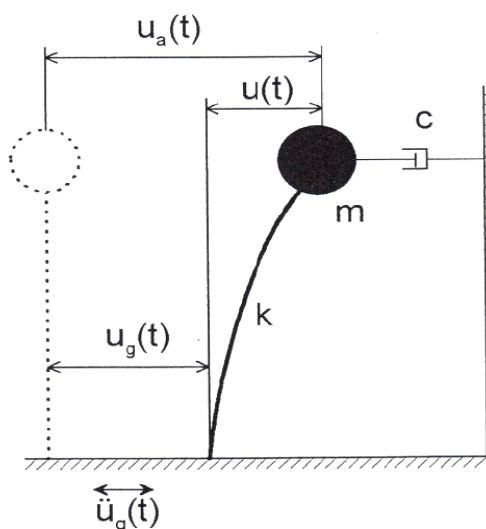
k – krutost,

u_a – ukupni pomak,

u – ukupni pomak,

u_g – pomak tla,

\ddot{u}_g – ubrzanje tla.



Slika 27. Sustav s koncentriranom masom, izložen ubrzanju tla [20]

Uvjet ravnoteže sile:

$$m \cdot \ddot{u}_a + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = 0 \quad (23)$$

Ukupni pomak tla:

$$u_a = u + u_g \quad (24)$$

Ukupno ubrzanje mase:

$$\ddot{u}_a = \ddot{u} + \ddot{u}_g \quad (25)$$

$$m \cdot (\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = 0 \quad (26)$$

Na koncentriranu masu djeluju sljedeće sile:

- $k \cdot u$ - elastična sila (sila naprezanja), proporcionalna relativnom pomaku,
- $c \cdot \dot{u}$ - sila prigušenja, proporcionalna relativnoj brzini,
- $m \cdot \ddot{u}_a$ - sila inercije, proporcionalna apsolutnom ubrzanju. [20][21][22]

10.2.3. Diferencijalna jednadžba sustava s jednim stupnjem slobode

Seizmička sila:

$$m \cdot \ddot{u}_a + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = -m \cdot \ddot{u}_g \quad (27)$$

Ukoliko se prethodni izraz podijeli s masom, poprima se standardni oblik:

$$\ddot{u}_a + 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{u} + \omega^2 \cdot u = -\ddot{u}_g \quad (28)$$

gdje su:

$\omega = \sqrt{k/m}$ – kružna frekvencija nprigušenih oscilacija,

$\xi = \frac{c}{2m\omega}$ – mjera prigušenja,

$f = \frac{\omega}{2\pi}$ – vlastita frekvencija osciliranja,

$T = 1/f$ – vlasiti oblik titranja.

Rješenje diferencijalne jednadžbe je Duhamel-ov integral:

$$u(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) \cdot e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cdot \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (29)$$

$u(t)$ – vremenski tok relativnog pomaka promatranog sustava sa jednom masom.

Za konstruiranje spektra odgovora izdvajaju se apsolutne maksimalne veličine pomaka, brzine i ubrzanja sa jednom masom.

Maksimalni pomak dobije se iz izraza:

$$u_{max}(t) = \left[\frac{1}{\omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}} \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cdot \sin \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}(t-\tau) d\tau \right] max. \quad (30)$$

Maksimalna brzina dobije se iz izraza:

$$\dot{u}_{max} = \left[- \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cdot \cos \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}(t-\tau) d\tau + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cdot \sin \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}(t-\tau) d\tau \right] max \quad (31)$$

Maksimalno ubrzanje dobije se iz izraza:

$$\left[\ddot{u} + \ddot{u}_g \right] = \left[\frac{\omega_n \cdot (1-2\xi^2)}{\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^t a(\tau) \cdot \sin \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}(t-\tau) d\tau + 2\xi\omega_n \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cdot \cos \omega_n \cdot \sqrt{1-\xi^2}(t-\tau) d\tau \right] max \quad [20][21][22] \quad (32)$$

10.2.4. Modalni proračun spektralnog odziva

Primjena ovog načina modeliranja konstrukcije na potres praktična je za one zgrade koje ne zadovoljavaju uvjete za primjenu proračunskog modela baziranog na metodi proračuna bočnih sila.

Dakle, kod razmatranja spektralnog odziva, najvažnija karakteristika ove vrste proračuna je uzimanje odgovora svih oblika osciliranja u obzir pri tvorbi globalnog odziva konstrukcije. Ako je uzet u obzir odgovor svih oblika osciliranja, tada će biti zadovoljeni sljedeći kriteriji:

- Suma djelotvornih modalnih masa za oblike uzete u proračun iznosi minimalno 90% ukupne mase konstrukcije
- U obzir se moraju uzeti svi oblici s djelotvornom modalnom masom većom od 5% ukupne mase

U slučajevima kada prethodni zahtjevi ne mogu biti zadovoljeni, u slučaju značajnog doprinosa torzijskih modova, minimalni broj „k“ oblika osciliranja kod prostornog proračuna treba zadovoljiti:

$$k \geq 3\sqrt{n} \quad (33)$$

$$T_k \leq 0,20 \text{ s} \quad (34)$$

gdje je:

k – broj promatranih oblika osciliranja,

n – broj katova iznad temelja,

T_k – period osciliranja oblika „k“. [20]

Maksimalni odziv konstrukcije uslijed djelovanja potresa jednak je kombinaciji maksimalnih pojedinačnih doprinosa svakog vlastitog oblika pri čemu se ne uzimaju u obzir vremenski koraci kod kojih je postignuta maksimalna vrijednost. [23]

Nakon što se izračunaju vrijednosti vršnih vrijednosti modalnih odziva r_{n0} , potrebno je odrediti ekstreme ukupnog odziva r_0 kao:

$$r_0 = \max |r(t)| \quad (35)$$

gdje je $r(t)$ odgovor konstrukcije u vremenu.

Ako su r_{n0} određeni primjenom spektra, vrijeme nastupa nije poznato, iz čega slijedi da su za međusobno kombiniranje nužne aproksimacije:

a) ABSSUM – pravilo apsolutne sume

- sve vršne vrijednosti su istih predznaka i nastupaju istodobno

$$r_0 \approx \sum_{n=1}^N |r_{n0}| \quad (36)$$

- izrazito konzervativna i neekonomična pretpostavka te se rijetko koristi u inženjerskoj praksi

b) SRSS – pravilo drugog korijena sume kvadrata

- pokazuje dobre rezultate za konstrukcije s dobro razmaknutim periodima
- loša procjena za konstrukcije s bliskim periodima

$$r_0 \approx \sqrt{\sum_{n=1}^N |r_{n0}|^2} \quad (37)$$

c) CQC – pravilo potpune kvadratne kombinacije

- pretpostavka umnoška vršnih vrijednosti i -tog i n -tog oblika i korelacijskog faktora ρ_{in} za ta dva oblika

$$r_0 \approx \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} r_{i0} r_{n0}} \quad (38)$$

gdje vrijedi: $0 \leq \rho_{in} \leq 1$ i $\rho_{in} = 1$ za $i = n$

- korelacijski faktor ρ_{in} dobije se prema izrazu:

$$\rho_{in} = \frac{8\sqrt{\zeta_i \zeta_n} (\beta_{in} \zeta_i + \zeta_n) \beta_{in}^{3/2}}{(1 - \beta_{in}^2)^2 + 4\zeta_i \zeta_n \beta_{in} (1 + \beta_{in}^2) + 4(\zeta_i^2 + \zeta_n^2) \beta_{in}^2} \quad (39)$$

gdje je:

$$\beta_{in} = \omega_i / \omega_n$$

ζ_i, ζ_n - faktori prigušenja za i -ti i n -ti oblik titranja.[22]

10.2.5. Nelinearni statički proračun

Nelinearni statički proračun je metoda koja se primjenjuje kod slučaja konstantnog gravitacijskog opterećenja u kombinaciji s monotonim postupnim povećanjem horizontalnih sila. Metoda je primjenjiva na postojeće konstrukcije za:

- provjeru povišene nosivosti omjera vrijednosti $\alpha_u / \alpha_1 = 1,1$ ili $1,3$,
- procjenu svojstava konstrukcija postojećih ili obnovljenih zgrada,
- određivanje plastičnog mehanizma i raspodjele oštećenja konstrukcije,
- analizu konstrukcije na osnovi linearno elastičnog proračuna koji primjenjuje faktor ponašanja q . U tom slučaju seizmički zahtjevan pomak, dobiven iz elastičnog spektra odziva, treba primijeniti kao osnovni podatak proračuna.[20]

10.2.6. Nelinearni dinamički proračun

Ova metoda proračuna konstrukcija upotrebljava se u slučajevima kada se ostale jednostavnije metode ne mogu primijeniti. To znači da postoje konstrukcije koje svojim svojstvima spadaju u grupu „neregularnih konstrukcija“. Primjeri takvih konstrukcija su sljedeći:

- konstrukcije podložne ljuljanju uslijed potresnog opterećenja,
- konstrukcije temeljene na sloju potresne izolacije,
- konstrukcije s dodatnim prigušenjem,
- konstrukcije opterećene udarnim opterećenjem,
- kaskadno temeljene konstrukcije,
- konstrukcije s velikim promjenama krutosti po visini presjeka,
- konstrukcije s fleksibilnom membranom,
- postojeće konstrukcije s nejasnim sustavom prijenosa sila potresa.[24]

Kod nelinearnih dinamičkih proračuna opterećenje se promatra kao vremenski ovisan parametar. Također upotrebljava se nelinearan materijalni dijagram naprezanje – deformacija.

11. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je podloga svakog numeričkog softvarea, komercijalnog i nekomercijalnog, a ima se priliku koristiti u rješavanju problema fizikalne naravi u okruženju.

Metoda konačnih elemenata temelji se na ideji podjele materijalnog kontinuuma na elemente konačnih dimenzija. Svaki konačni element u toj podjeli sastoji se od sustava jednažbi međusobno povezanih sa susjednim elementima. Njihova uzajamnost realizira se odgovarajućim uklapanjem sustava jednažbi svakog elementa u globalni sustav jednažbi. Takav zapis omogućuje da na jednom mjestu, u jednom sustavu jednažbi postoji sažeti cijeli problem definiran matematičkim sredstvom koje je izuzetno pogodno za računalno rješavanje, odnosno programiranje postupaka rješavanja.

11.1. Proračun konstrukcije pomoću metode konačnih elemenata

Diskretizacija područja osnovni je korak proračuna metodom konačnih elemenata. To se ostvaruje podjelom na mrežu konačnih elemenata. U odnosu na stvarno ponašanje konstrukcije javljaju se dva tipa pogreške, pogreške diskretizacije i pogreške modela. Pogreška modela smanjuje se boljim modelom konstrukcije koji će kvalitetnije opisivati stvarno ponašanje konstrukcije. Pogreška diskretizacije smanjuje se kvalitetnijom mrežom konačnih elemenata ili povećanjem stupnjeva slobode (pomoću polinoma višeg stupnja) konačnih elemenata za opis polja pomaka. [25]

11.2. Izbor konačnog elementa

Osnovni uvjet za izbor polja pomaka je neprekidnost duž konačnog elementa. Polinomialna aproksimacija nepoznatog polja izravno ispunjava potreban uvjet neprekidnosti te treba imati derivaciju reda koji se javlja u podintegralnoj funkciji za dobivanje elementarne matrice krutosti. Njena funkcija treba biti primitivna funkcija. Za integriranje podintegralne funkcije nužno je definirati vezu s redom derivacije u formulaciji

rubne zadaće primjenom principa virtualnog rada. Kad se u principu virtualnog rada za pripadnu rubnu zadaću javlja m -ta derivacija polja pomaka, polje pomaka treba imati neprekidnu derivaciju $(m - 1)$ reda te mora biti klase C^{m-1} na području gdje je definirana rubna zadaća. Najjednostavniji primjeri su uzdužno i poprečno opterećena greda. [25]

11.3. Greške rješavanja metodom konačnih elemenata

11.3.1. Greške diskretizacije i greške aproksimacije geometrije

Greška diskretizacije jednakog je reda potenciji izostavljenog člana Taylorovog reda. Za jednodimezionalnu zadaću uz polinimalnu aproksimaciju polinomom m stupnja greška iznosi

$$err = CL^{(e)m+1}M_{(m+1),(e)} \quad (40)$$

gdje je:

$L^{(e)}$ duljina elementa (e),

$M_{(m+1),(e)}$ maksimalna vrijednost

$m+1$ derivacije na elementu (e),

C predstavlja konstantu ovisnu o tipu elementa.

Greška aproksimacije je većinom karakteristična za aproksimaciju zakrivljenih rubova poligonalnim rubom. Ako se rub aproksimacije ne poklapa sa stvarnim rubom, dobiveno rješenje je približno područje. Tako će uzimanjem više čvorova aproksimacija biti točnija. [25]

11.3.2. Greške povezane s definiranim zakonom ponašanja i greške proračuna

Greške povezane zakonom ponašanja posljedica su pogrešno definiranih svojstava materijala. Proračunske jednadžbe definirane su za elastično ponašanje materijala, a u stvarnosti ono nikad nije u potpunosti takvo već pod djelovanjem opterećenja odstupa od pretpostavki. One nekad mogu biti veće od svih drugih greški u proračunu ovom metodom.

Greške proračuna su greške algoritma definiranog u proračunskoj proceduri. Javljaju se kod numeričke integracije, kod rješavanja sustava jednačbi. Takve greške javljaju se zbog loše uvjetovanosti matrice sustava koja može biti izazvana već i malom promjenom krutosti ili vektora opterećenja. Veliki značaj ima i odbacivanje znamenki nakon nekog broja koje računalo pamti. To je svakako uočljivo kod operacija s brojevima bitno značajnog reda veličine. Uvjetovanost matrice može se izračunati prema izrazu:

$$condK = \frac{|\lambda_{max}|}{|\lambda_{min}|}, \quad (41)$$

gdje su λ_{max} i λ_{min} najveća i najmanja svojstvena vrijednost matrice K . [25]

11.4. Konačni element s četiri stupnja slobode

11.4.1. Nekompatibilni element

Prikazuje se na primjeru štapa na savijanje definiranjem koordinate funkcije u obliku kvadratnih parabola. Druga je derivacija tada konstanta, a prva derivacija je oblika pravca. Neprekidna je samo unutar elementa dok u čvorovima postoji skok. Prema Ritzovoj metodi takve funkcije nisu prihvatljive, ali u linearnoj kombinaciji daju parabolično rješenje progibne linije, poligonalni dijagram kuta zaokreta i djelomično konstantni dijagram momenata savijanja. Derivacijom dijagrama momenata savijanja dobiva se poprečnu silu. Na štapu postoje zadana četiri rubna uvjeta (pomak i kut zaokreta na krajevima štapa), a za definiciju parabole dovoljna su već tri. Na suprotnom kraju štapa tangenta mora biti horizontalna na koordinatnu funkciju, što znači da mora imati točku infleksije unutar raspona.

Dijagrami momenata savijanja i poprečnih sila imaju skokove, a to su mjesta gdje nisu zadovoljeni uvjeti ravnoteže. Povećanjem broja elemenata, neuravnoteženo opterećenje se smanjuje. Odustajanjem od uvjeta koje metoda zahtijeva, govori se o nekompatibilnim konačnim elementima. To su konačni elementi u dvjema ili trima dimenzijama kada je kompatibilnost funkcije pomaka zadovoljena samo u čvorovima, ali ne i duž bridova elementa. Progušćenjem mreže takvi elementi konvergiraju prema točnom rješenju. [26]

11.4.2. Kompatibilni element

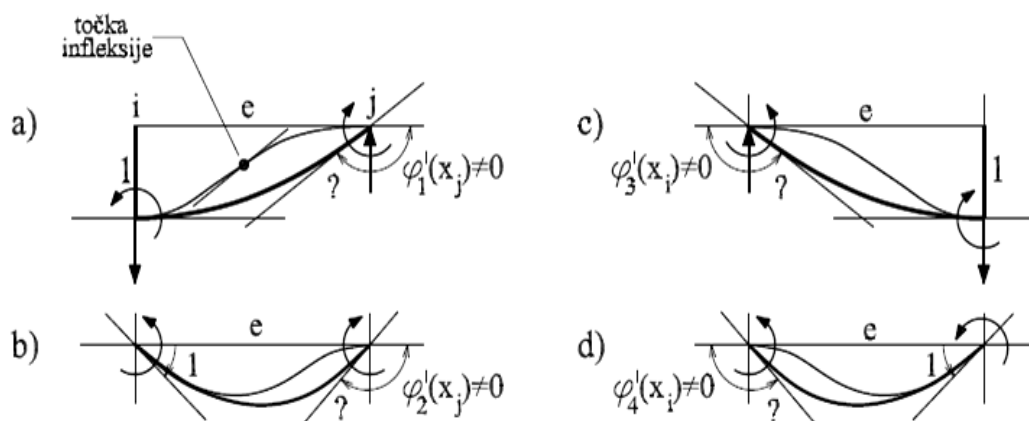
Da bi moment savijanja bio neprekidan i u čvorovima, koordinatne funkcije (slika 28.) moraju biti u obliku polinoma trećeg stupnja. Tada je prva derivacija parabola koja nema prekida u čvorovima. Opći oblik koordinatne funkcije i njene derivacije je:

$$\phi_i(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad \text{i} \quad \phi'_i(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 \quad (42)$$

Za četiri rubna uvjeta imamo četiri jednadžbe:

$$\begin{aligned} x = 0: & & x = 1: \\ \phi_1(0) = 1, (a_0 = 1), \phi_1(1) = 0, & (a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 0) \\ \phi'_1(0) = 0, (a_1 = 0) \phi'_1(1) = 0, & (a_1 + 2a_2 + 3a_3 = 0) \end{aligned} \quad (43)$$

S



Slika 28. Koordinatne funkcije u obliku kvadratne parabole

Kada su funkcije poznate, može se odrediti i druge derivacije tih funkcija te koeficijenti matrice krutosti štapa:

$$k_{ij}^{(e)} = \int_0^l EI_y \varphi_i'' \varphi_j'' dx \quad (44)$$

Jedino štapnim elementima pripadaju egzaktna matrice krutosti. Članovi matrice krutosti dobiveni su točnim rješenjem diferencijalne jednadžbe štapa za stanje prisilnih pomaka. Na isti su način određena i opterećenja na krajevima obostrano upetog štapa.

Rješenje štapnog modela zadovoljava uvjete ravnoteže, kompatibilnosti, rubne uvjete i zadana svojstva materijala u bilo kojoj točki štapa.[26]

11.5. Plošni konačni element

11.5.1. Pravokutni konačni element

Aproksimacijom membrane četverokutnim elementima, koordinatna se funkcija sastoji od vitoperih ploha. Radi se o pravčastoj plohi koja se u slučaju pravokutnog oblika elementa zove hiperbolni paraboloid. Kod takvih se funkcija pojavljuje i član xy , pa se čvor može pisati kao:

$$\phi_i(x, y) = a_0 + a_{1x} + a_{2y} + a_{3xy}. \quad (45)$$

Matrica sustava slabo je uvjetovana ako je četverokut blizak trokutu. Takve oblike izbjegavaju se težeći uvjetu da su sjecišta nasuprotnih stranica dovoljno daleko od rubova konačnog elementa. Za koordinatnu funkciju $\phi_i(x, y)$ vrijedi:

$$\phi_i(x_i, y_i) = 1, \phi_i(x_j, y_j) = 0, \phi_i(x_k, y_k) = 0, \phi_i(x_l, y_l) = 0 \quad (46)$$

gdje su i, j, k i l čvorovi konačnog elementa. [26]

11.5.2. Konačni elementi ploče

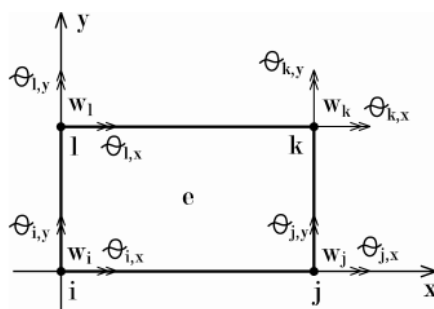
Kad se radi o ploči, osim neprekinutosti koordinatnih funkcija, mora biti neprekidna i prva derivacija funkcija u dvama okomitim smjerovima (zbog diferencijalne jednadžbe ploče):

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{f_z}{D}, \quad (47)$$

što znači da je $n=4$, pa se prema Ritzovoj metodi traži neprekinutost $n/2-1=1$. Kod ploče neprekinutost mora vrijediti i okomito na smjer bridova po kojima su konačni elementi spojeni, što nije lako ispuniti. Iako neki elementi ne zadovoljavaju potpuno neprekinutost, mogu se koristiti za modeliranje ploča. [26]

11.5.2.1. Pravokutni konačni elementi

Pri modeliranju ploče pravokutnim konačnim elementima kao što je prikazano na slici , javlja se problem s viškom nepoznanica. Za svaki čvor definira se pomak i dva zaokreta kao nepoznanice, što predstavlja dvanaest stupnjeva slobode po elementu, stoga je nužan polinom s dvanaest koeficijenata. Zaključak je da uz članove potpunog polinoma trećeg stupnja trebaju još 2 člana, a to su, zbog simetrije, najčešće $a_{31}x^3y$ i $a_{31}xy^4$ (polinom četvrtog stupnja).



Slika 29. Četverokutni konačni elementi za problem savijanja ploča

Oblik funkcije unutar elementa zapisuje se na sljedeći način:

$$w(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 + a_{31}x^3y + a_{13}xy^3. \quad (48)$$

Funkcija u smjeru brida ima oblika polinoma trećeg stupnja:

$$w(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{30}x^3 \quad (49)$$

Polinom se može odrediti iz četiriju poznata uvjeta: $w(0,0)$, $\partial w/\partial x(0,0)$, $w(x_j, 0)$, $\partial w/\partial x(x_j, 0)$. Budući da je derivacija polinom drugog stupnja koji je neprekidan, nema lomova u čvorovima, te se kaže da je element u smjeru brida kompatibilan. No, u smjeru normale na brid, dobiven je polinom trećeg stupnja:

$$\frac{\partial w}{\partial y}(x, y) = a_{01} + a_{11}x + 2a_{02}y + a_{21}x^2 + 2a_{12}xy + 3a_{03}y^2 + a_{31}x^3 + 3a_{13}xy^2 \quad (50)$$

Ako se uvrsti da za točke brida vrijedi $y = 0$, dobije se:

$$\frac{\partial w}{\partial y}(x, 0) = a_{01} + a_{11}x + a_{21}x^2 + a_{31}x^3 \quad (51)$$

Budući da su za jednoznačno definiranje polinoma potrebna četiri podatka, a postoje samo dva (zaokreti u smjeru normalne u čvorovima elementa $\partial w/\partial y(x_i, 0)$ i $\partial w/\partial y(x_j, 0)$), dolazi se do zaključka da su elementi kompatibilni samo u čvorovima. No, progušćivanjem mreže, smanjuju se razmaci među čvorovima, stoga će u limesu biti zadovoljena i kompatibilnost u smjeru normale te će se ovaj test moći uspješno koristiti za modeliranje ploča.[26]

12. Numerička analiza utjecaja XPS-a na svojstva konstrukcije

Kako bi se ustvrdio utjecaj XPS-a na odgovor konstrukcije pri dinamičkom potresnom opterećenju, izrađen je model konstrukcije postavljen na tlo definirano link elementom. Taj je model prozvan referentnim, te će se u odnosu na njega uspoređivati utjecaj XPS-a koji će također biti definiran link elementom postavljenim iznad definiranog tla. Utjecaj više vrsta XPS-a biti će razmatran u numeričkom modelu, što je vidljivo u tablici 1.

Tablica 8. *Varijacija parametara XPS-a*

	Debljine
1	12 (cm) - XPS 400 - L
2	24 (cm) - XPS 400 - L
3	10 (cm) - XPS 700 - L
4	20 (cm) - XPS 400 - L

*NAPOMENA: pri proračunu se podrazumijevalo da je korišten XPS naziva Seismic koji na gornjoj površini ima utore koji sprječavaju klizanje konstrukcije po površini XPS-a

Tablica 9. *Varijacija katnosti konstrukcije na području Zagreba u odnosu na parametre XPS-a*

Katnost	Zagreb			
	10	8	6	4
1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm
2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm
3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm
4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm

Tablica 10. *Varijacija katnosti konstrukcije na području Dubrovnika u odnosu na parametre XPS-a*

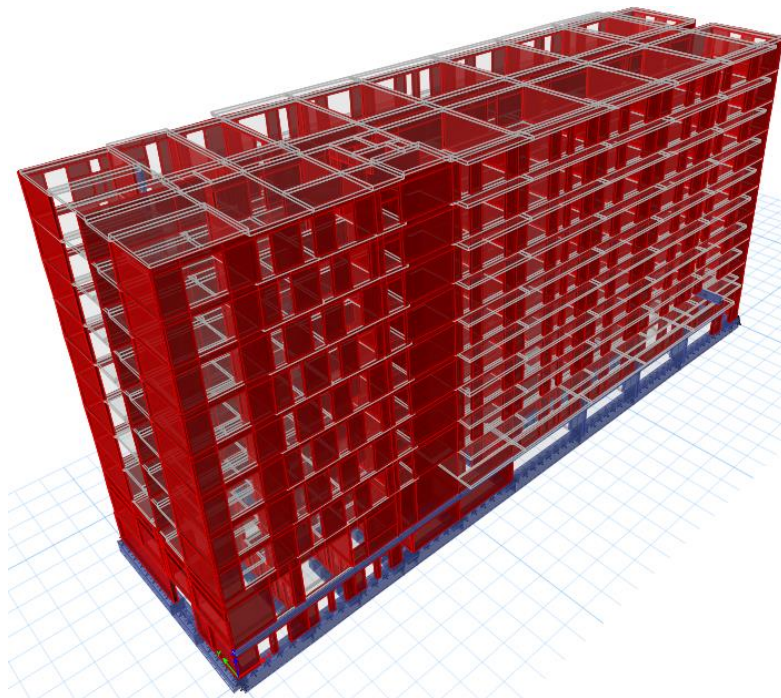
Katnost	Dubrovnik			
	10	8	6	4
1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm	1) 400 L - 12 cm
2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm	2) 400 L - 24 cm
3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm	3) 700 L - 10 cm
4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm	4) 700 L - 20 cm

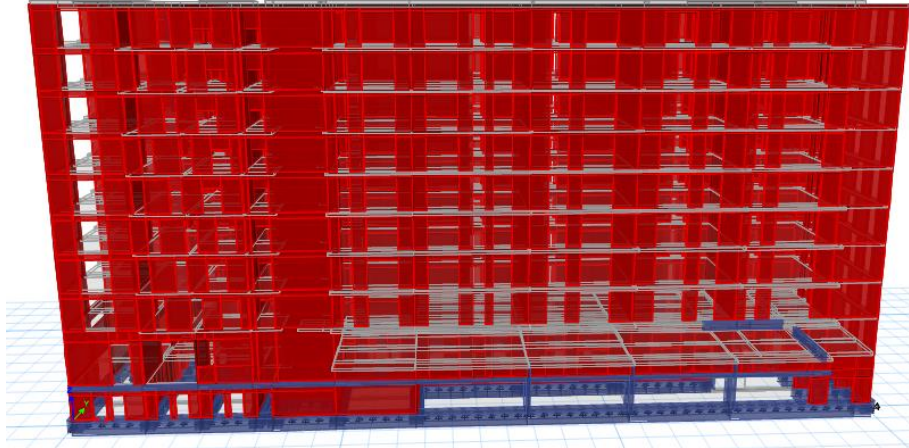
Konstrukcija je stambena zgrada od 10 katova čija će se katnost varirati kako bi se za različite visine, ali i težine zgrade dobio uvid u ponašanje uslijed interakcije sa slojem XPS-a. Osim katnosti, za sveobuhvatnije obuhvaćanje mogućih praktičnih slučajeva temeljenih na XPS-u, razmatrat će se konstrukcije temeljene na temeljnoj ploči i na trakastim temeljima. Nadalje, seizmički proračun bit će proveden za iste slučajeve zgrada za područje Zagreba i Dubrovnika, gdje se varijacija katnosti u odnosu na parametre XPS-a vidi u tablici 2. i tablici 3. Ta varijacija obuhvatit će utjecaj tipa tla i jačine potresnog ubrzanja tla na interakciju konstrukcije i XPS-a.

Naposljetku, u tablici 4. dani su parametri za uspoređivanje odziva konstrukcije uslijed temeljenja na slojevima XPS-a u odnosu na referentni model. Odabrani su ovi parametri za usporedbu iz razloga što je kod dimenzioniranja konstrukcije na potres mjerodavan moment u zidovima prizemlja, a modalni parametri ključni su za odgovor konstrukcije pri dinamičkom opterećenju, te njihovom promjenom dolazi do različitih odgovora konstrukcije na potres u vidu potresnih sila i vršnih pomaka.

Tablica 11. *Parametri za uspoređivanje*

Parametri za uspoređivanje		
Momenti u zidovima za potresnu kombinaciju	Modalni parametri konstrukcije	
Zidovi: P11, P1088, P1002	Period (s)	Modalni oblici





Slika 30. Numerički model konstrukcije (10 katova)

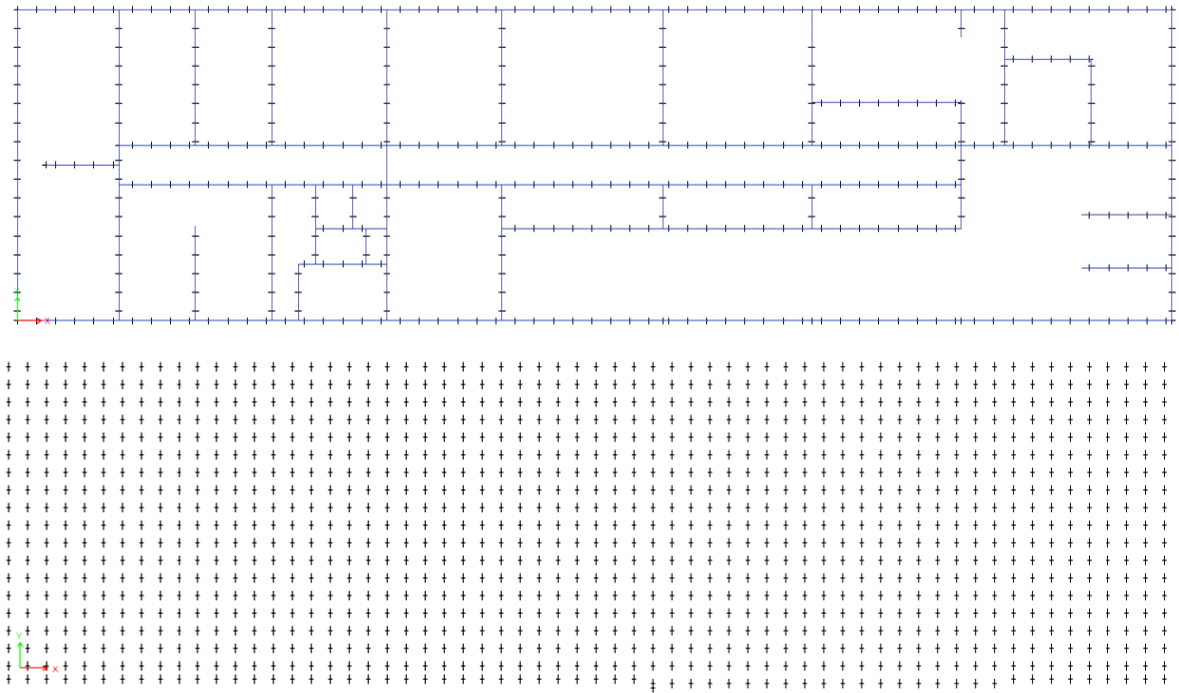
Da bi eksperiment bio potpun, analiza svih prethodno navedenih slučajeva bit će provedena na slojevima XPS-a različitih vertikalnih i posmičnih krutosti, te za različite visine tih slojeva.

Tablica 12. Krutosti XPS-a

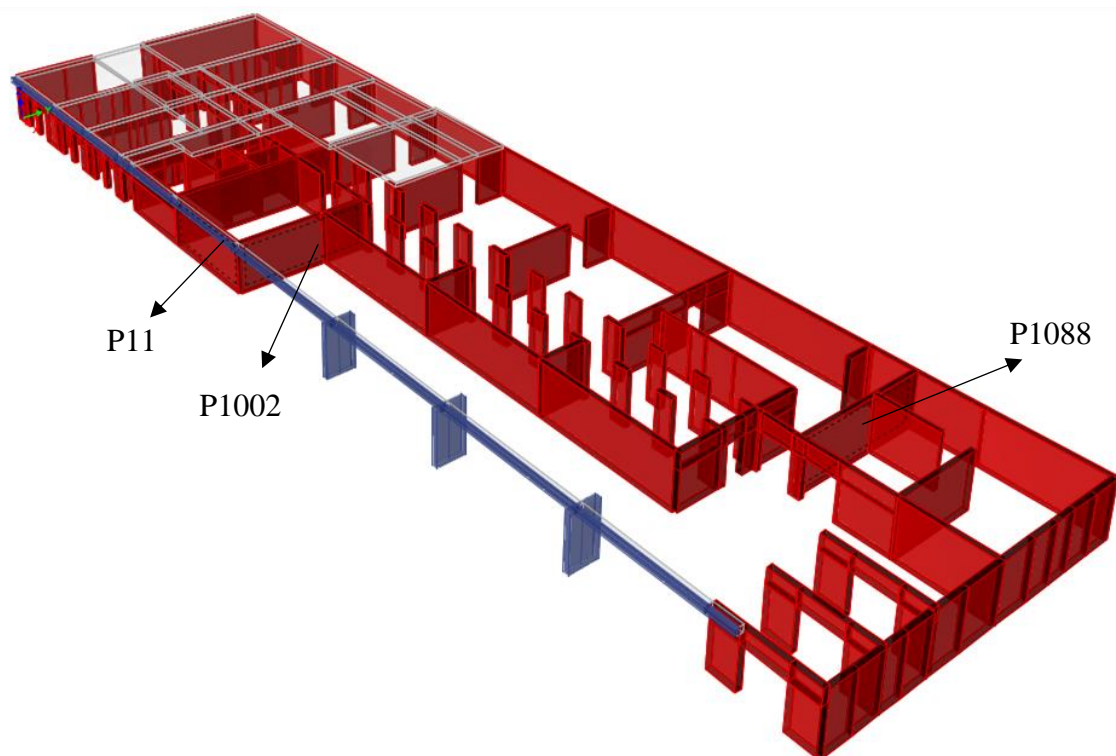
Tip XPS-a	Vertikalna krutost [kN/m]	Posmična krutost [kN/m]
400L – 12 cm	6667	854
400L – 24 cm	3333	427
700L – 10 cm	9523	1587
700L – 20 cm	4761	794

Tablica 13. Krutosti temeljnog tla

Lokacija	Vertikalna krutost [kN/m]
Zagreb (šljunak)	45 000
Dubrovnik (stijena)	150 000



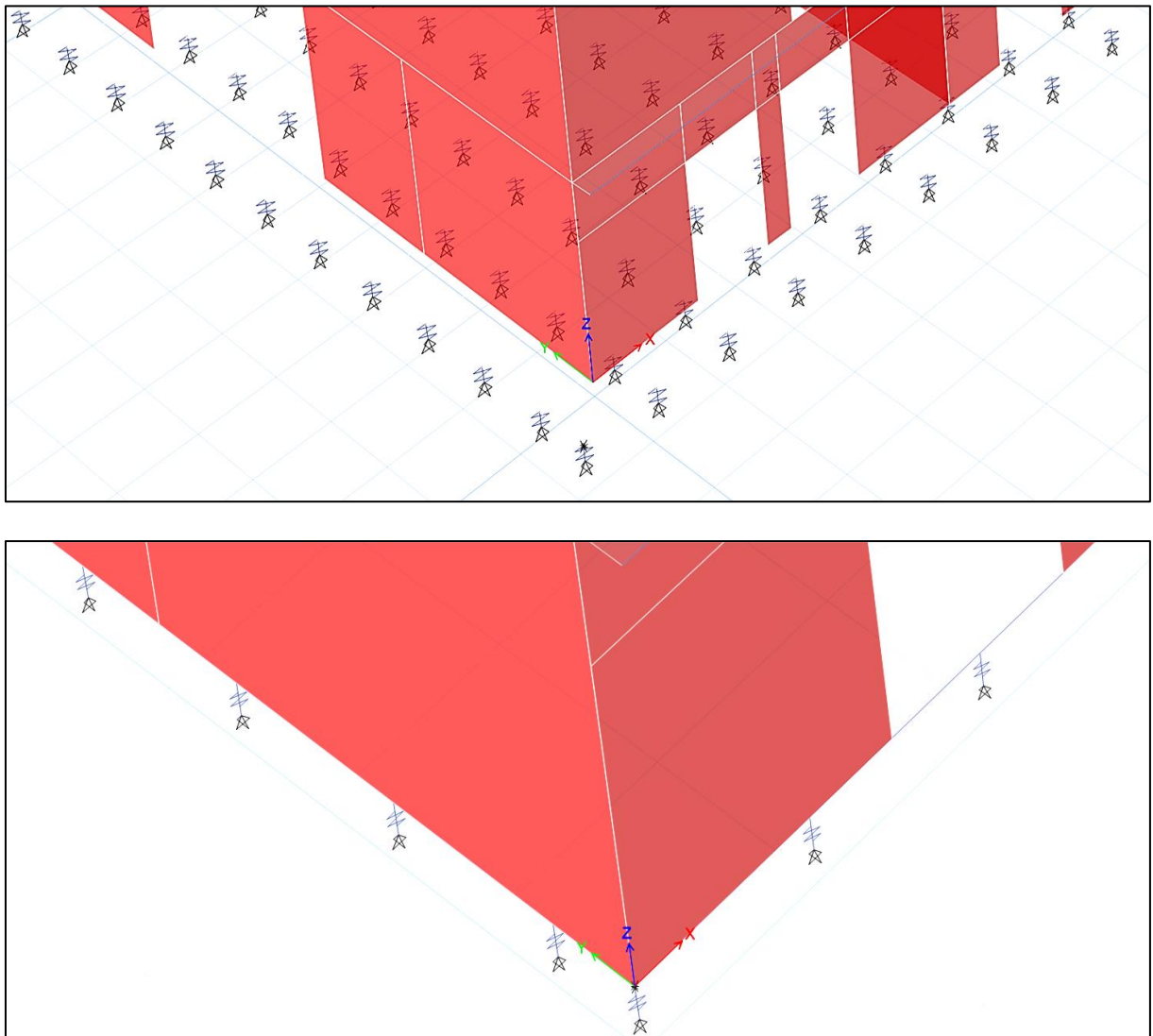
Slika 31. Raspored linkova XPS-a u odnosu na razmatrane vrste temeljenja: temeljna ploča(dolje) i trakasti temelj(gore)



Slika 32. Prikaz promatranih zidova prizemlja konstrukcije: P 11, P 1088, P 1002

12.1.Referentni numerički model temeljen na tlu bez sloja XPS-a

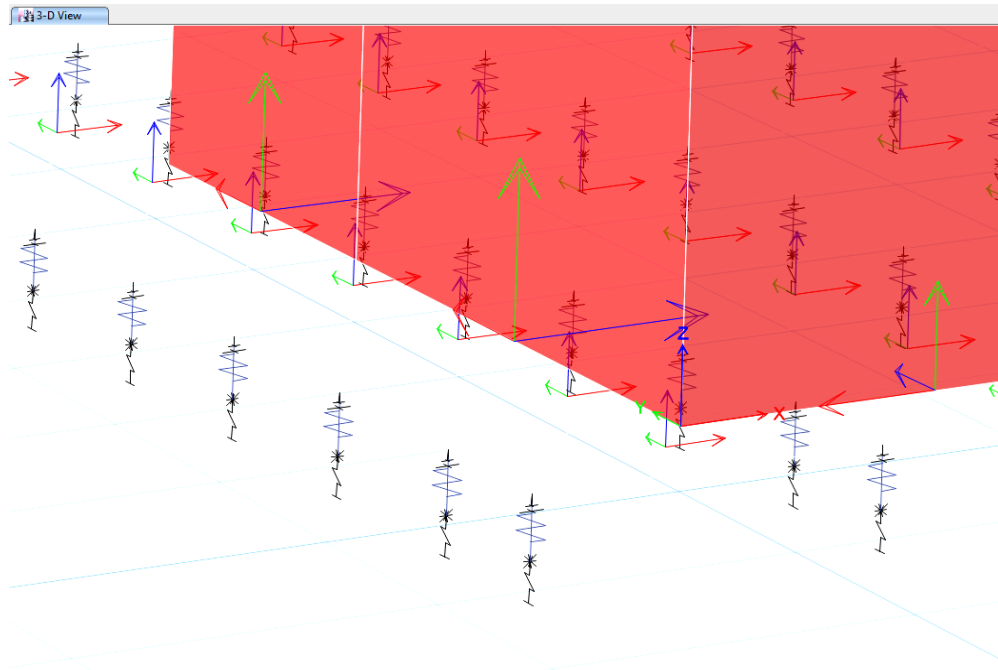
Za referentni model, temeljen samo na tlu bez utjecaja XPS-a, odabran je upravo slučaj čije je temeljnje modelirano prema slici 10, iz razloga što se praktički u svakom proračunskom modelu utjecaj XPS-a ne modelira. Dakle, svi ostali dobiveni rezultati uspoređivat će se s odgovarajućim referentnim modelom kako bi se jasno prikazao učinak modela koji uzima u obzir utjecaj XPS-a na svojstva konstrukcije.



Slika 33. Prikaz interakcije konstrukcije i tla bez utjecaja XPS-a za temeljnu ploču (gore) i trakasti temelj (dolje)

12.2. Model temeljen na sloju XPS-a iznad sloja tla

Modeli temeljeni na XPS-u (400L i 700L) u interakciji su s tlom preko sloja XPS-a definiranog s link elementom. Na slici 34. prikazan je način modeliranja spoja konstrukcija i tla preko sloja XPS-a.



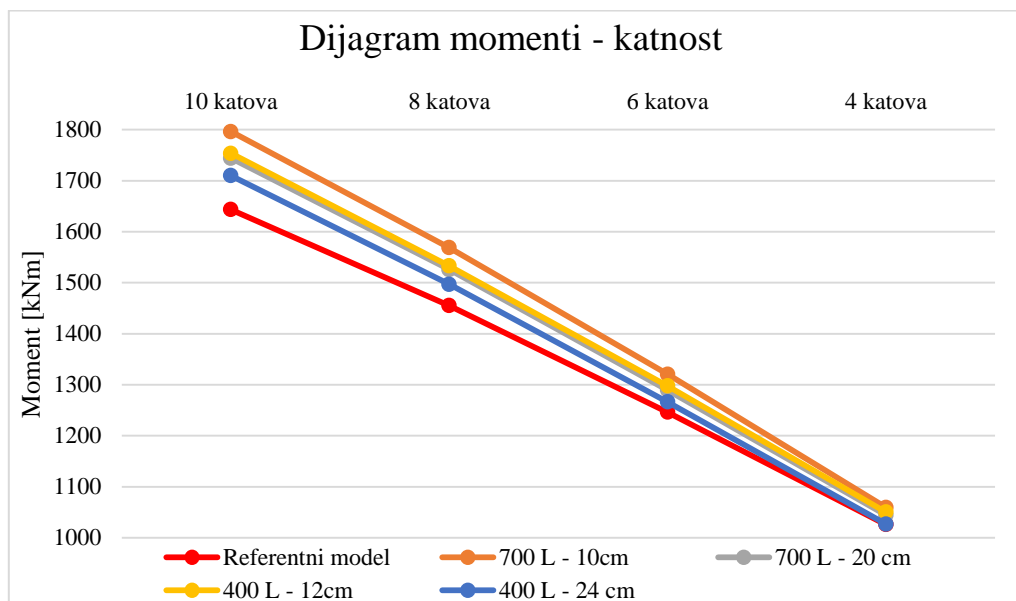
Slika 34. Prikaz interakcije konstrukcije i tla bez preko sloja XPS-a za temeljnu ploču (gore) i trakasti temelj (dolje)

12.3. Usporedba rezultata numeričkog proračuna referentnog modela i modela na sloju XPS-a

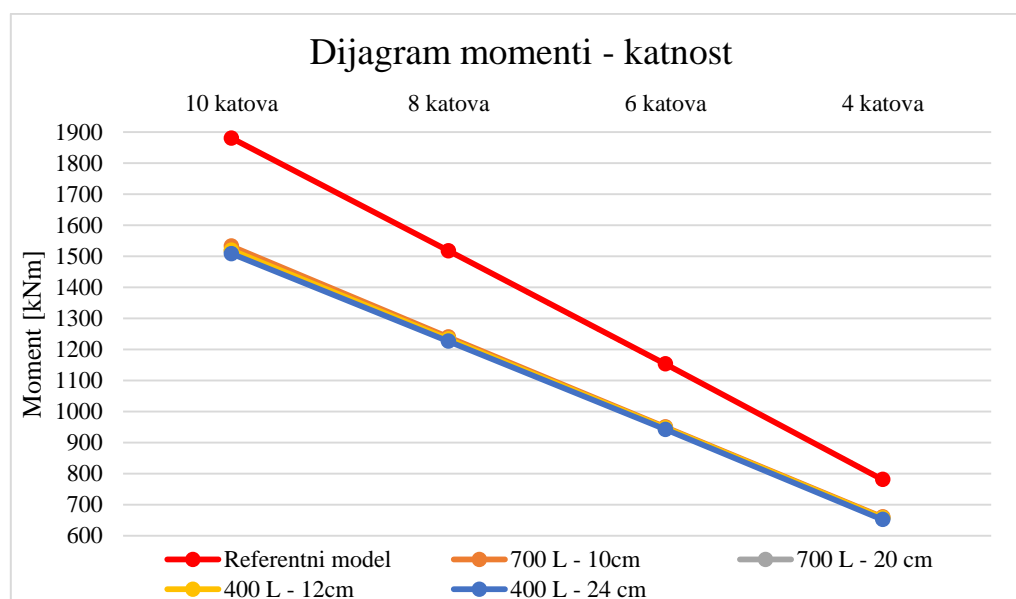
Kako bi se prikazao utjecaj XPS-a na dinamička svojstva konstrukcija i odgovor konstrukcije pri seizmičkoj pobudi, prikazat će se usporedba rezultata modalnih parametara i potresnih momenata u zidovima prizemlja između odgovarajućih referentnih modela i modela položenih na sloju XPS-a za sve varijante prethodno navedenih kombinacija parametara.

12.3.1. Usporedba rezultata za područje Zagreba i temeljnu ploču

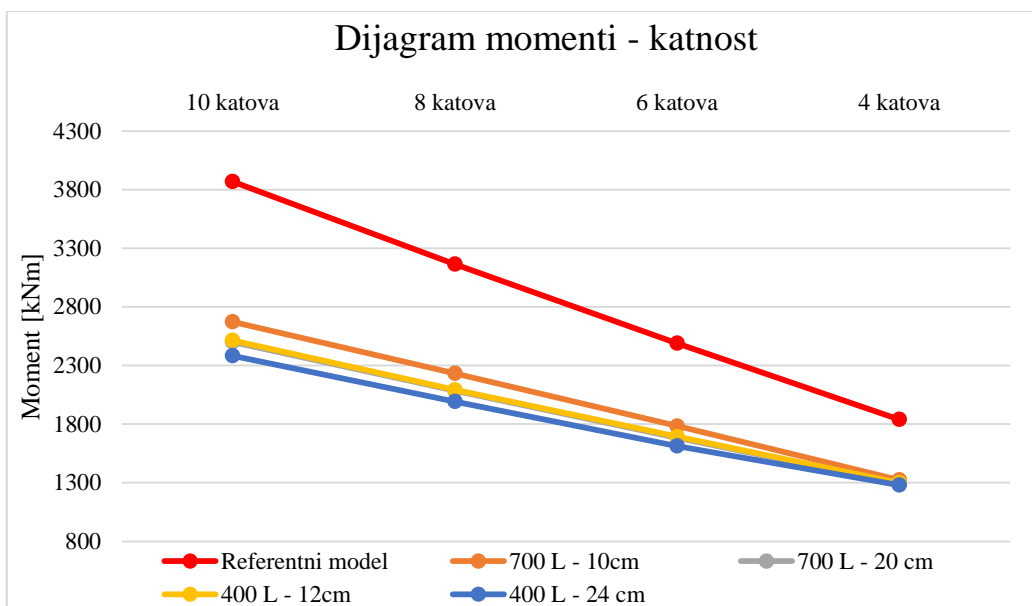
- Usporedba potresnih momenata u zidovima



Slika 35. Dijagram momenti – katnost za zid P11

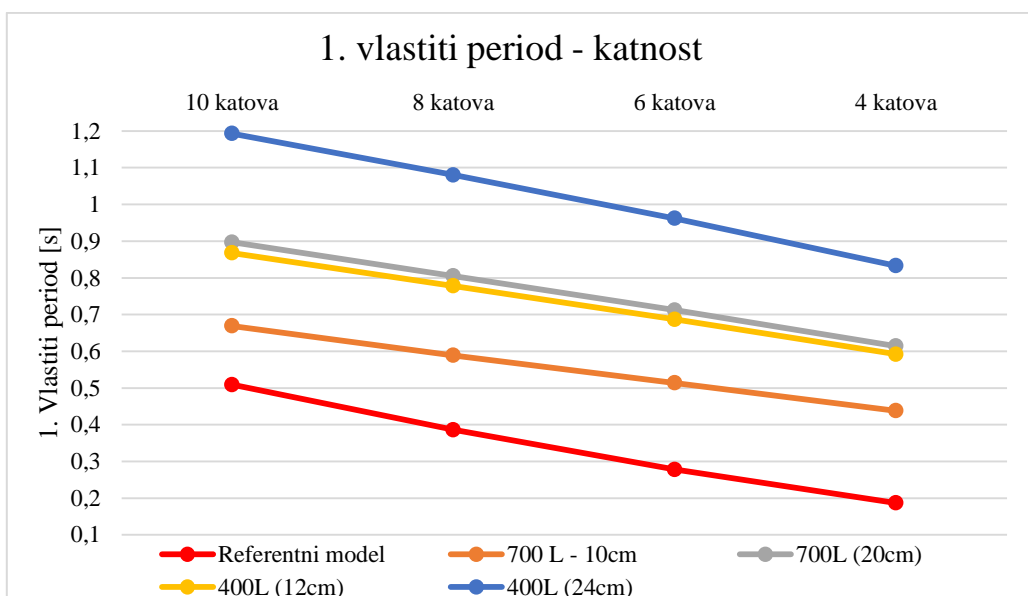


Slika 36. Dijagram momenti – katnost za zid P1088

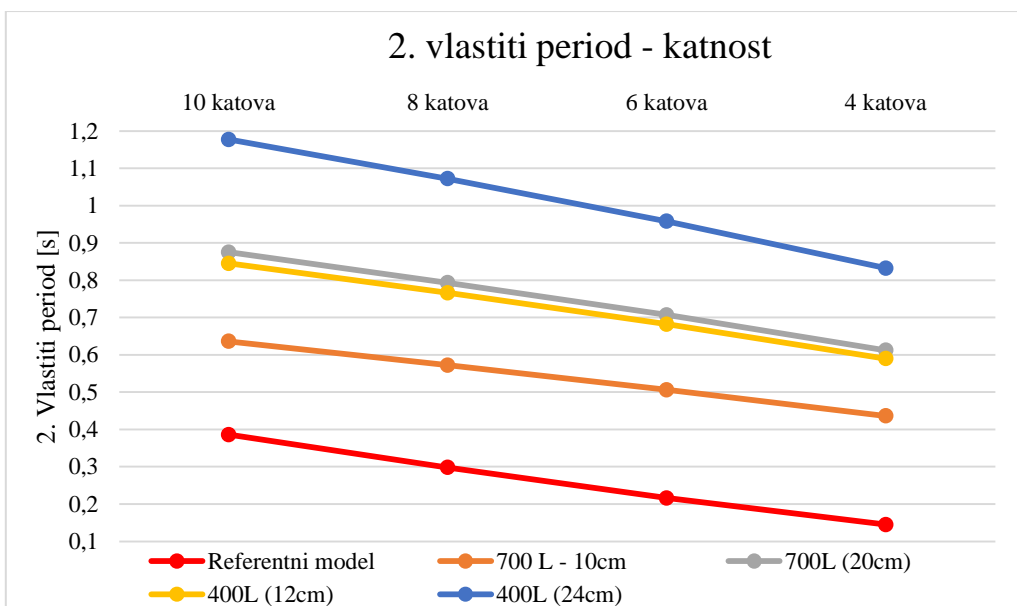


Slika 37. Dijagram momenti – katnost za zid P1002

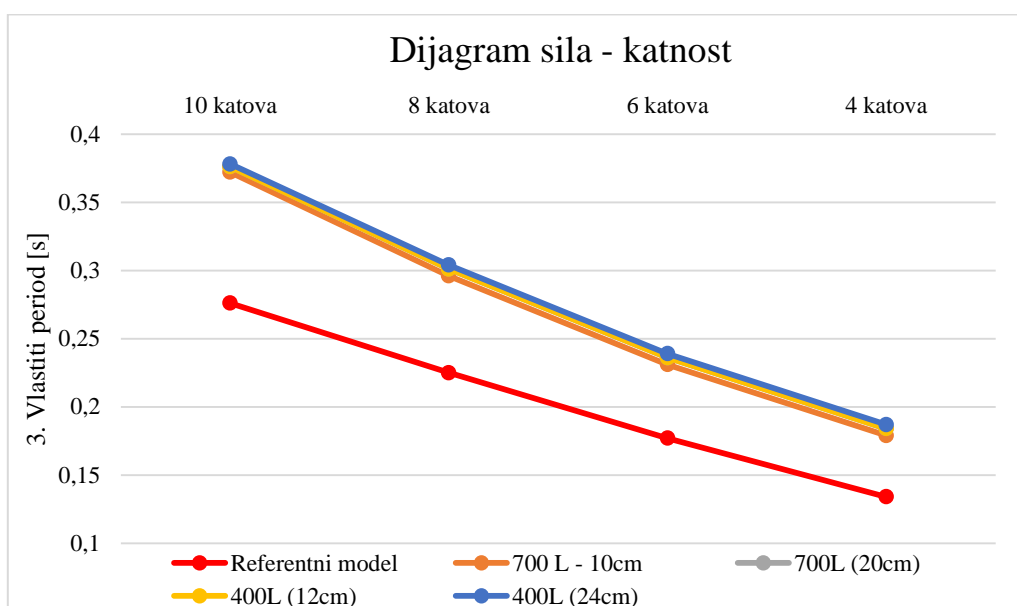
- Usporedba vlastitih perioda



Slika 38. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period



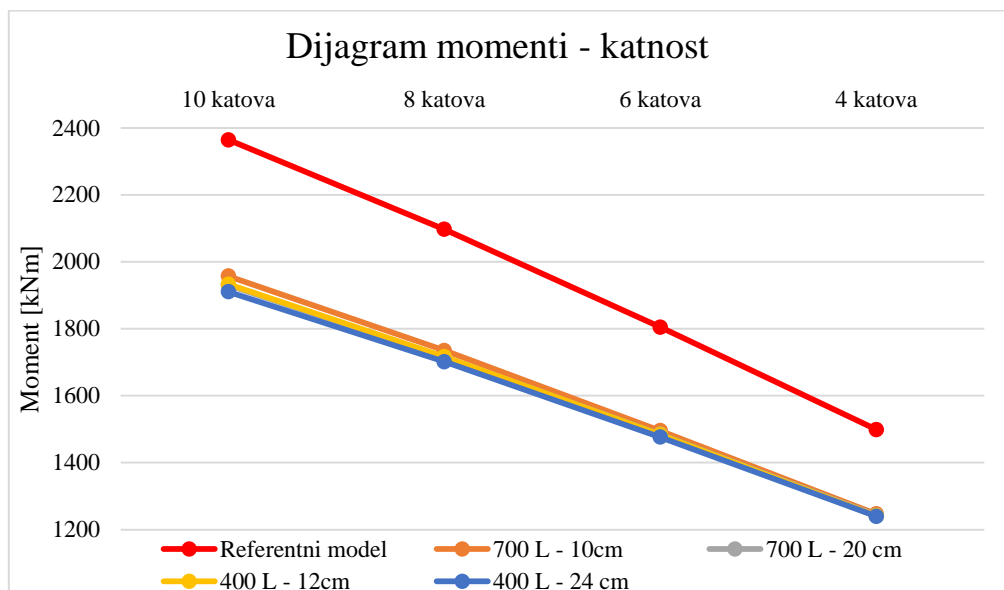
Slika 39. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period



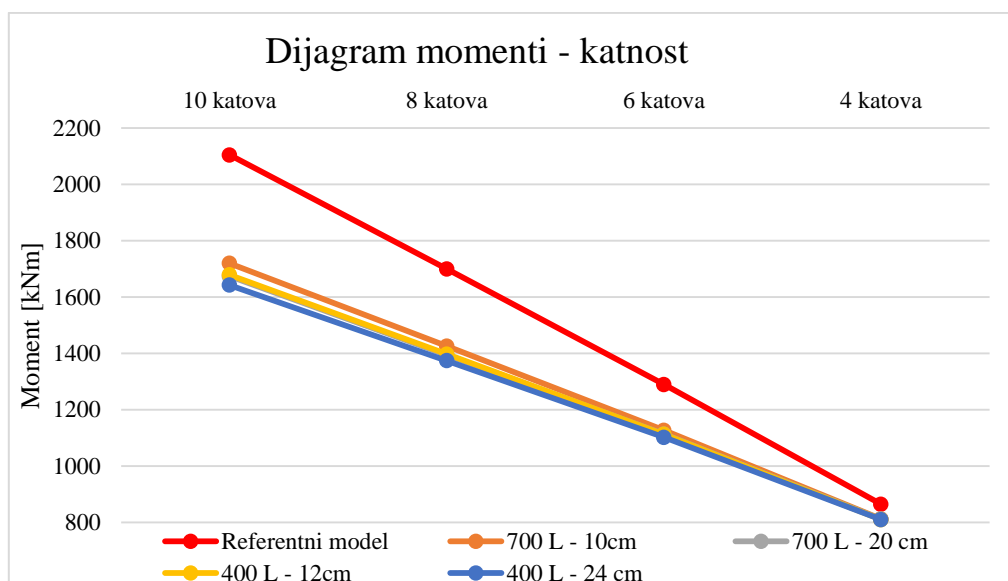
Slika 40. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period

12.3.2. Usporedba rezultata za područje Zagreba i trakasti temelj

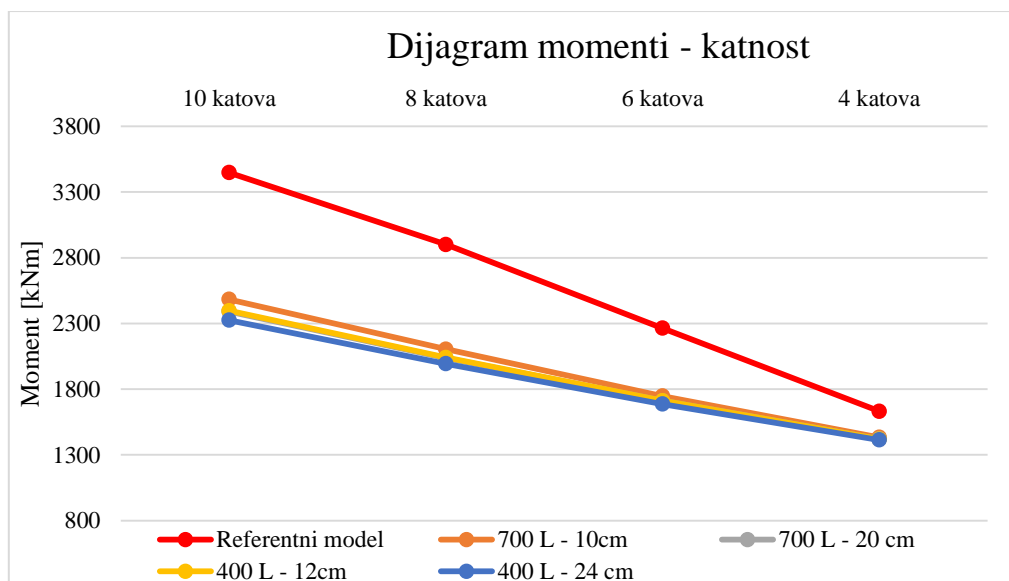
- Usporedba potresnih momenata u zidovima



Slika 41. Dijagram momenti – katnost za zid P11

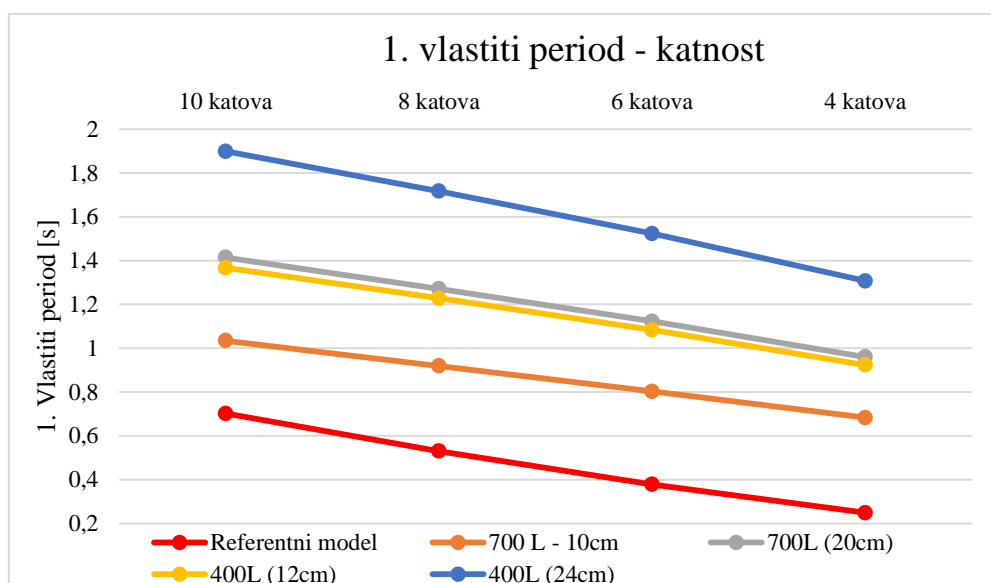


Slika 42. Dijagram momenti – katnost za zid P1088

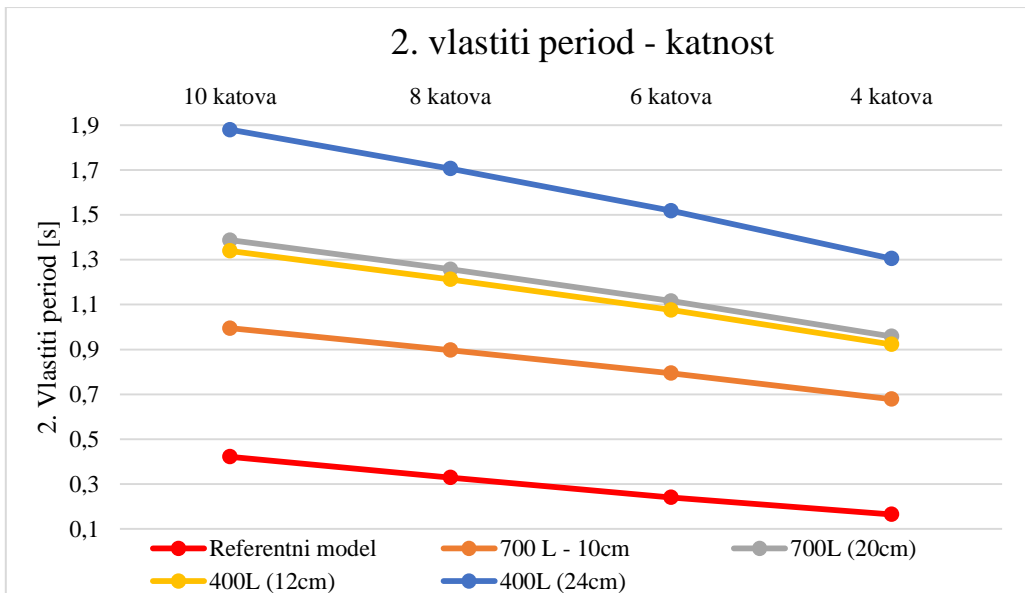


Slika 43. Dijagram momenti – katnost za zid P1002

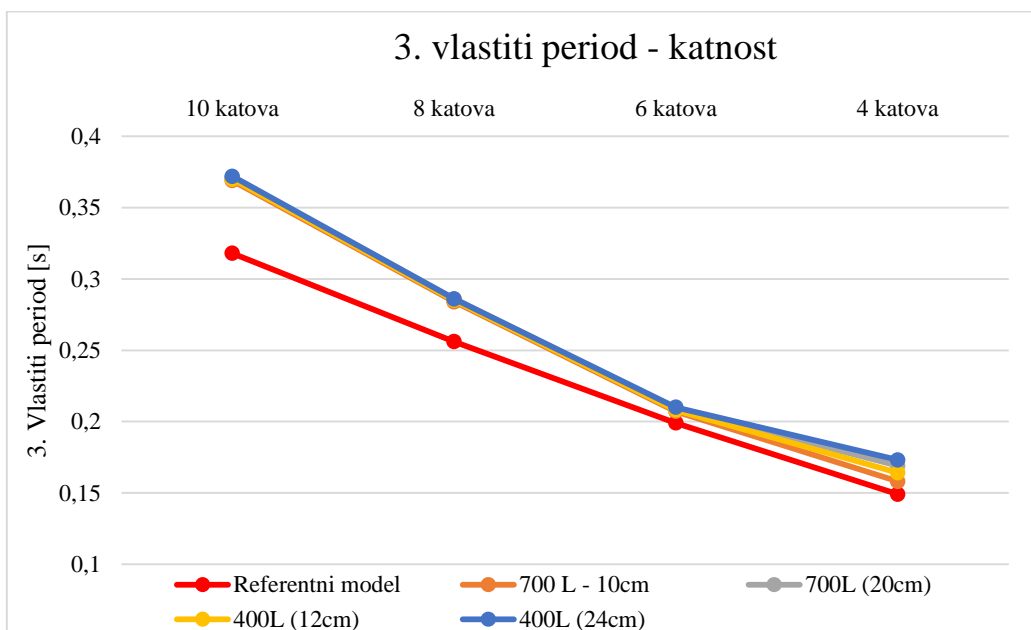
▪ Usporedba vlastitih perioda



Slika 44. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period



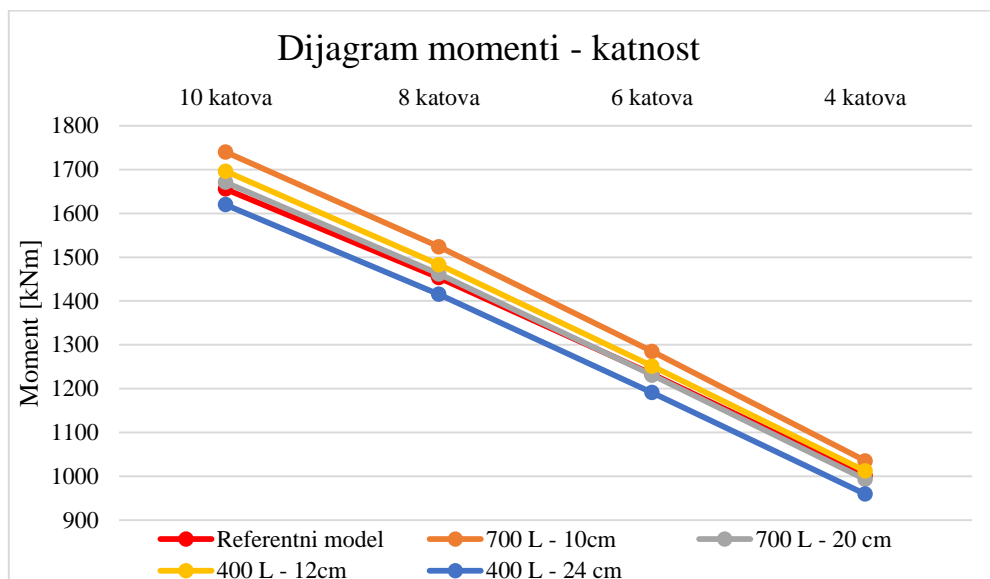
Slika 45. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period



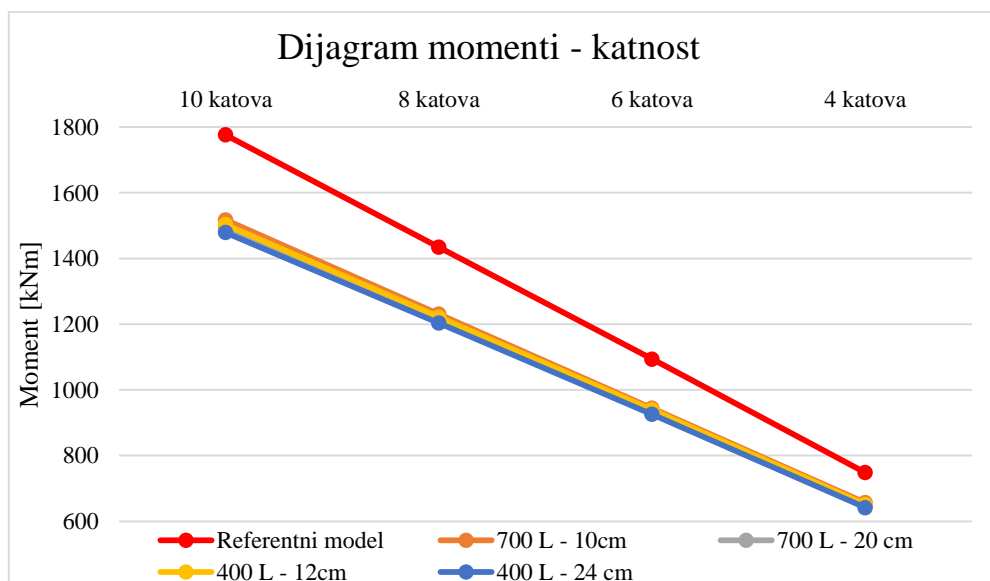
Slika 46. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period

12.3.3. Usporedba rezultata za područje Dubrovnika i temeljnu ploču

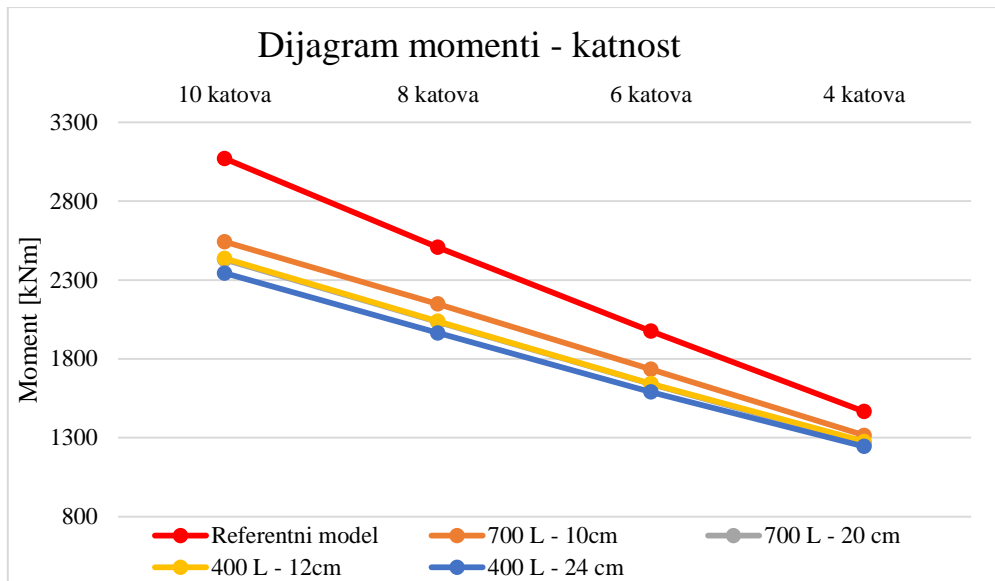
- Usporedba potresnih momenata u zidovima



Slika 47. Dijagram momenti – katnost za zid P11

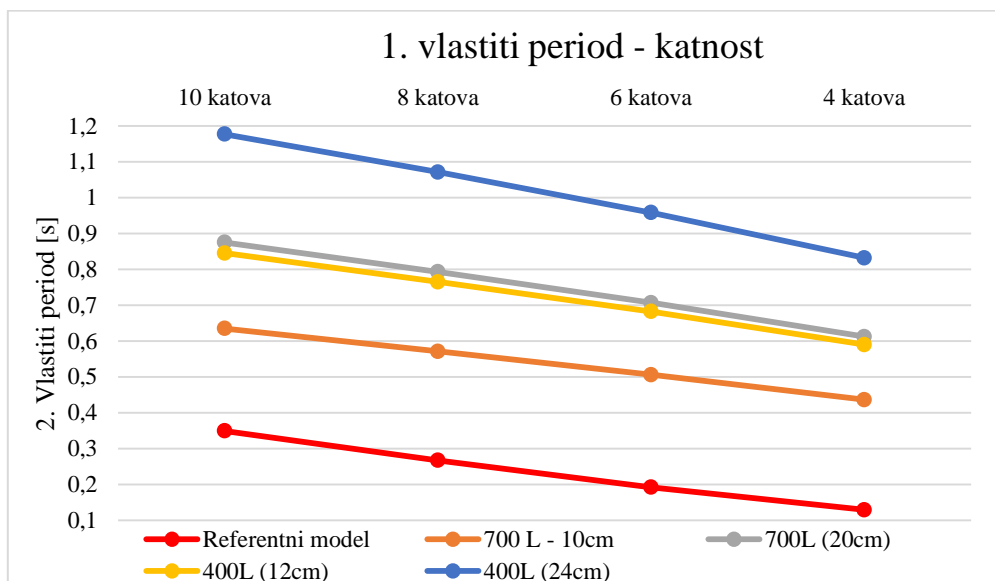


Slika 48. Dijagram momenti – katnost za zid P1088

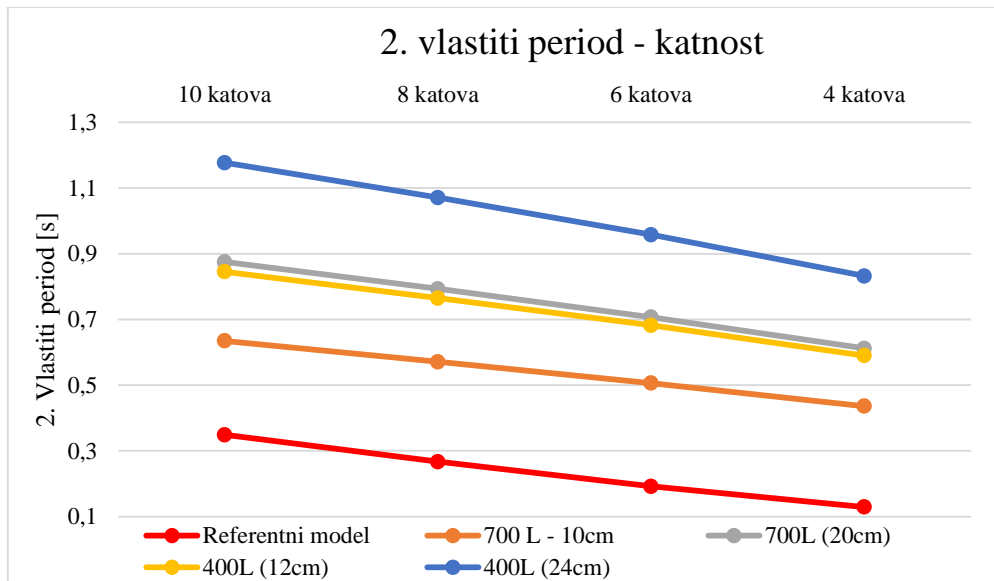


Slika 49. Dijagram momenti – katnost za zid P1002

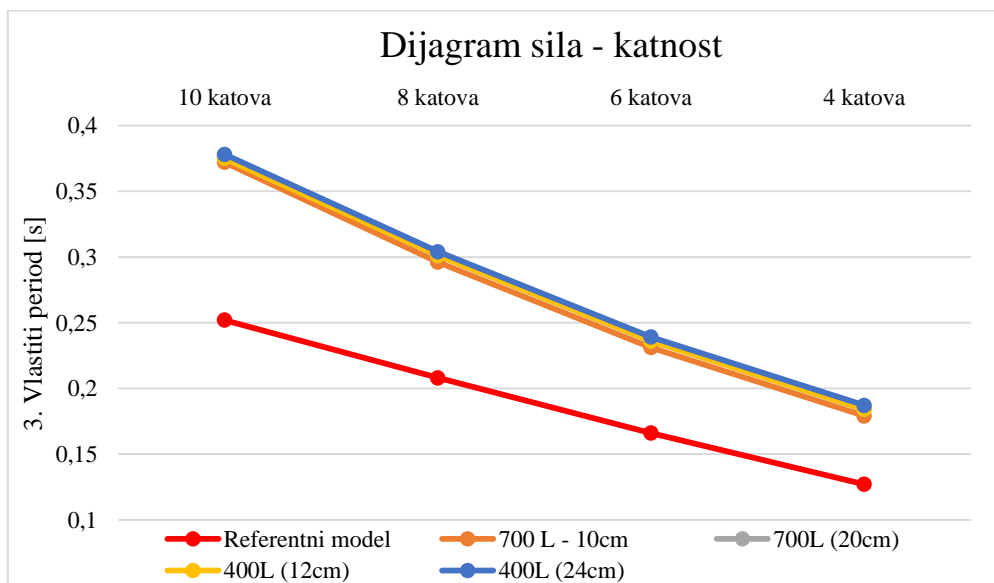
- Usporedba vlastitih perioda



Slika 50. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period



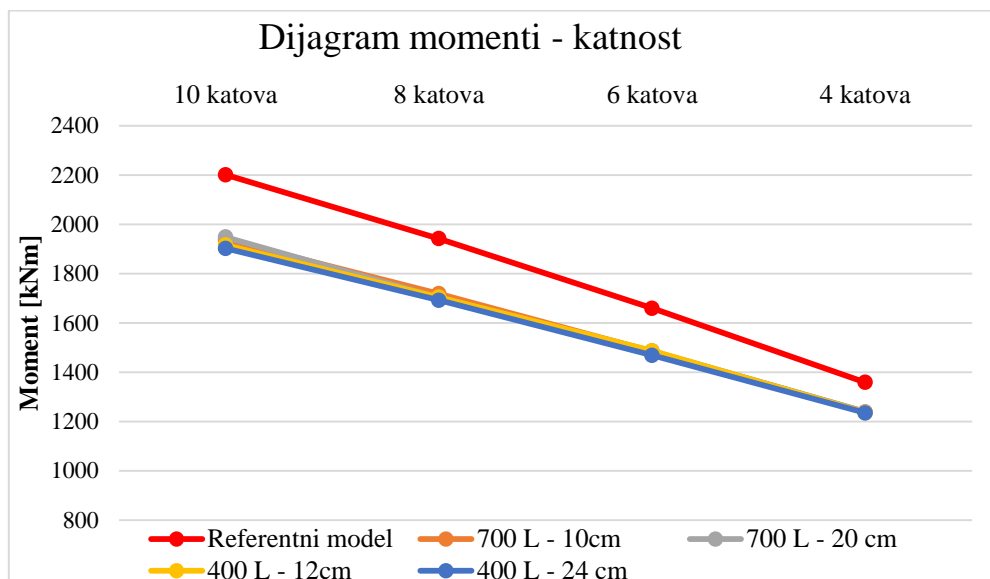
Slika 51. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period



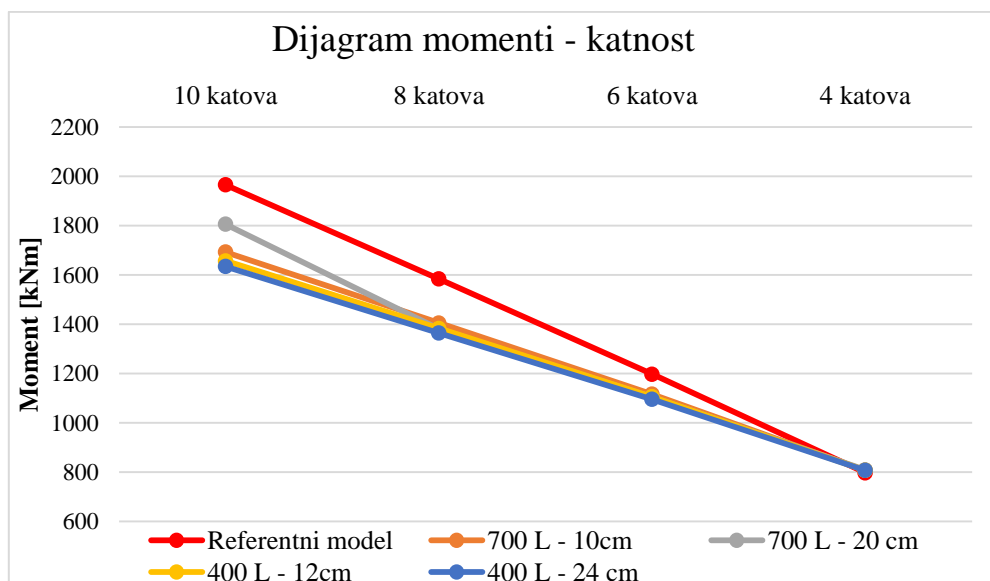
Slika 52. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period

12.3.4. Usporedba rezultata za područje Dubrovnika i trakasti temelj

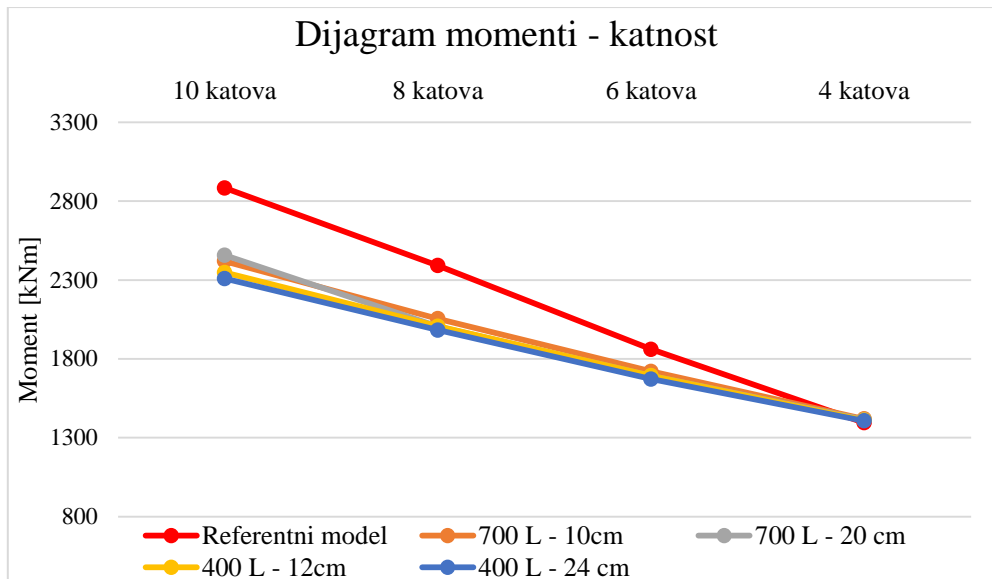
- Usporedba potresnih momenata u zidovima



Slika 53. Dijagram momenti – katnost za zid P11

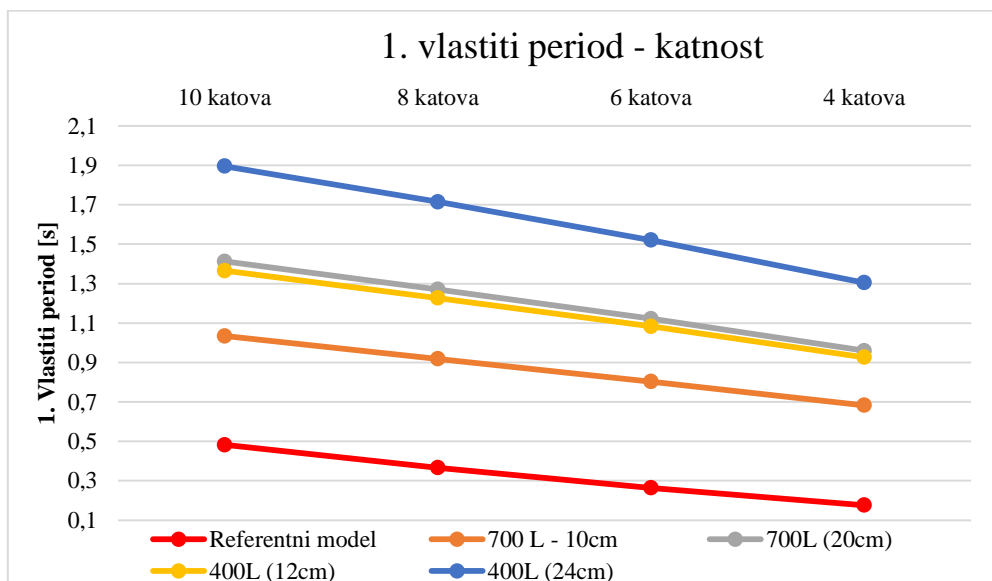


Slika 54. Dijagram momenti – katnost za zid P1088

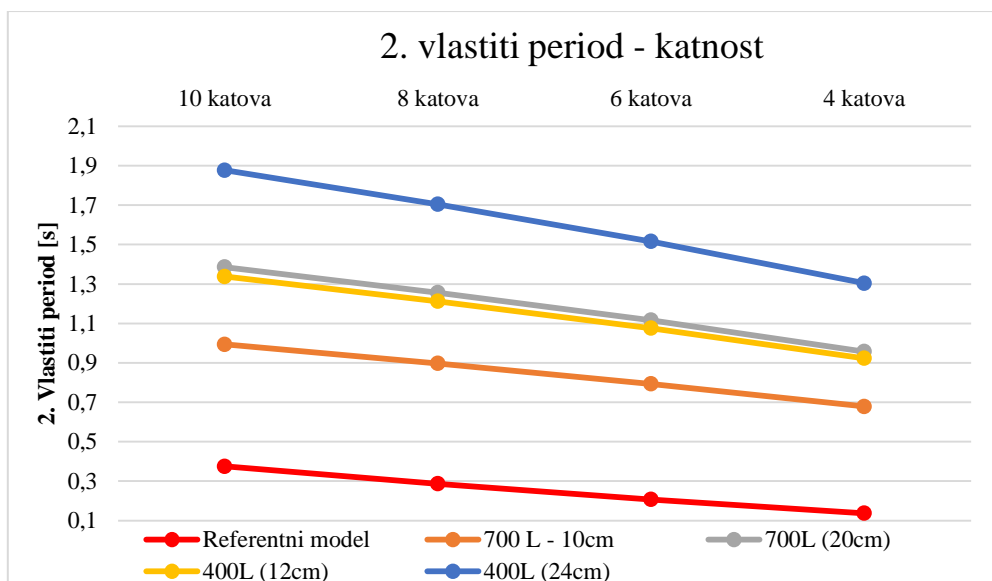


Slika 55. Dijagram momenti – katnost za zid P1002

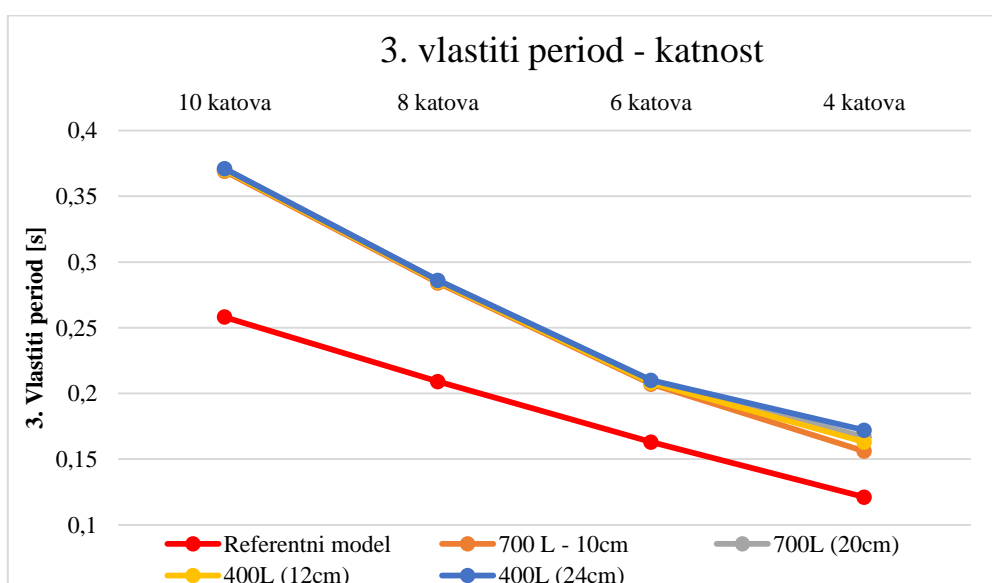
- Usporedba vlastitih perioda



Slika 56. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period

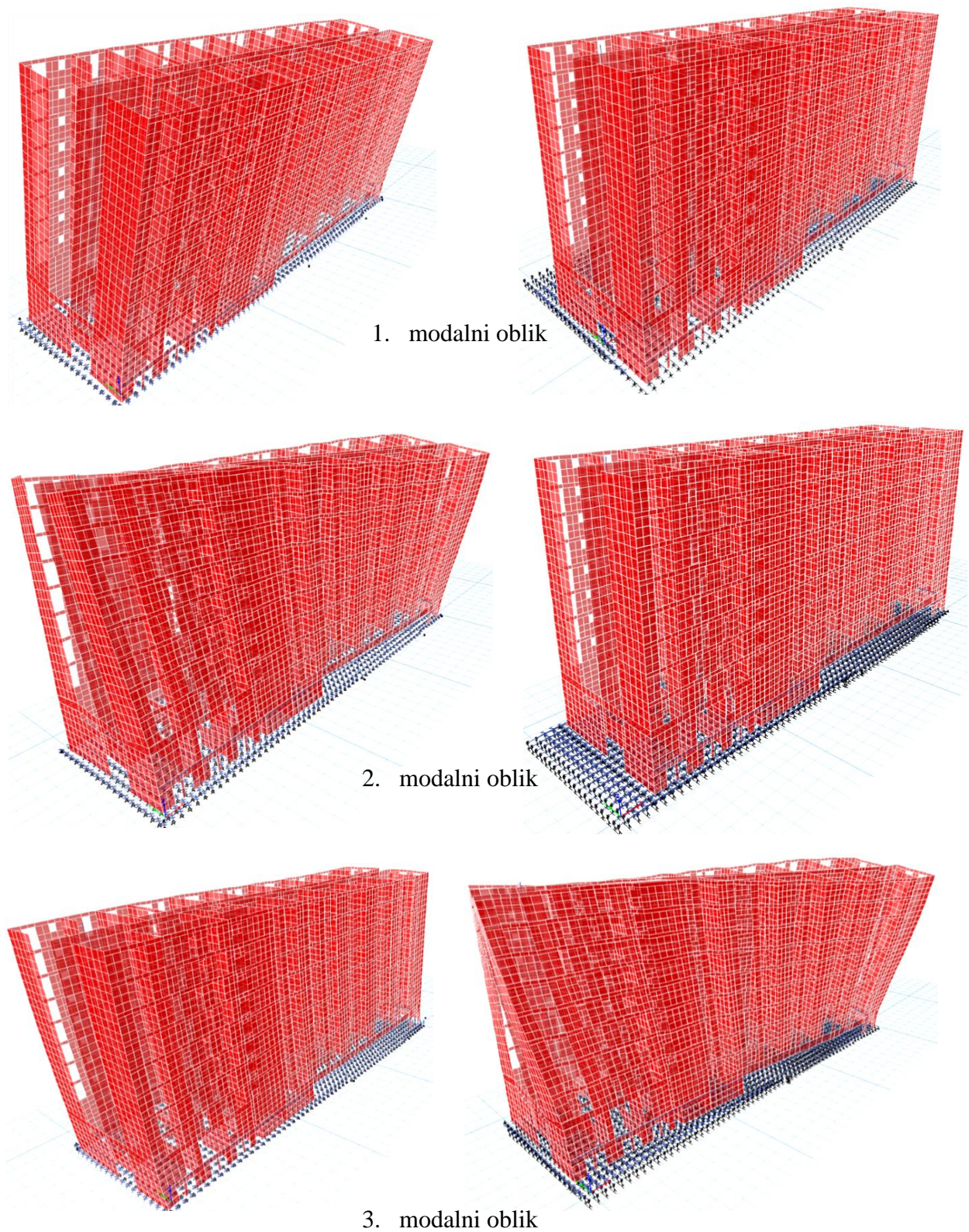


Slika 57. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period



Slika 58. Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period

12.3.5. Prikaz modalnih oblika



Slika 59. Usporedba modalnih oblika referentnog modela (lijevo) i modela s XPS-om (desno)

Slika 59. prikazuje modalne oblike referentnog i modela temeljenog na XPS-u gdje se vidi utjecaj XPS-a na promjenu vlastitih perioda i oblika titranja. Naime, kod modela sa XPS-om dolazi do „omekšanja“ konstrukcije u dijelu kontakta sa slojem XPS-a te konstrukcija produljuje svoje osnovne periode, a oblici titranja pretežno prate deformaciju link elementa XPS-a.

12.4. Diskusija rezultata numeričkog proračuna

U tablicama 14, 15 i 16 dan je postotni prikaz odstupanja iznosa momenata u promatranim zidovima prizemlja konstrukcija koje leže na slojevima XPS-a u odnosu na referentni model bez XPS-a. Crvenom bojom označeni su slučajevi kada dolazi do porasta potresnih momenata u odnosu na referentni model, a ostali slučajevi predstavljaju smanjenje iznosa momenata u zidovima.

Tablica 14. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P1002

Usporedba momenata - Zid P-1002		Odstupanje od referentnog modela (%)							
		Zagreb				Dubrovnik			
		10 katova	8 katova	6 katova	4 kata	10 katova	8 katova	6 katova	4 kata
1. 400-L (12 cm)	Trakasti temelji	30%	30%	24%	13%	19%	16%	9%	1%
	Temeljna ploča	35%	34%	32%	29%	21%	19%	17%	13%
2. 400-L (24 cm)	Trakasti temelji	33%	31%	25%	13%	20%	17%	10%	1%
	Temeljna ploča	38%	37%	35%	30%	24%	22%	20%	15%
3. 700-L (10 cm)	Trakasti temelji	28%	27%	23%	12%	16%	14%	8%	2%
	Temeljna ploča	31%	29%	28%	28%	17%	14%	12%	10%
4. 700-L (20 cm)	Trakasti temelji	31%	30%	24%	13%	15%	16%	9%	1%
	Temeljna ploča	35%	34%	32%	30%	21%	19%	17%	13%

*Napomena: crvenom bojom označeni su slučajevi kad dolazi do povećanja potresnih momenata

Tablica 15. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P11

Usporedba momenata - Zid P-11		Odstupanje od referentnog modela (%)							
		Zagreb				Dubrovnik			
		10 katova	8 katova	6 katova	4 kata	10 katova	8 katova	6 katova	4 kata
1. 400-L (12 cm)	Trakasti temelji	18%	18%	18%	17%	13%	12%	10%	9%
	Temeljna ploča	7%	5%	4%	2%	2%	2%	1%	1%
2. 400-L (24 cm)	Trakasti temelji	19%	19%	18%	17%	14%	13%	11%	9%
	Temeljna ploča	4%	3%	2%	0%	2%	3%	3%	4%
3. 700-L (10 cm)	Trakasti temelji	17%	17%	17%	17%	12%	11%	11%	10%
	Temeljna ploča	9%	8%	6%	3%	5%	5%	4%	3%
4. 700-L (20 cm)	Trakasti temelji	18%	18%	18%	17%	11%	12%	11%	10%
	Temeljna ploča	6%	5%	3%	2%	1%	1%	0%	1%

*Napomena: crvenom bojom označeni su slučajevi kad dolazi do povećanja potresnih momenata

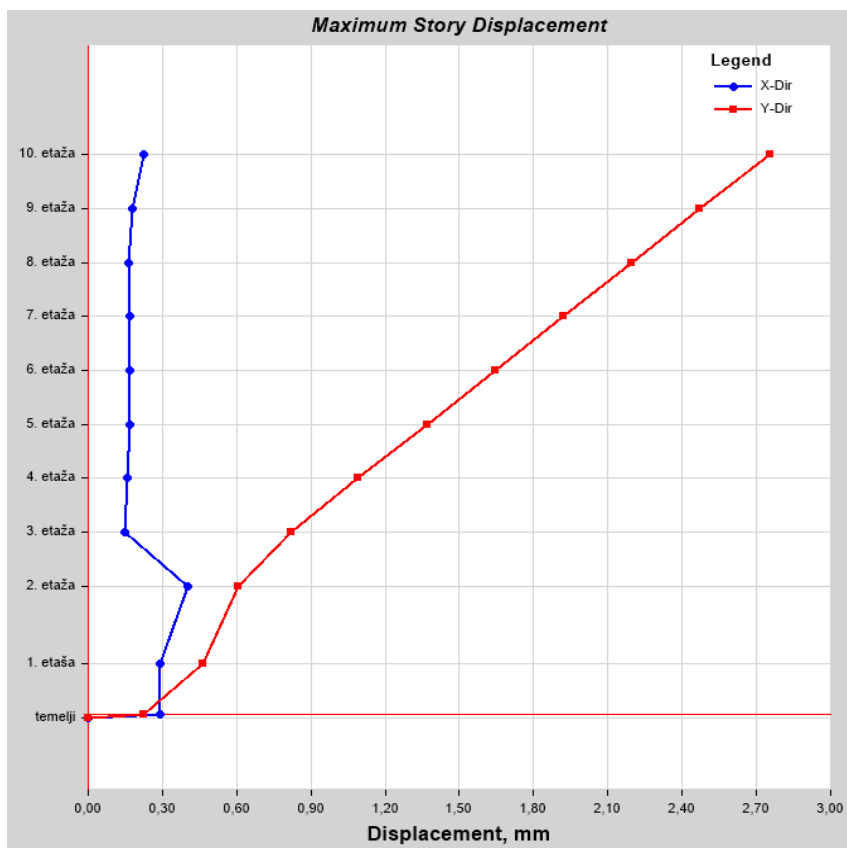
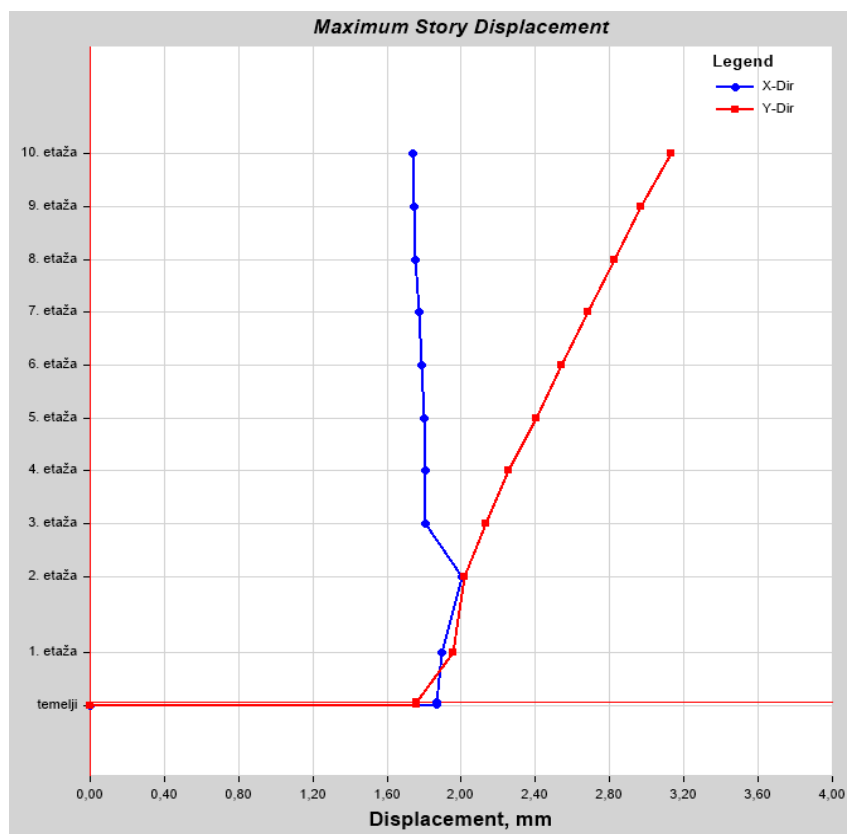
Tablica 16. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P1088

Usporedba momenata - Zid P-1088		Odstupanje od referentnog modela (%)							
		Zagreb				Dubrovnik			
		10 katova	8 katova	6 katova	4 kata	10 katova	8 katova	6 katova	4 kata
1. 400-L (12 cm)	Trakasti temelji	20%	18%	13%	6%	16%	13%	8%	1%
	Temeljna ploča	19%	19%	18%	16%	15%	15%	14%	13%
2. 400-L (24 cm)	Trakasti temelji	20%	19%	15%	6%	17%	14%	9%	1%
	Temeljna ploča	4%	19%	18%	17%	17%	16%	15%	14%
3. 700-L (10 cm)	Trakasti temelji	18%	16%	13%	6%	14%	11%	7%	1%
	Temeljna ploča	20%	18%	18%	16%	14%	14%	14%	12%
4. 700-L (20 cm)	Trakasti temelji	20%	18%	13%	6%	8%	13%	8%	1%
	Temeljna ploča	19%	19%	18%	16%	16%	15%	15%	14%

*Napomena: crvenom bojom označeni su slučajevi kad dolazi do povećanja potresnih momenata

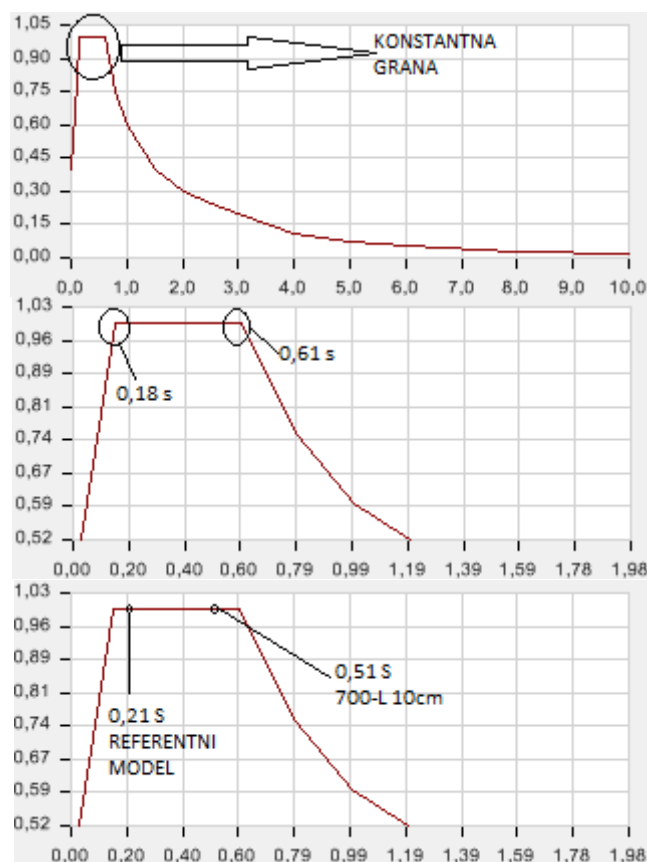
Iz prethodnih tablica vidljivo je da kod zida P1002 i P1088 u većini slučajeva dolazi do smanjenja iznosa momenata u zidovima prizemlja, osim u slučajevima četverokatne konstrukcije gdje kod trakastog temeljenja dolazi do neznatnog povećanja momenata. Kod zida P11 u većini slučajeva konstrukcije temeljene na temeljnoj ploči, kod većih visina konstrukcije, dolazi do povećanja iznosa momenata. Očito je da smanjenjem visine konstrukcije dolazi do sve manjeg prirasta momenata u odnosu na referentni model. Za zid P11 kod trakastih temelja za sve slučajeve dolazi do smanjenja iznosa momenata. Dakle, tablice 7., 8. i 9. dovode do zaključka da ugradnja XPS-a ispod konstrukcije ne dovodi isključivo do smanjenja potresnih momenata već kod određenih zidova, zbog njihovog položaja u tlocrtu i krutosti, dolazi i do povećanja potresnih sila. Iako se kod ovog modela za najopterećenije zidove P 11, P 1002 i P 1088 pokazalo da je smanjenje potresnih momenata zbog ugradnje XPS-a ispod temeljne ploče i traka znatno veće u odnosu na povećanje iznosa momenata kod određenih promatranih slučajeva, može se zaključiti da uzimanjem u obzir ugradnje XPS-a ispod konstrukcije inženjer može doći do mnoštva podataka o realnom ponašanju projektirane konstrukcije u odnosu na zanemarenje dinamičkog utjecaja XPS-a na konstrukciju. Dapače, razlike u gore navedenim tablicama koji za samo 3 promatrana najopterećenija zida u konstrukciji daju i do 38% razlike u iznosu momenata, daju dovoljno dobar razlog da se ovaj fenomen u građevinarstvu detaljnije razmatra u inženjerskoj praksi.

Uz promatranje utjecaja XPS-a na konstrukcija, kroz prizmu potresnih momenata, prirodno dolazi pitanje maksimalnih pomaka konstrukcija temeljenih na taj način. Usporedba maksimalnih pomaka prikazana je na slici 60. za konstrukciju temeljenu na temeljnoj ploči i XPS-u 400L debljine 24 cm i konstrukciju bez XPS-a za elastični potresni spektar, odnosno za granično stanje uporabivosti kod potresa. S te slike je jasan učinak XPS-a na potresno ponašanje konstrukcije. Dakle, vidi se da se glavnina apsolutnih pomaka modela temeljenog na XPS-u „odradi“ u zoni 24 cm debljine XPS-a. To dalje za sobom povlači smanjenje relativnih pomaka unutar etaža konstrukcije. Naravno, kako je i očekivano, apsolutni pomaci modela temeljenog na sloju XPS-a nešto su veći od modela bez XPS-a kod kojeg su dominantni relativni pomaci između katova, odnosno deformacija same konstrukcije je veća nego kod modela temeljenog na sloju XPS-a.



Slika 60. Usporedba maksimalnih katnih pomaka za model temeljen na XPS-u (gore) i model bez XPS-a (dolje)

Osim potresnih momenata, promatrao se utjecaj XPS-a na modalne oblike konstrukcije. Iz poglavlja 11.3.1., 11.3.2., 11.3.3. i 11.3.4. vidljivo je da u svim razmatranim slučajevima dolazi isključivo do povećanja prvih 3 osnovnih perioda konstrukcije. To se ponajprije realizira iz razloga vidljivog na slici 59. gdje se vidi da konstrukcija polegnuta na sloj XPS-a „klizi“ po linkovima koji definiraju XPS, što je i logičan rezultat koji je jer je sloj XPS-a unatoč svojoj relativno visokoj krutosti i dalje puno „mekaniji“ od ostatka konstrukcije te joj na taj način produljuje osnovne periode. To omogućuje konstrukciji da se udalji od ravnog, najvišeg dijela spektra te na taj način smanji potresne sile. Vlastiti periodi za sve slučajeve su veći u odnosu na referentni. Model sa XPS-om 400-L debljine 24 cm ima najveće povećanje vlastitih perioda pa se može zaključiti da je takav model i „najmekši“, dok je model sa XPS-om 700-L debljine 10 cm ima najmanje povećanje vlastitih perioda, odnosno ja taj model „najkručiji“. Iz rezultata se također može zaključiti da je temeljenje na temeljnoj ploči koja leži na sloju XPS-a povoljno sa aspekta smanjenja potresnih momenata i to za sve razmatrane slučajeve konstrukcija, a za konstrukcije temeljenje na trakastim temeljima koji liže na slojevima XPS-a valja paziti na velika povećanja osnovnih perioda titranja konstrukcije što za visoke građevine može biti kontraproduktivno.



Slika 61. Projektni spektar

Ukoliko se promotri projektni spektar (slika 61.) vidi se da je maksimalna grana na području od 0,18 - 0,61 (s) gdje će se aktivirati maksimalna potresna sila. Zatim, kada se pogleda slika 38. vidi se da za konstrukcija od šest katova za referentni model i model 700-L sa debljinom XPS-a od 10 cm također ulaze u to područje. Iz tog razloga zanimljivo je promatrati taj slučaj jer će se u tom slučaju za oba modela aktivirati najveća potresna sila. Također se iz slike 36. jasno vidi da je moment za zid P1002 kod šest katova manji (28% - tablica 14.) za model 700-L (10cm) u odnosu na referentni model. To je samo neki od primjera za jedan od promatranih zidova.

13. Prijenos topline preko tla

U ovom radu je pomoću programa Flixo napravljen proračun toplinskog mosta trakastog temelja i zida te temeljne ploče i zida.

13.1. Općenito o Flixu

Flixo je program za analizu i proračun toplinskih mostova koji omogućuje prikaz slabih točaka konstrukcije uz pomoć izotermni, temperaturnih krivulja te strujnica toplinskog toka. Rezultati u Flixo-u izražavaju se preko U (koeficijent prolaska topline) i Ψ vrijednosti (linijski koeficijent prolaska topline) te se, kao što je već navedeno, može prikazati temperaturna raspodjela i smjer toplinskog toka.

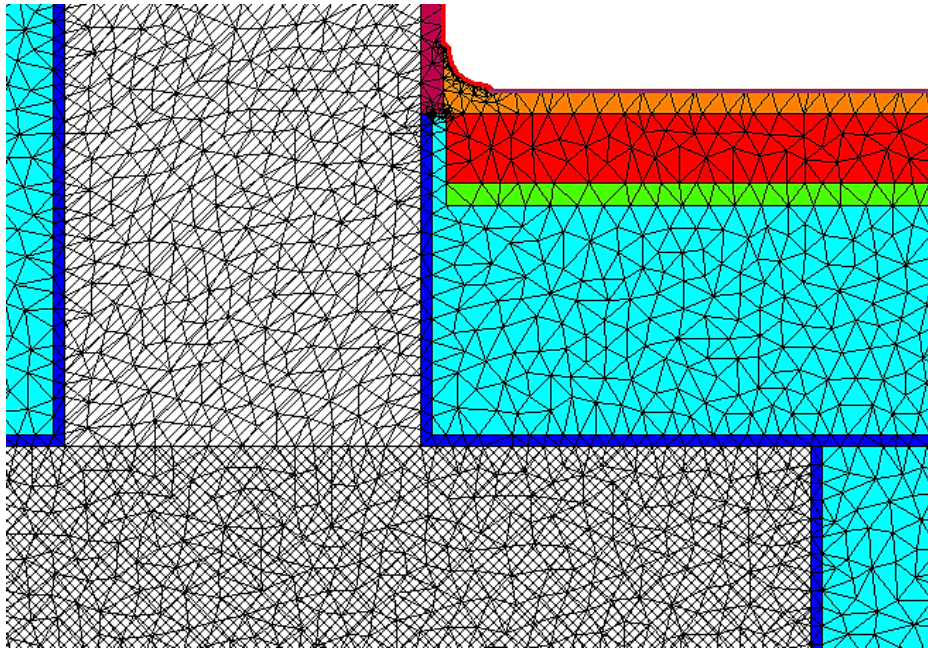
Sa specijalnim programskim dodacima mogu se ispitivati i prikazati osim U i Ψ vrijednosti i pripadajući rezultati detalja:

- Temperatura u odabranoj točki,
- minimalna i maksimalna temperatura uzduž definirane površinske linije,
- protok topline koji ide unutar ili izvan definirane površinske linije,
- U -vrijednost detalja s paralelnim slojevima,
- ekvivalentna U vrijednost koja se uzima u proračun pojavljivanja toplinskih mostova,
- Ψ -vrijednost uzeta u obzir pri proračunu pojedinačnih toplinskih mostova,
- dimenzije za mjerenje relevantnih udaljenosti i
- značajke materijala.

Proračun u Flixo-u sastoji se od četiri dijela:

- Generiranja mreže konačnih elemenata,
- proračuna temperature u ovisnosti o vrijednostima toplinske provodljivosti,
- rješavanja sustava jednačbi te
- automatskog "pročišćavanja" mreže.

Generiranjem mreže konačnih elemenata povećana je točnost te jednostavnost proračuna iz već navednih razloga u poglavlju 11. Mreža se sastoji od trokutastih konačnih elemenata za koje je potrebno zadati minimalan kut koji svaki konačni element može imati, u ovom slučaju taj kut iznosi 20° . Osim kuta, potrebno je zadati i maksimalno dopuštenu veličinu konačnog elementa za koju je odabrana vrijednost 70. Odabrana je i opcija da se mreža konačnih elemenata automatski "pročišćava" na mjestima na kojima je relativna greška trenutnog rješenja veća od kritične granice.



Slika 62. *Generiranje mreže konačnih elemenata u Flixo-u*

13.2. Analiza toplinskih mostova

13.2.1. Definiranje slojeva i određivanje rubnih uvjeta

Analiziran je detalj spoja temeljne ploče i zida te spoja trakastog temelja i zida. Ista zgrada se nalazi na dvije različite lokacije (Zagreb i Dubrovnik) pa je prema Tablici 17. u detaljima varirano:

Tablica 17. Parametri koji su varirani u Flixo-u

Lokacija	Zagreb		Dubrovnik	
Način temeljenja	Temeljna ploča	Trakasti temelj	Temeljna ploča	Trakasti temelj
Debljina XPS-a	10	10	10	10
	12	12	12	12
	20	20	20	20
	24	24	24	24

Dimenzije detalja su napravljene u skladu s normom HRN EN ISO 10211:2017. U vertikalnom smjeru dimenzije presjeka od najviše kote slojeva poda na tlu do vrha zida iznose 0,96 m. Dimenzije presjeka od najniže kote poda na tlu do najniže kote tla iznose 1,3 m.

U horizontalnom smjeru dimenzije presjeka smiju biti maksimalno 4 m pa se to ograničenje uzelo u obzir.

Slojevi u detaljima prikazani su u tablici. Iz tehničkog lista za svaki materijal uzete su vrijednosti koje je bilo potrebno unijeti u program za definiranje slojeva, a to su gustoća ρ , toplinska provodljivost λ , specifični toplinski kapacitet c te koeficijent difuzije vodene pare μ . Na taj su način definirani materijali.

Tablica 18. Slojevi detalja s pripadajućim karakteristikama materijala

SLOJ		ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	C[kJ/kgK]	μ
1	Silikatna žbuka	1800	0,9	1	60
2	Mort za lijepljenje	1150	0,54	1,11	20
3	Ekstrudirani polistiren (XPS)	37,5	0,036	1,45	140
4	Ekstrudirani polistiren (XPS seismic)	35	0,033	1,5	150
5	AB zid	2500	2,6	1	110
6	AB ploča	2500	2,6	1	110
7	Vapneno gipsana žbuka	1400	0,7	1	8
8	Parket	700	0,18	1,6	200
9	Cementni estrih	2000	0,26	1,1	50
10	Hidroizolacija	300	0,2	1	75
11	Lagani beton	1400	0,79	1	84
12	Šljunak	1700	2	0,05	50
13	Glina	1200	1,5	0,05	50
14	Kamen	2200	1,7	1	200
15	AB trakasti temelj	2500	2,6	1	110

Nakon definiranja slojeva, određene su granice detalja. Presječnim vertikalnim ravninama detalja pridružene se adijabatske granice (bez prijenosa topline), a ravnini kojoj odgovara najniža kota detalja pridružena je granica prema normi DIN-u kojoj je definirana temperatura tla. Za temperature tla od 5 cm i 20 cm preuzete su vrijednosti iz „Karakteristika temperature tla,, prema Kaučiću. [27] Uzeta je temperaturu tla za najhladnije mjesece u godini (prosinac, siječanj i veljača) i iz tablice očitana srednja vrijednost temperature tla za Zagreb i Dubrovnik. Te vrijednosti su pridružene odgovarajućim detaljima.

Tablica 19. Vrijednosti temperaura tla po mjesecima

MJESEC	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
GRAD	Temperatura [°C]											
Zagreb	0,1	2,4	5,5	11,3	17,2	21,2	23,3	22	17,5	11,2	6,1	1,1
Dubrovnik	6,5	7,6	10,1	14,6	19,9	24,8	27,3	26,5	21,4	16,7	11,9	8,2

Dijelu detalja koji graniči s vanjskim prostorom pridruženi su rubni uvjeti vanjskog prostora (exterior) gdje je definirana vanjska temperatura za najhladniji dio godine -10°C za Zagreb i 10°C za Dubrovnik. Osim vanjske temperature definiran je i vanjski plošni otpor prijelaza topline R_{se} te unutarnji plošni otpor prijelaza topline R_{se} . Vanjski plošni otpor za vanjske zidove i za vodoravni smjer toplinskog toka (prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 1379) iznosi $R_{se} = 0,04$. Dijelu detalja koji graniči s unutarnjim prostorom pridruženi su rubni uvjeti unutarnjeg prostora (interior) i pripadajuća temperaturu od 20°C i za Zagreb i za Dubrovnik. Unutarnji plošni otpor za vanjski zid u slučaju vodoravnog toplinskog toka iznosi $R_{si} = 0,13$, a u slučaju poda na tlu, odnosno smjera toplinskog toka prema dolje iznosi $R_{se} = 0,17$.

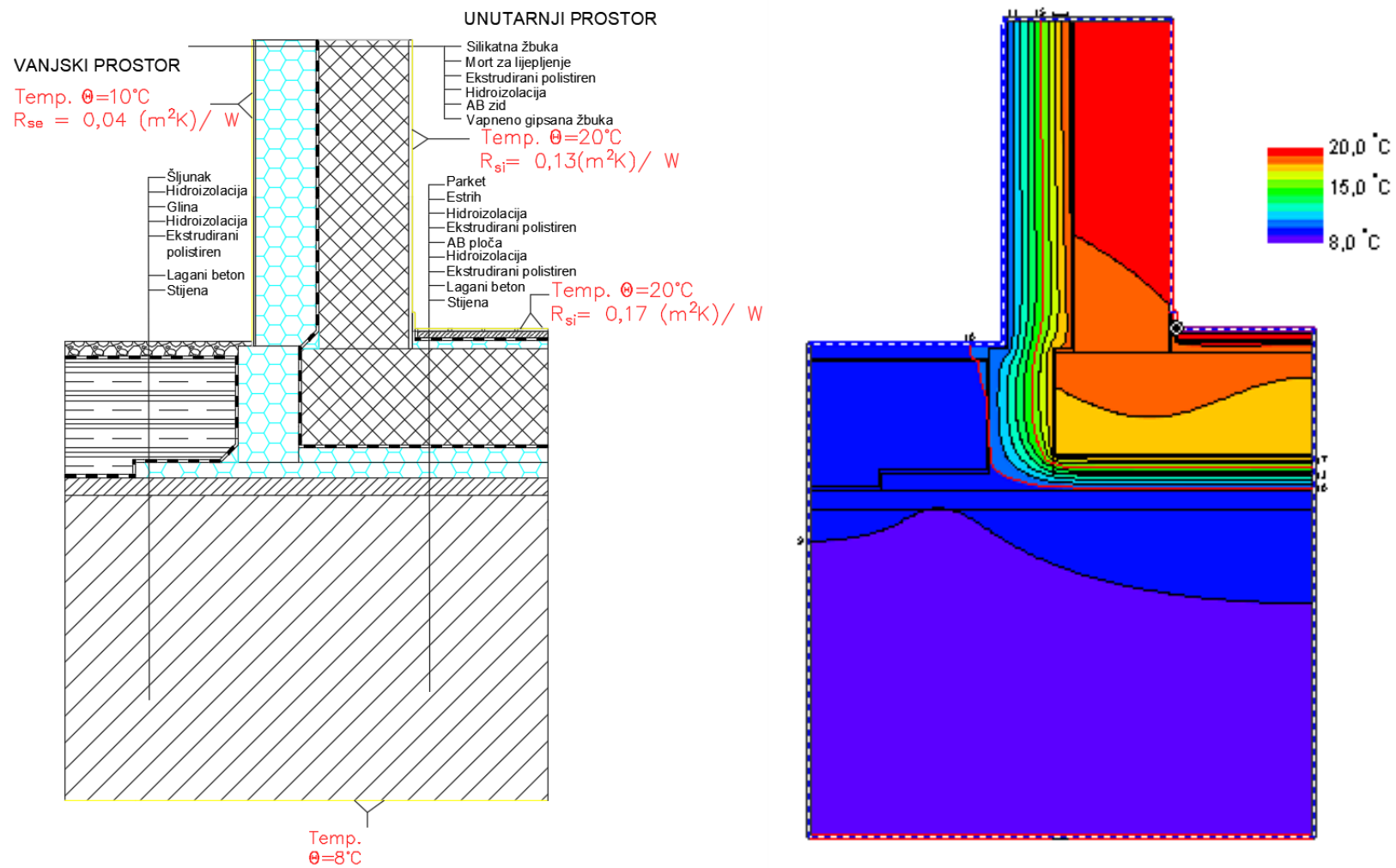
Tablica 20. Definiranje rubnih uvjeta

Građevni dio	Lokacija	Θ_i	Θ_e	R_{si}	R_{se}
Vanjski zid	Zagreb	20°C	10°C	0,13	0,04
	Dubrovnik	20°C	10°C	0,13	0,04
Pod prema tlu	Zagreb	20°C	10°C	0,17	0
	Dubrovnik	20°C	10°C	0,17	0
Tlo	Zagreb	/	2°C	0	0
	Dubrovnik	/	8°C	0	0

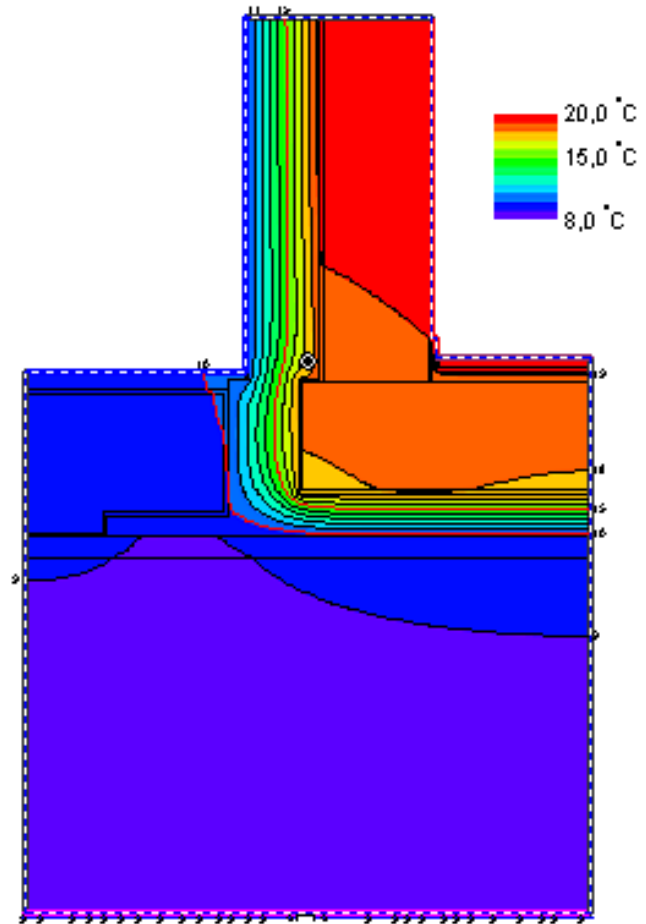
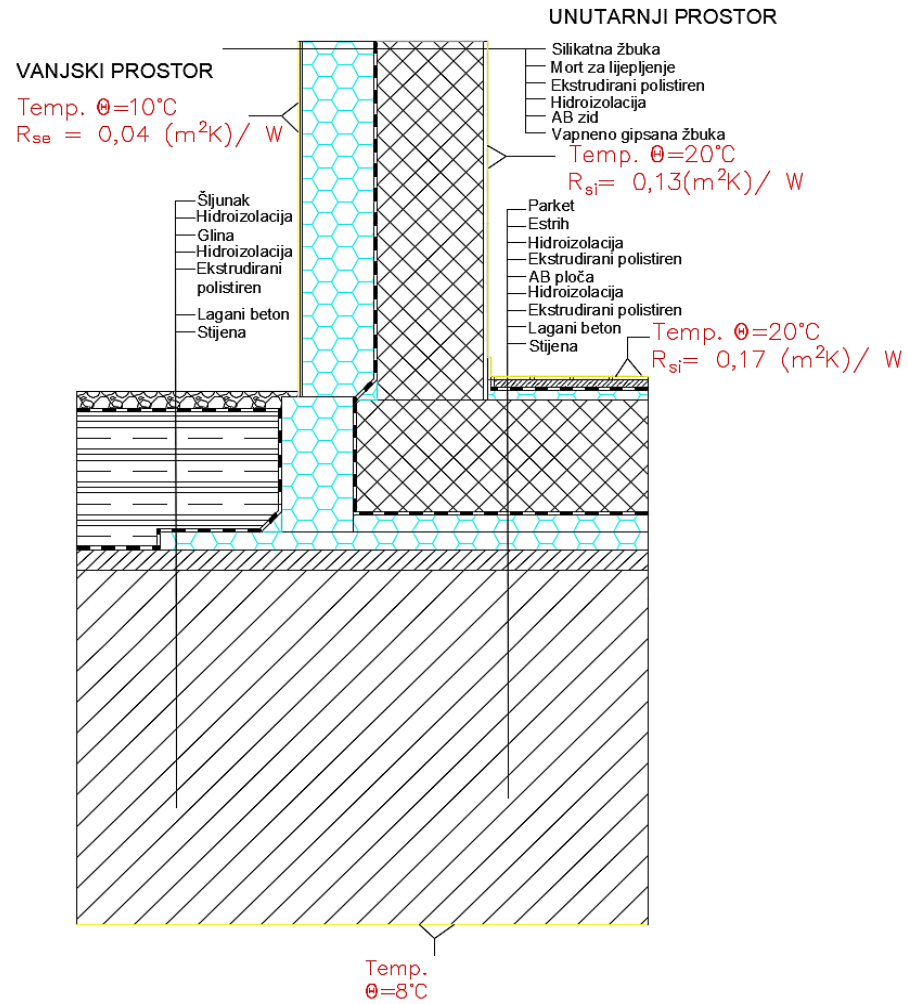
13.2.2. Analiza i razrada rezultata

Nakon izrađenog modela u programu Flixo-u analizirani su dobiveni rezultati temperaturnih raspodjela, toplinskih tokova te Ψ i f_{Rsi} vrijednosti. Kao što je već navedeno, varirane su debljine XPS-a, dvije lokacije (Zagreb i Dubrovnik) te vrsta temelja (temeljna ploča i trakasti temelj).

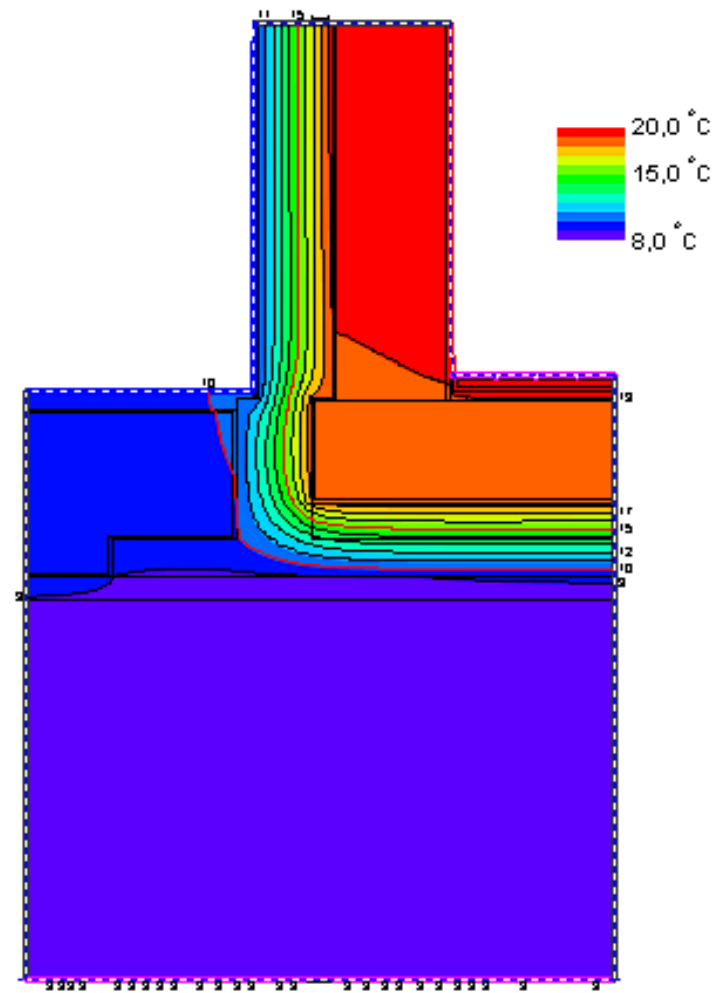
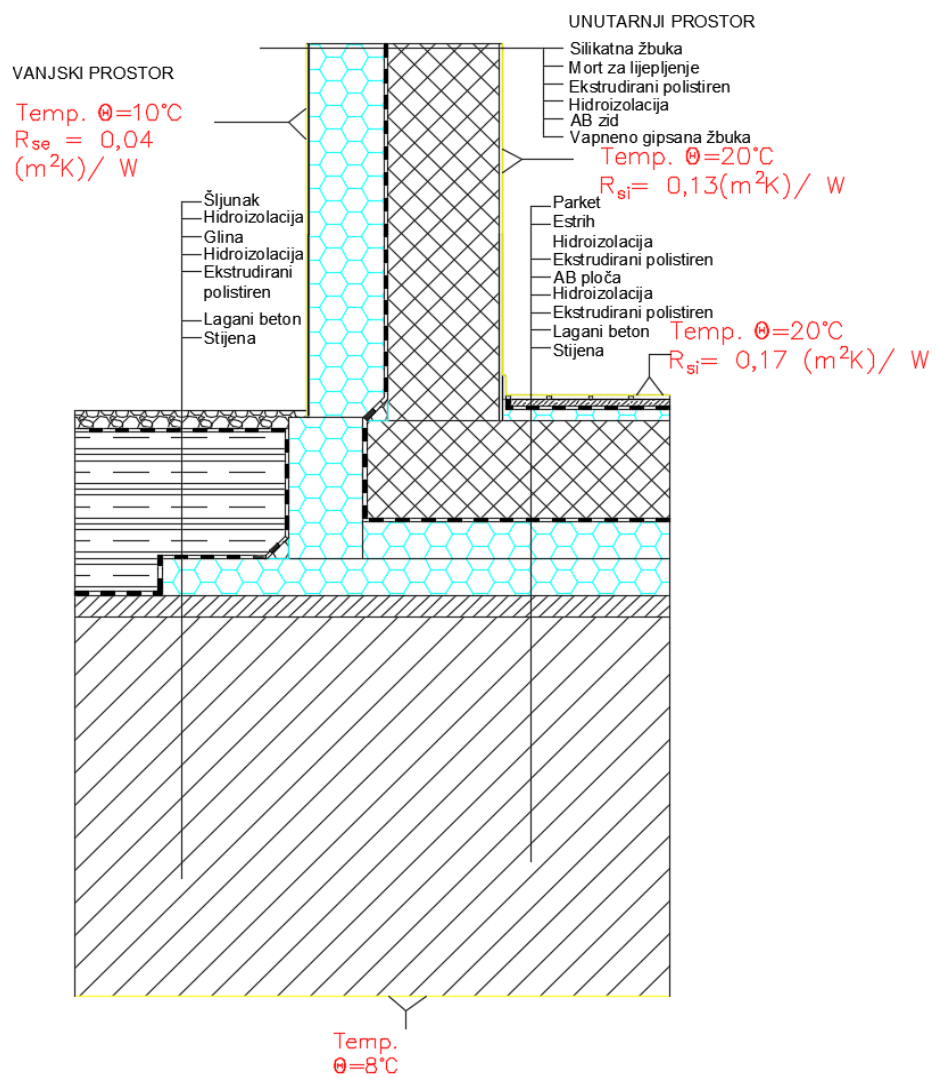
Prikaz detalja i temperaturnih raspodjela:



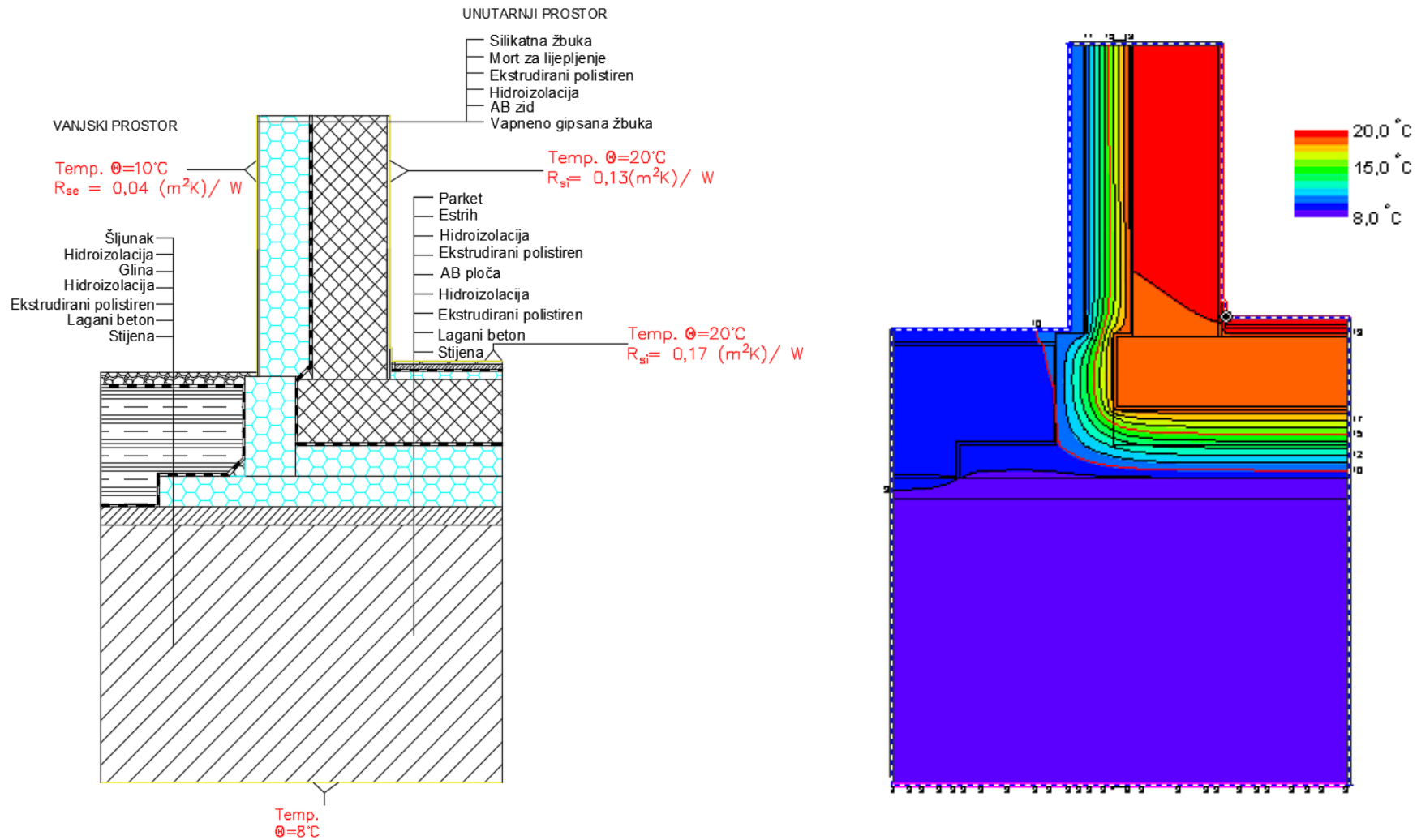
Slika 63. Temeljna ploča s izolacijom $d=10 \text{ cm}$ u Dubrovniku



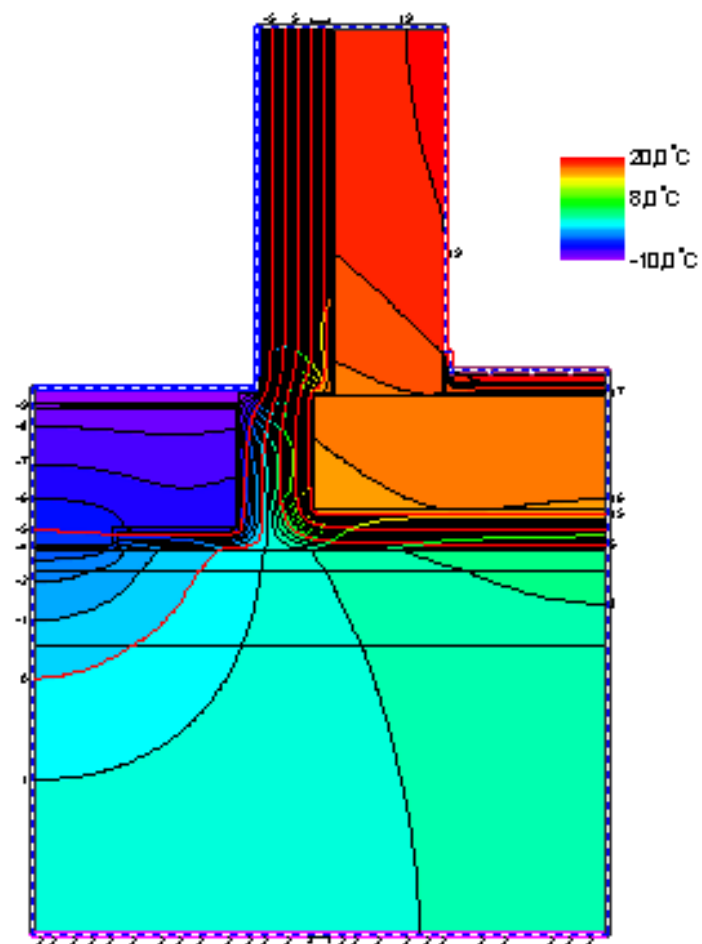
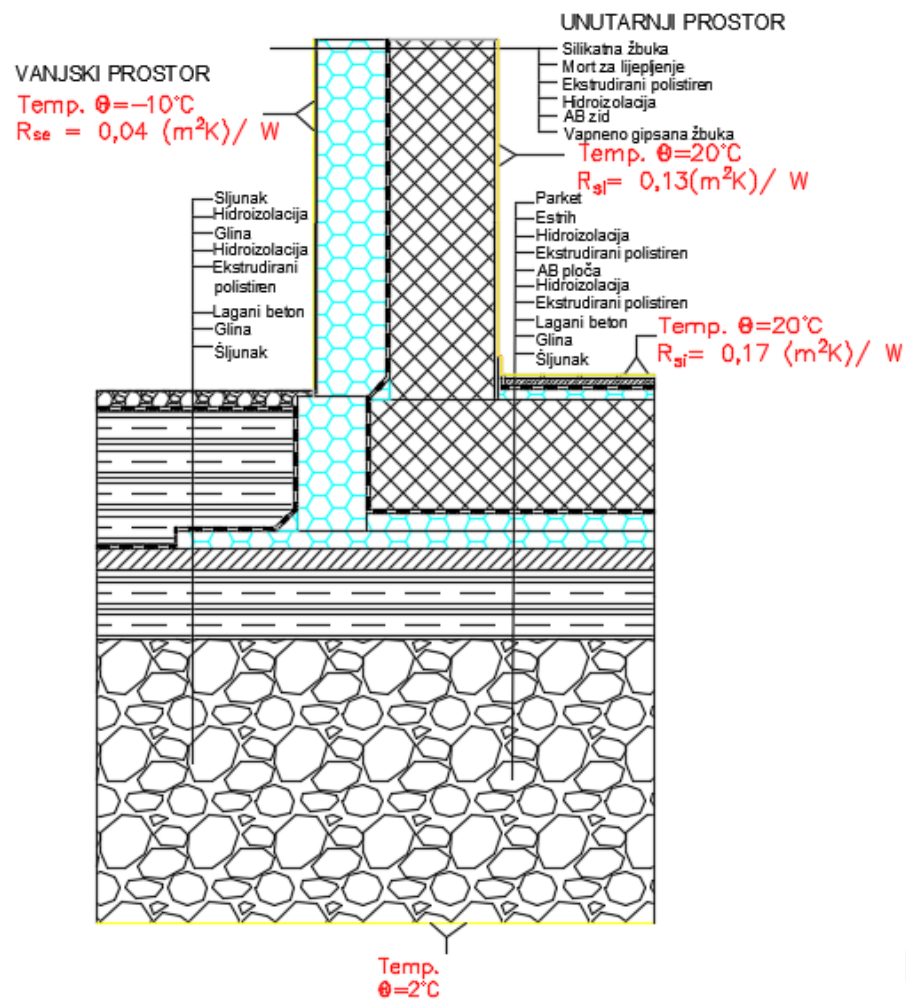
Slika 64. *Temeljna ploča s izolacijom $d=12\text{cm}$ u Dubrovniku*



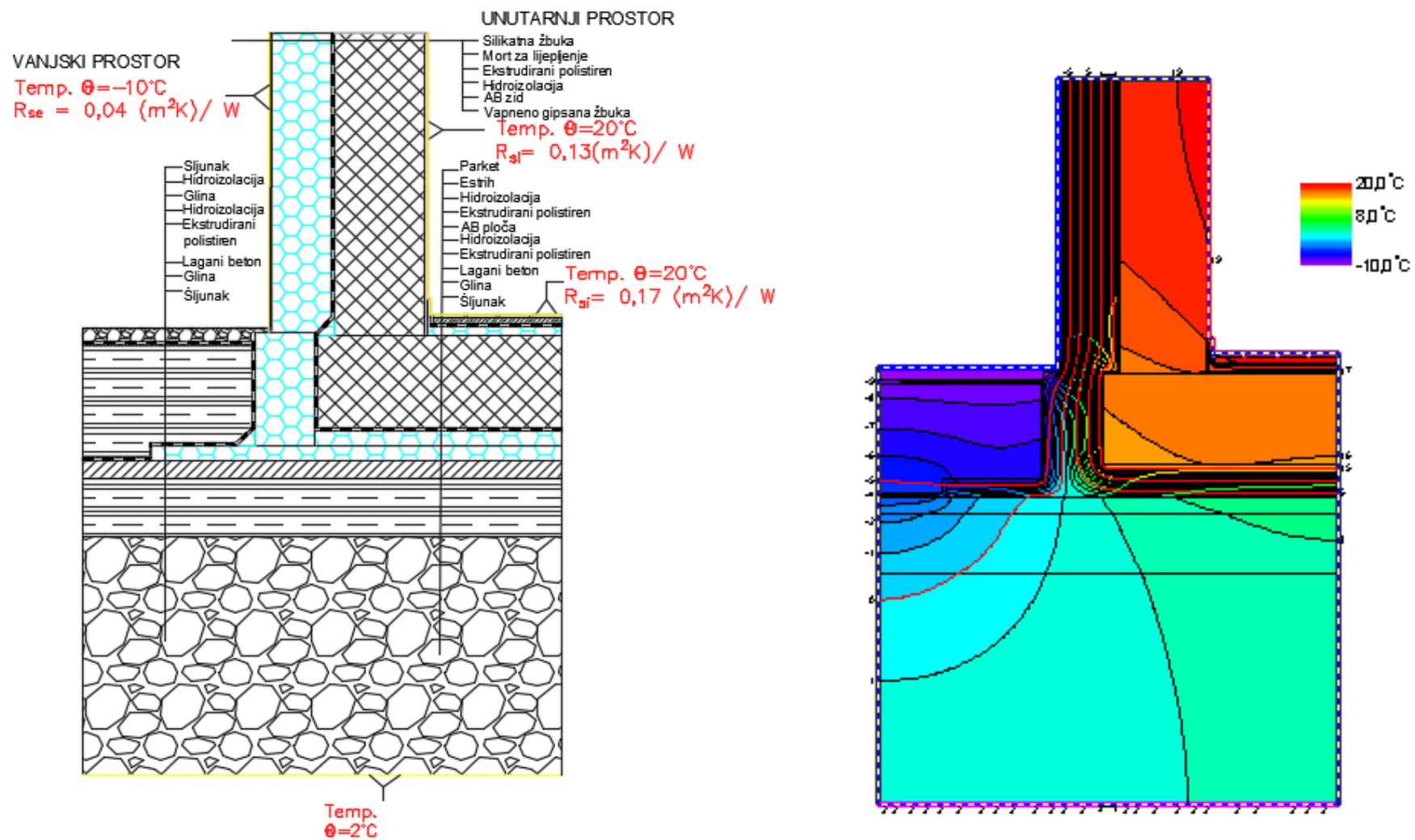
Slika 65. Temeljna ploča s izolacijom $d=20\text{cm}$ u Dubrovniku



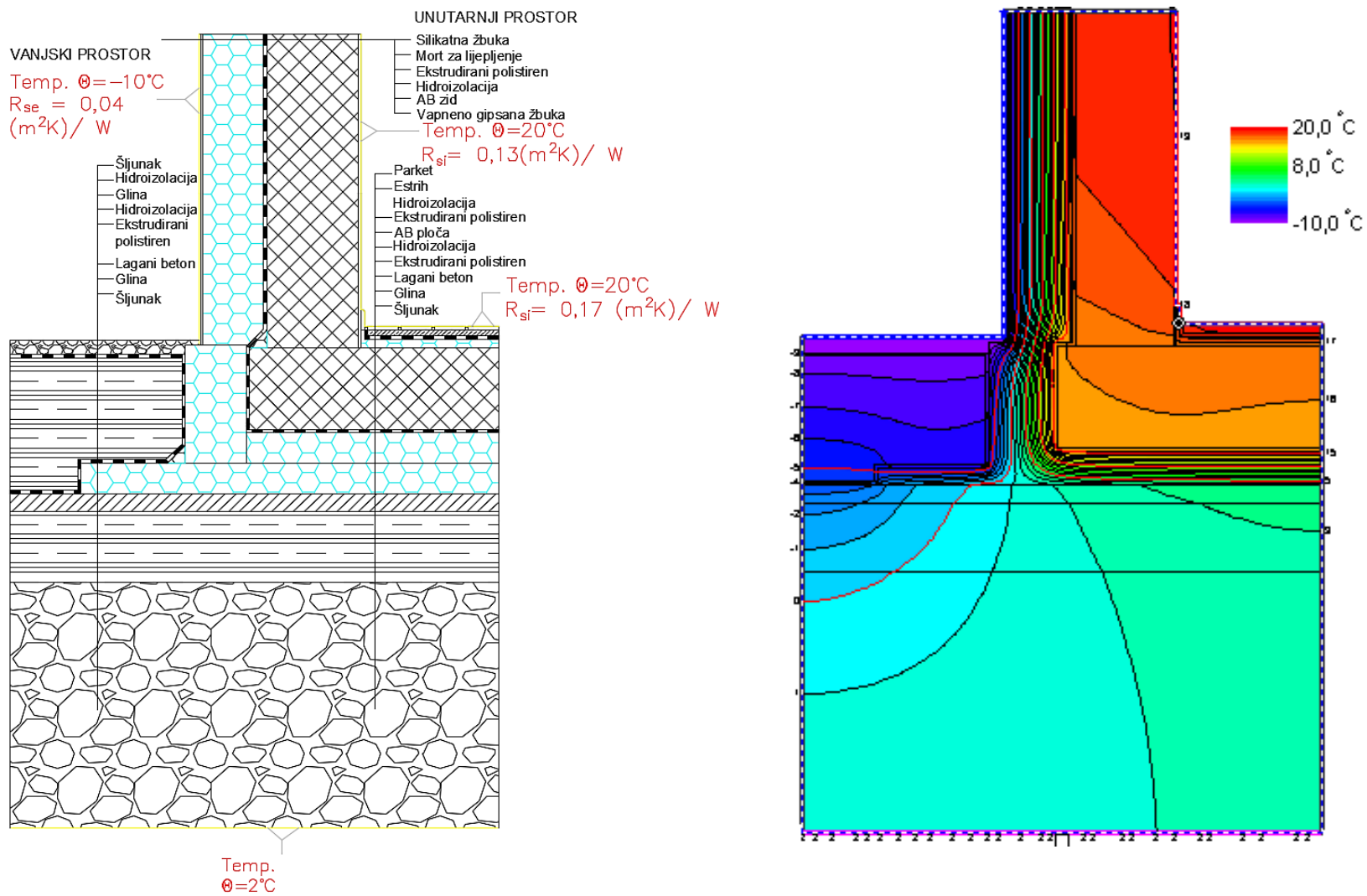
Slika 66. Temeljna ploča s izolacijom $d=24 \text{ cm}$ u Dubrovniku



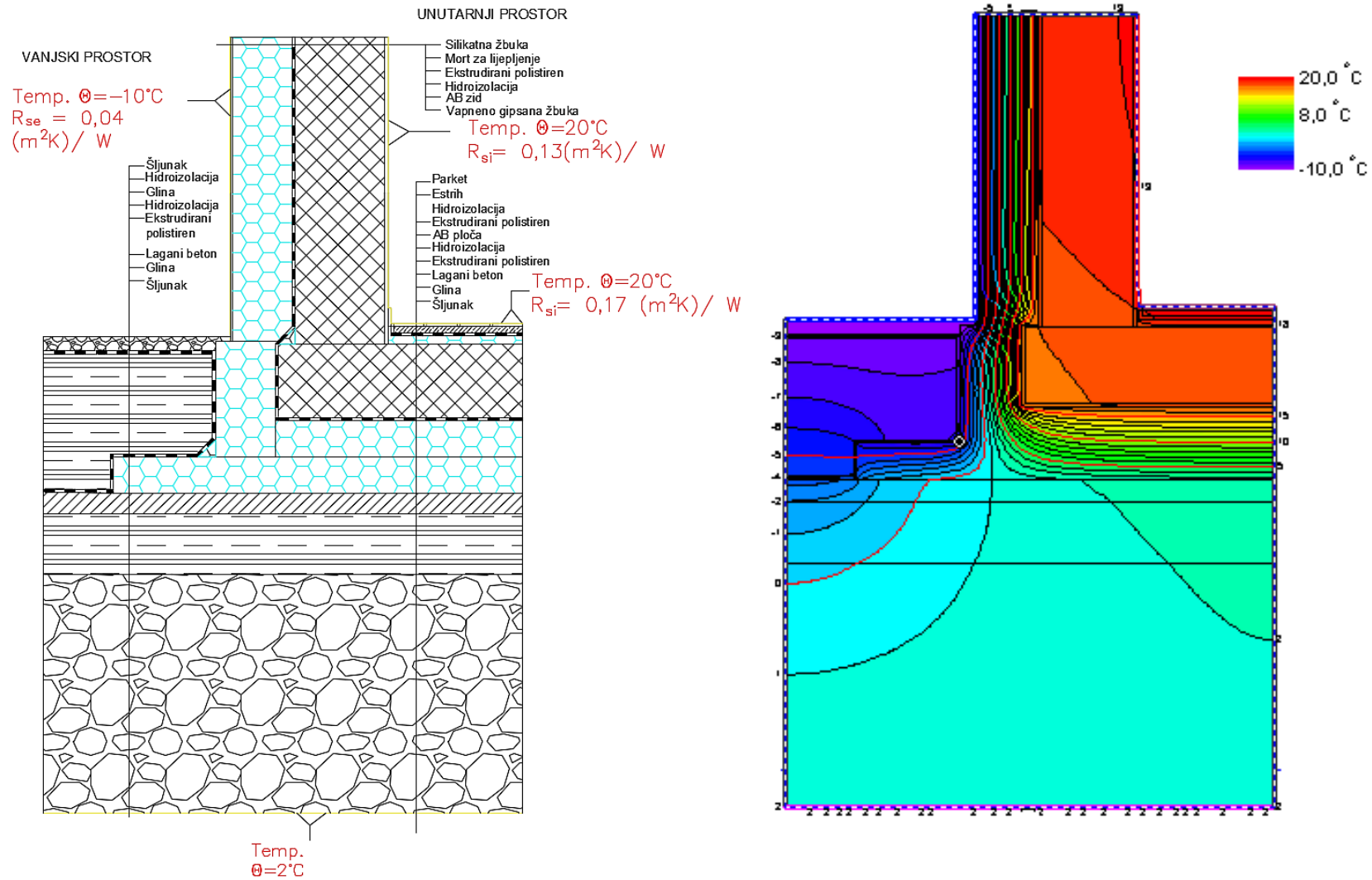
Slika 67. Temeljna ploča s izolacijom $d=10 \text{ cm}$ u Zagrebu



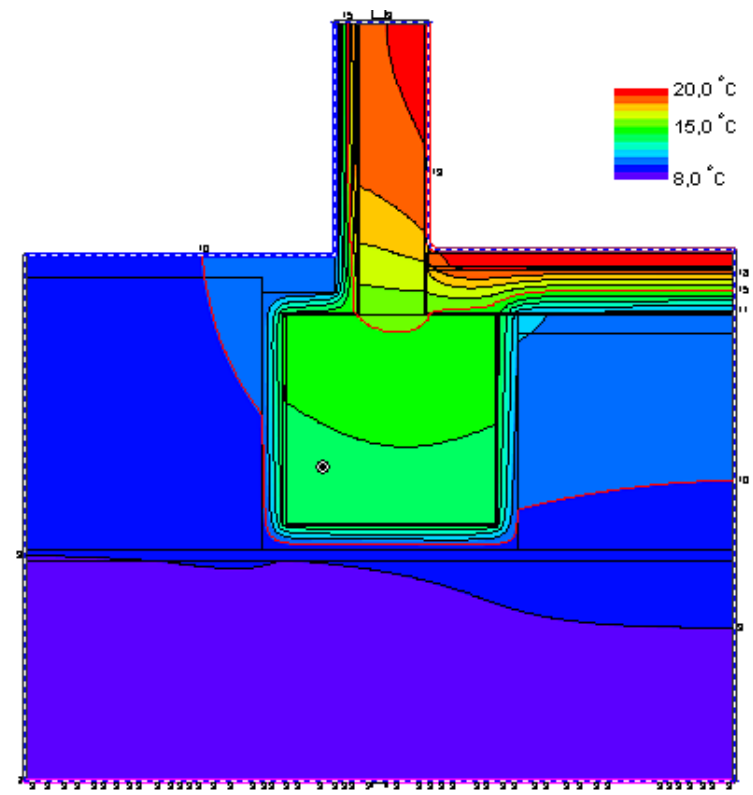
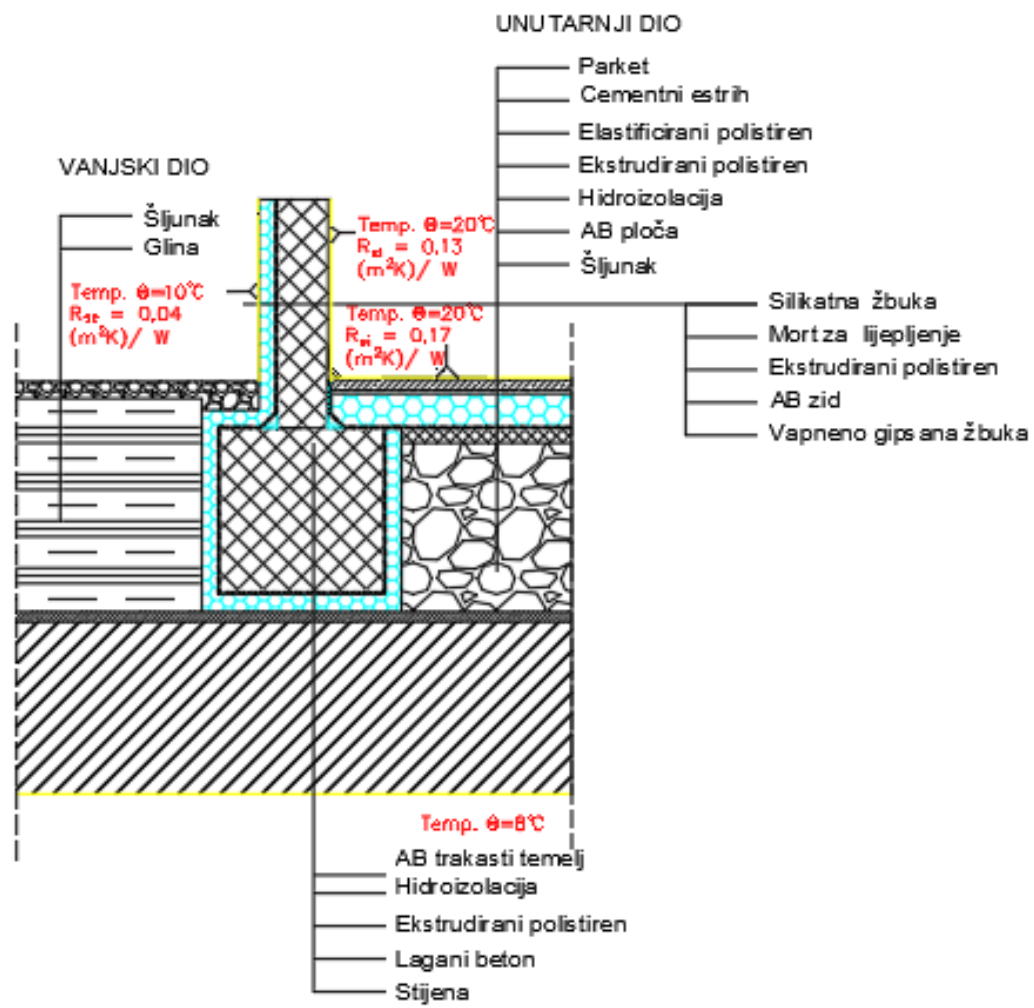
Slika 68. Temeljna ploča s izolacijom $d=12 \text{ cm}$ u Zagrebu



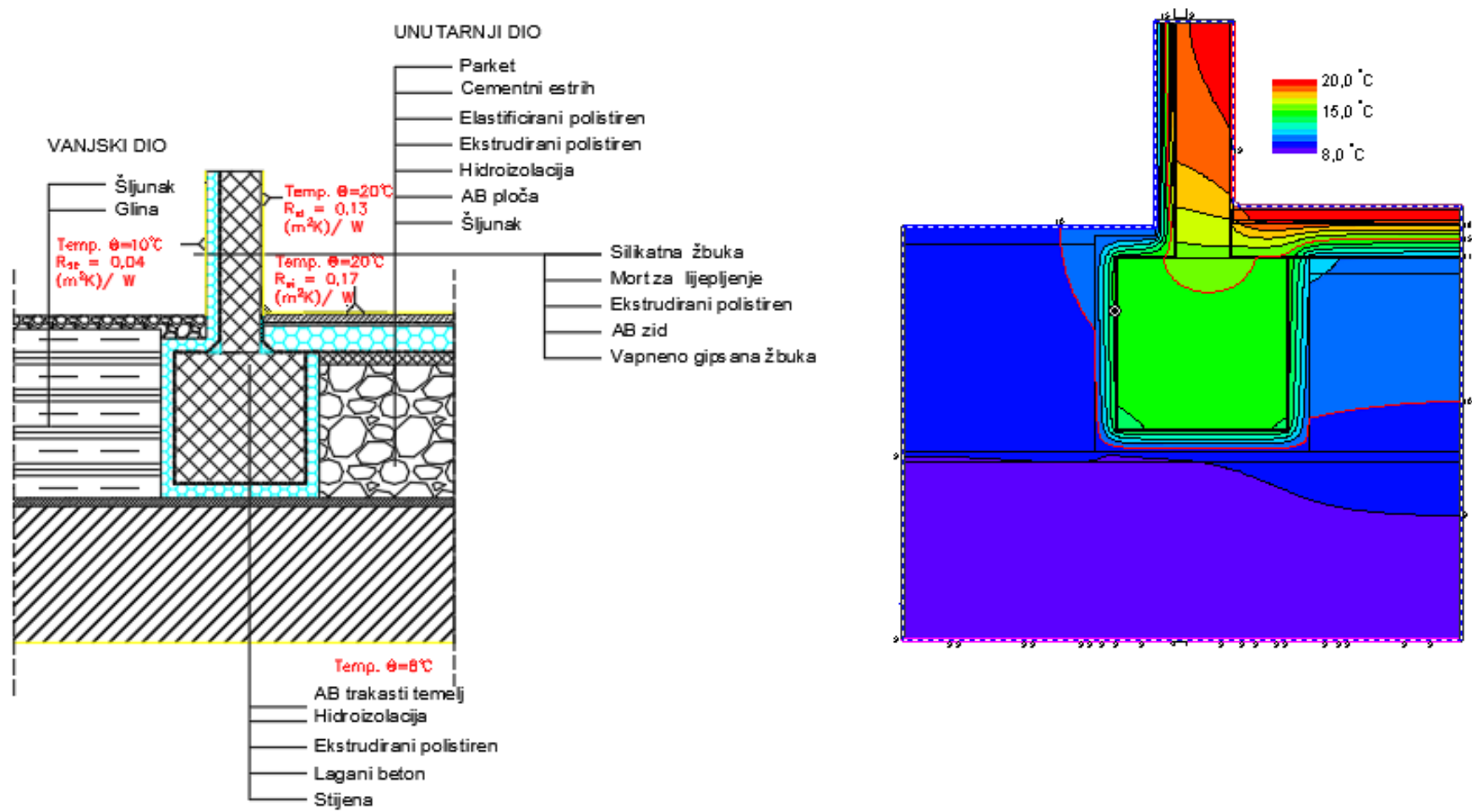
Slika 69. Temeljna ploča s izolacijom $d=20$ cm u Zagrebu



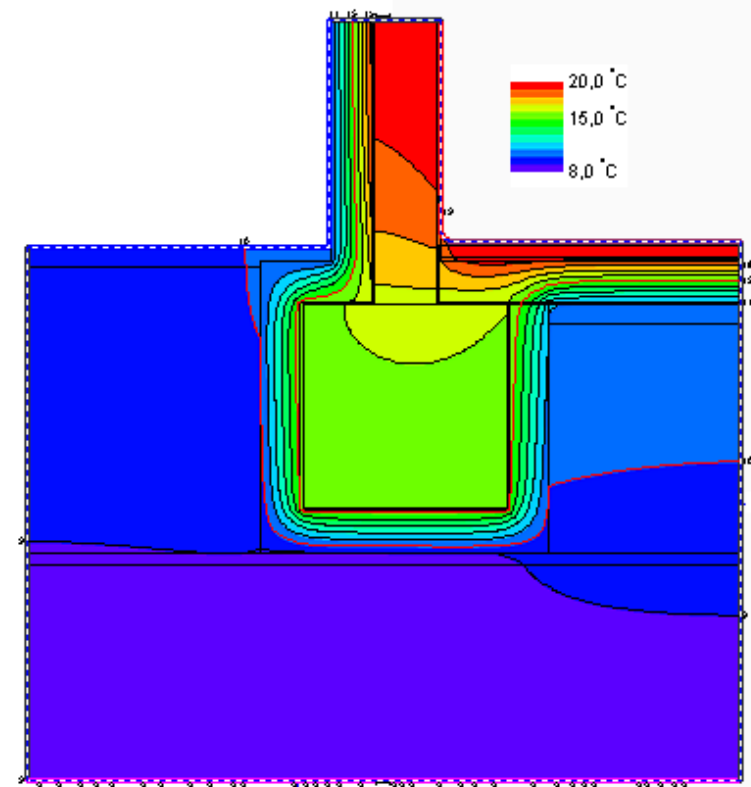
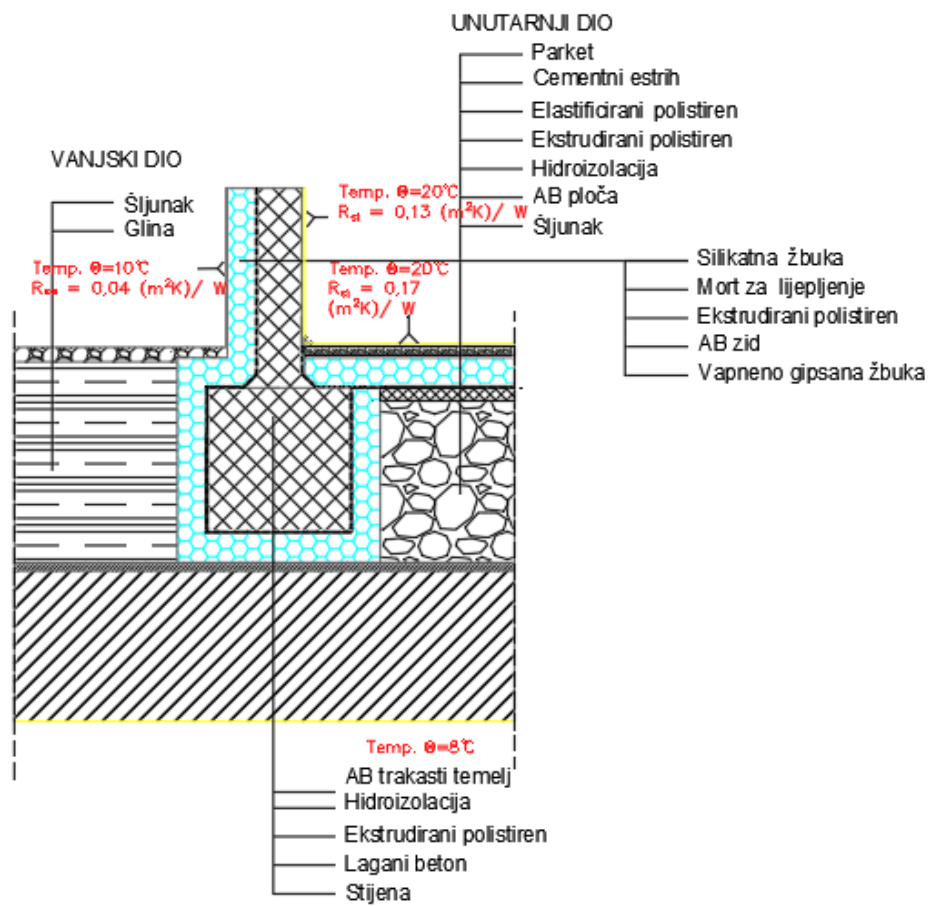
Slika 70. Temeljna ploča s izolacijom $d=24 \text{ cm}$ u Zagrebu



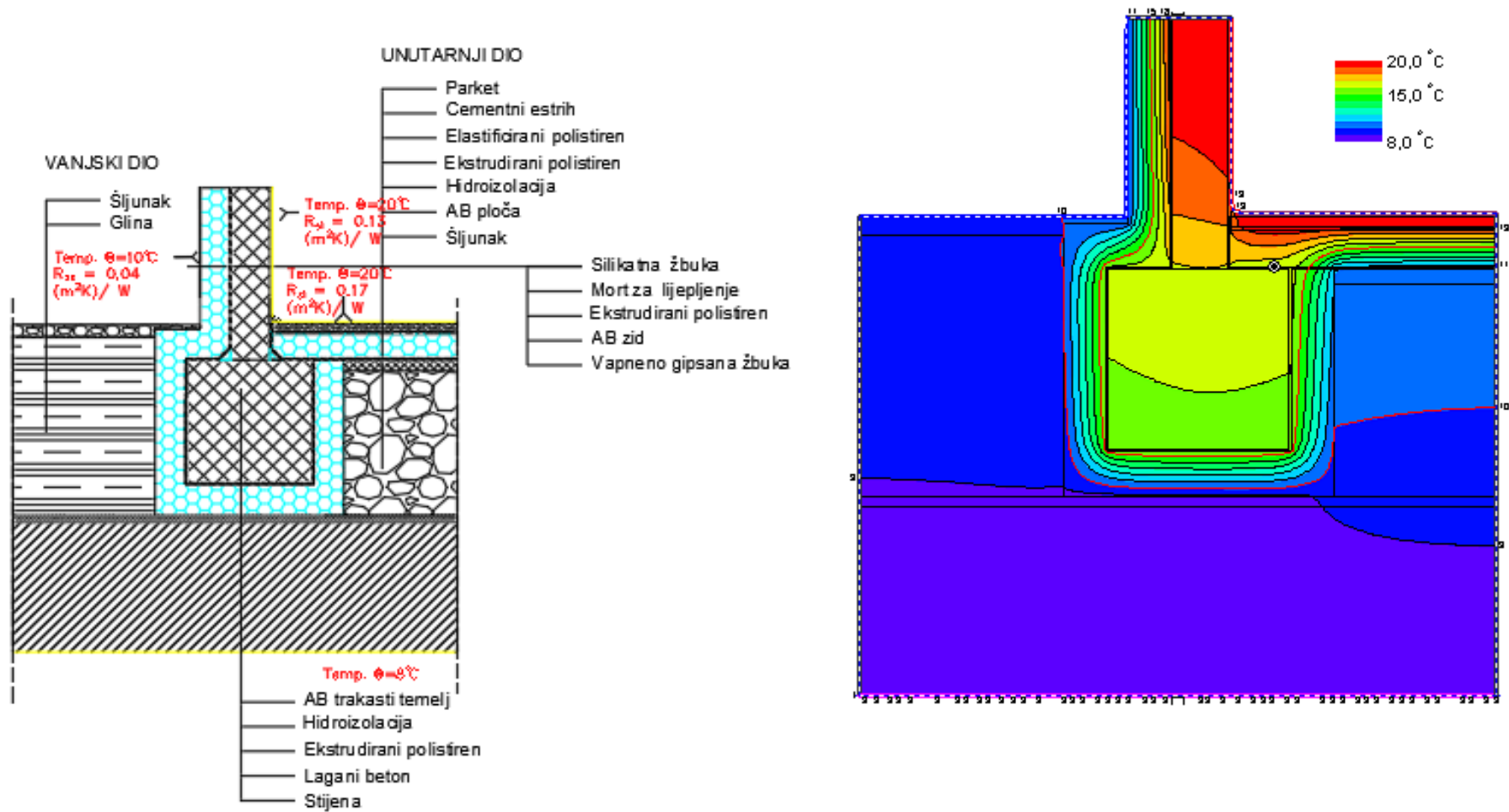
Slika 71. Trakasti temelj s izolacijom $d=10 \text{ cm}$ u Dubrovniku



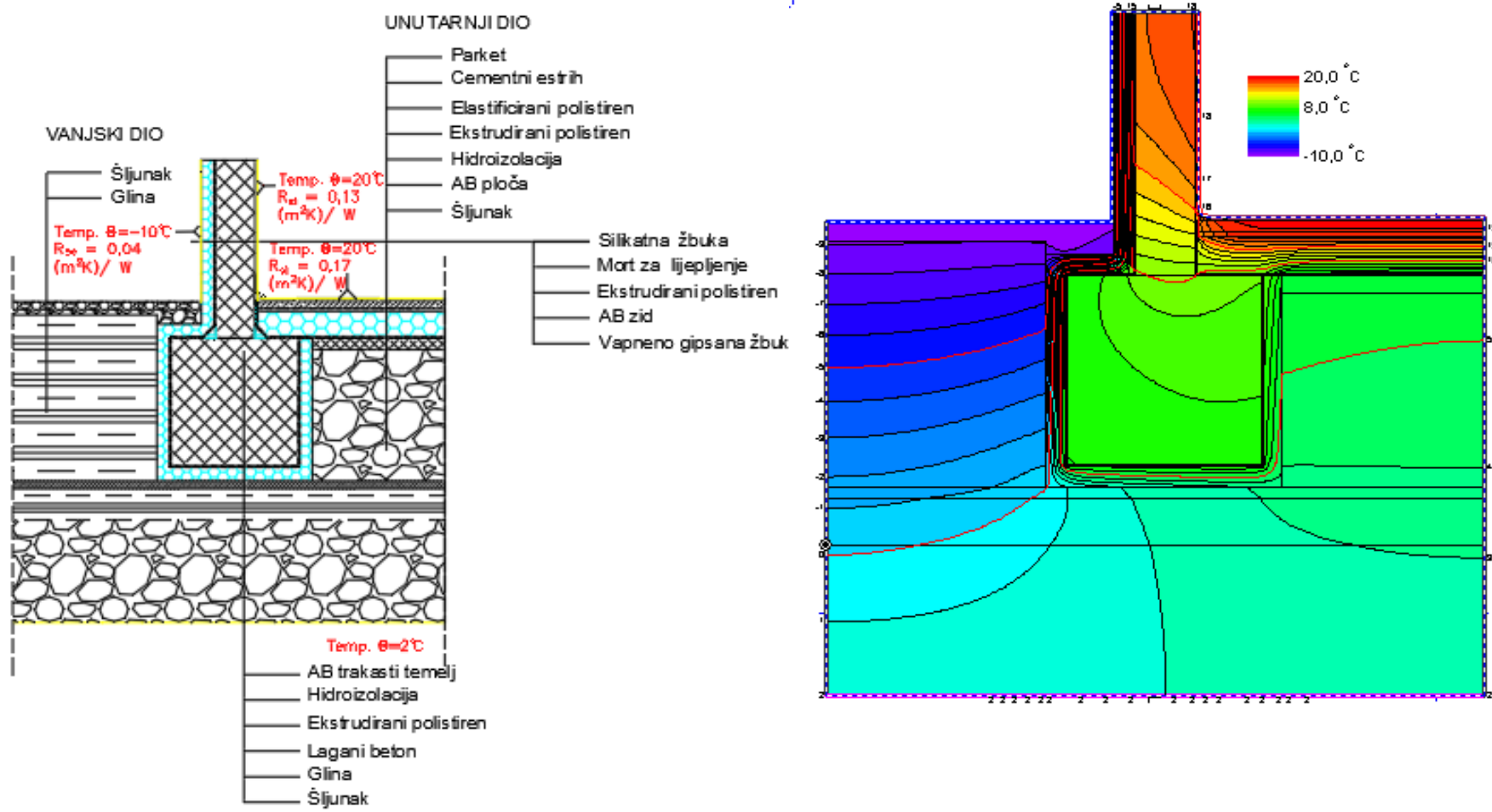
Slika 72. Trakasti temelj s izolacijom $d=12 \text{ cm}$ u Dubrovniku



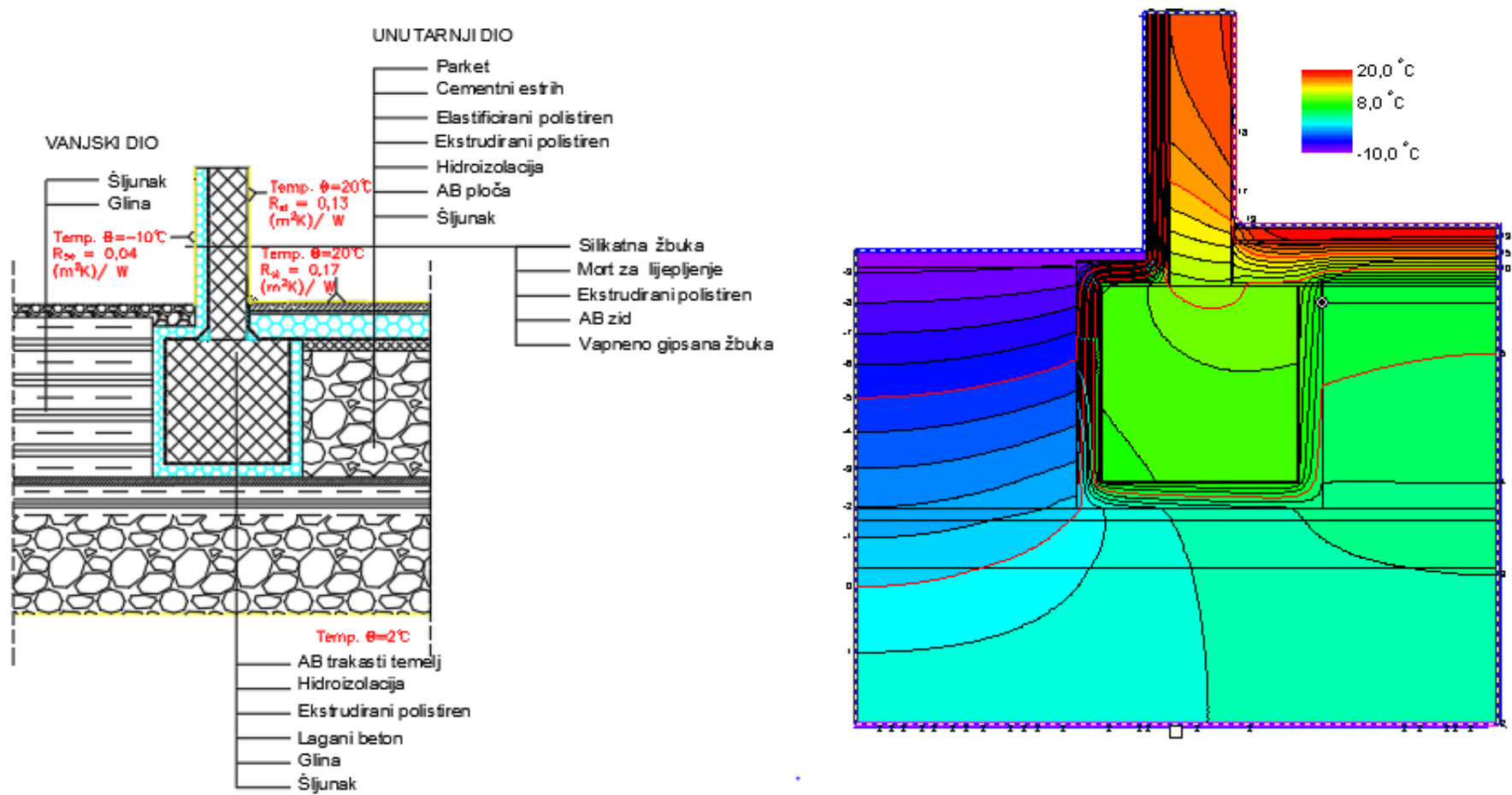
Slika 73. Trakasti temelj s izolacijom $d=20 \text{ cm}$ u Dubrovniku



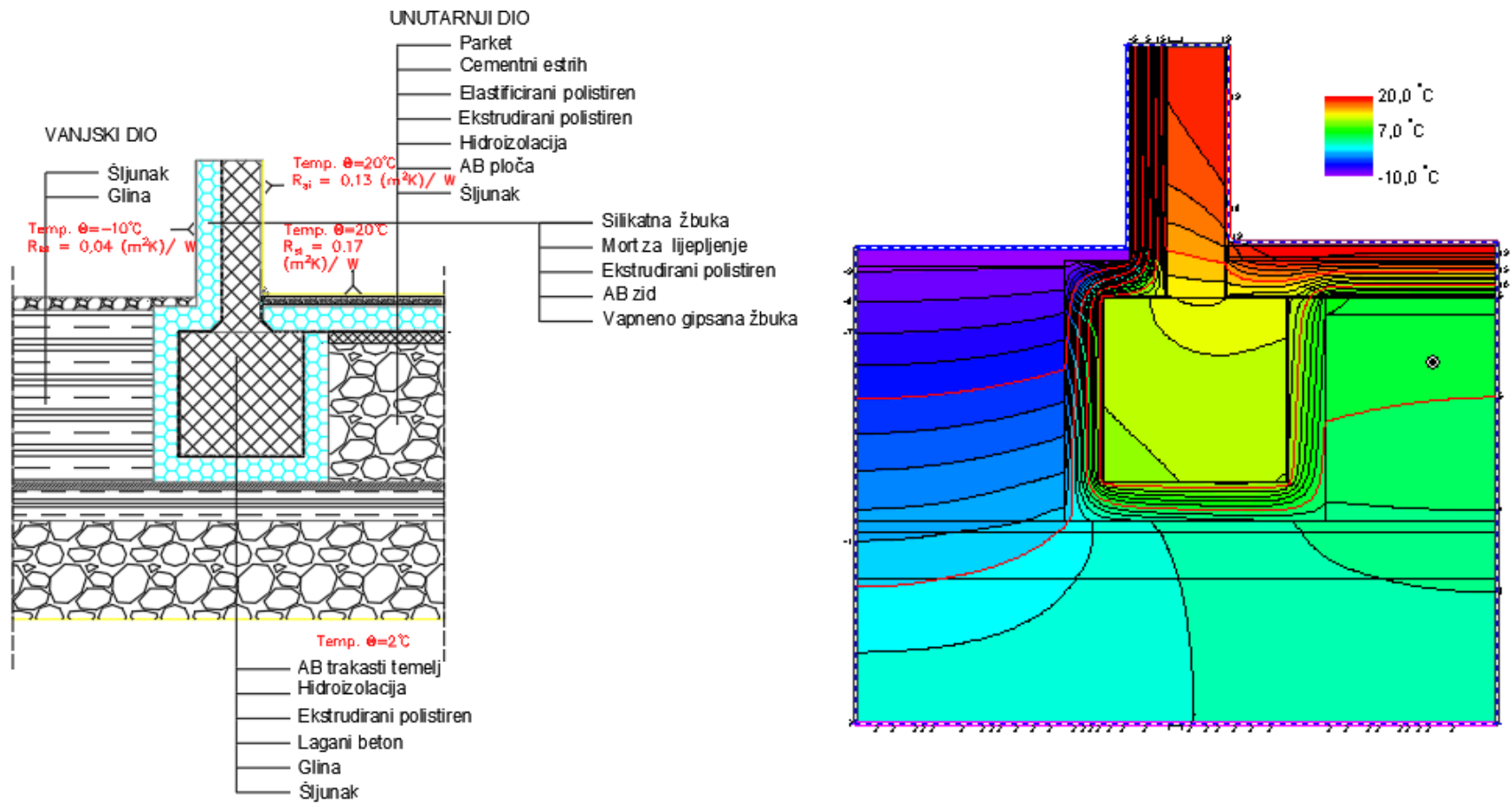
Slika 74. Trakasti temelj s izolacijom $d=24 \text{ cm}$ u Dubroniku



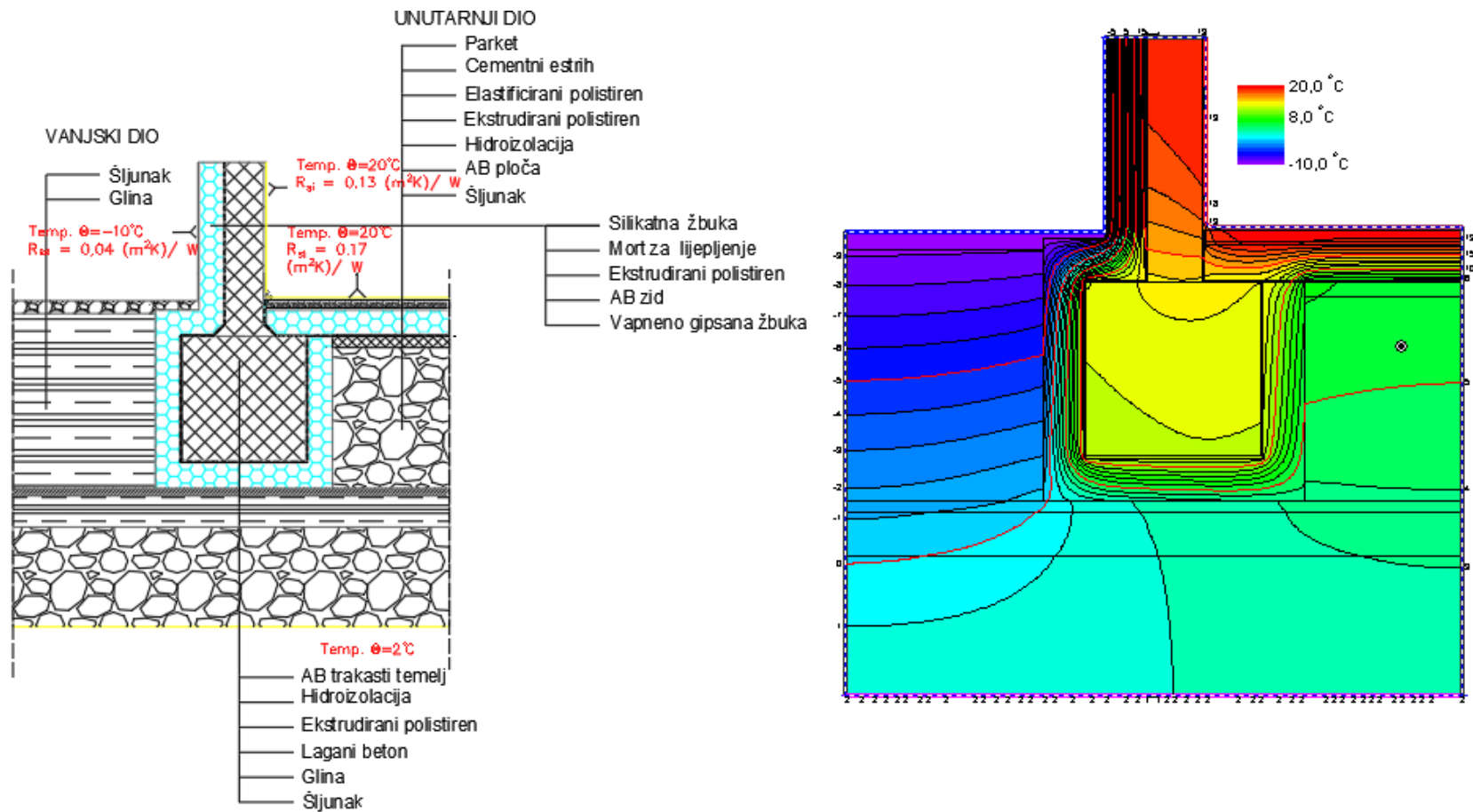
Slika 75. Trakasti temelj s izolacijom $d = 10 \text{ cm}$ u Zagrebu



Slika 76. Trakasti temelj s izolacijom $d = 12$ cm u Zagrebu

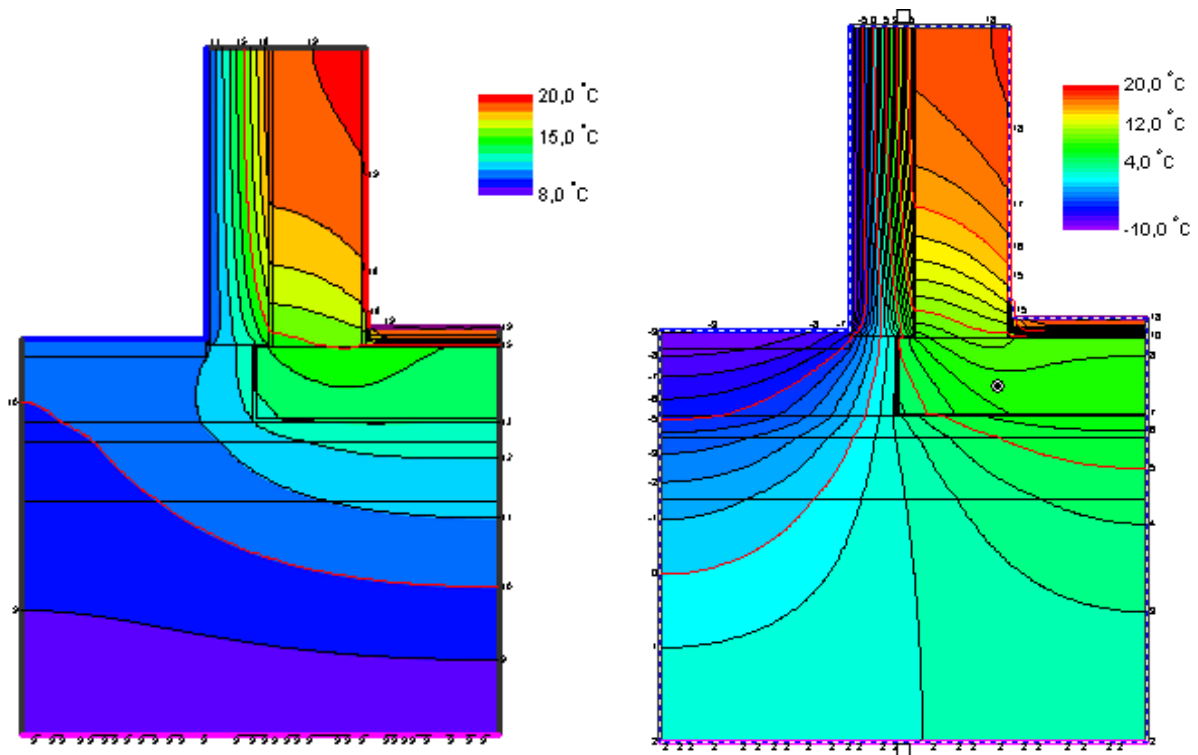


Slika 77. Trakasti temelj s izolacijom $d=20 \text{ cm}$ u Zagrebu

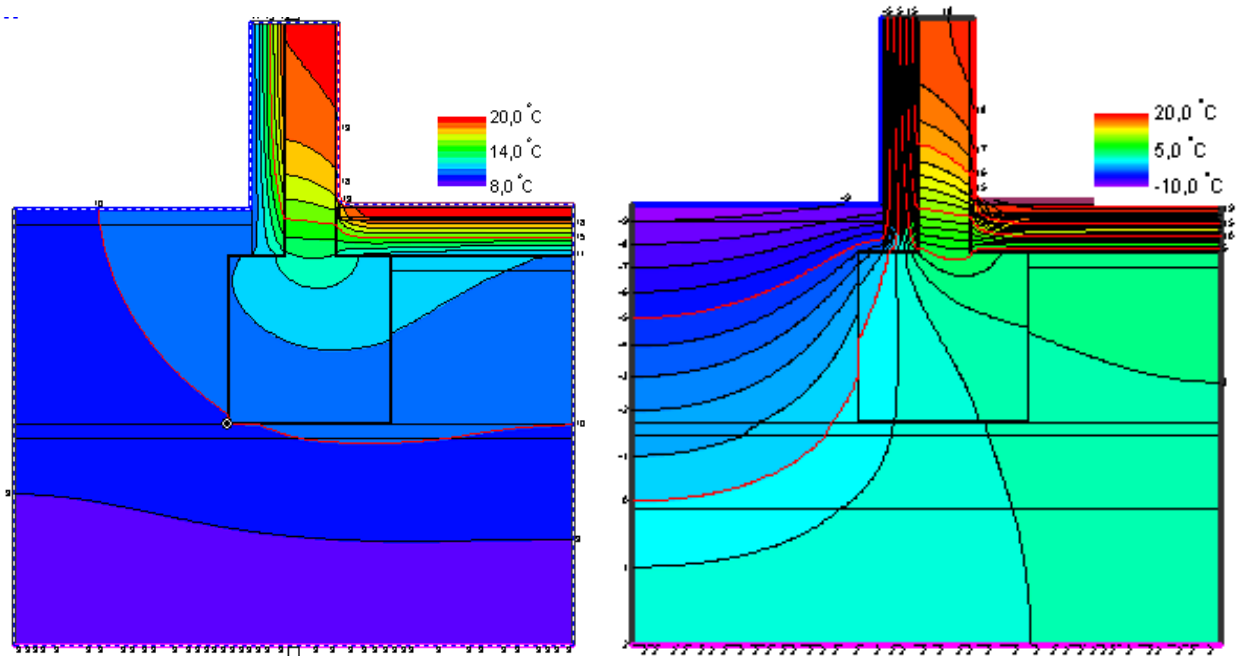


Slika 78. Trakasti temelj s izolacijom $d=24 \text{ cm}$ u Zagrebu

Temperaturna raspodjela na referentnim modelima

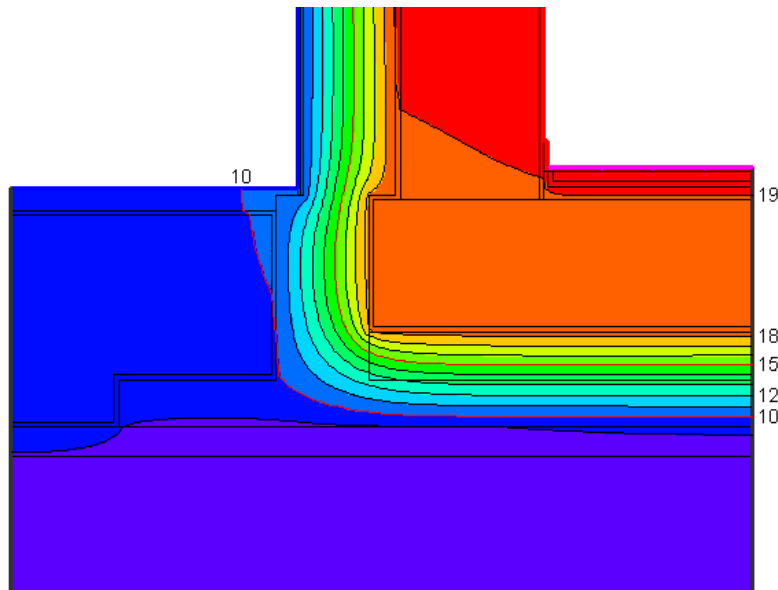


Slika 79. Temperaturna raspodjela detalja na temeljnoj ploči bez XPS-a u Dubrovniku i Zagrebu

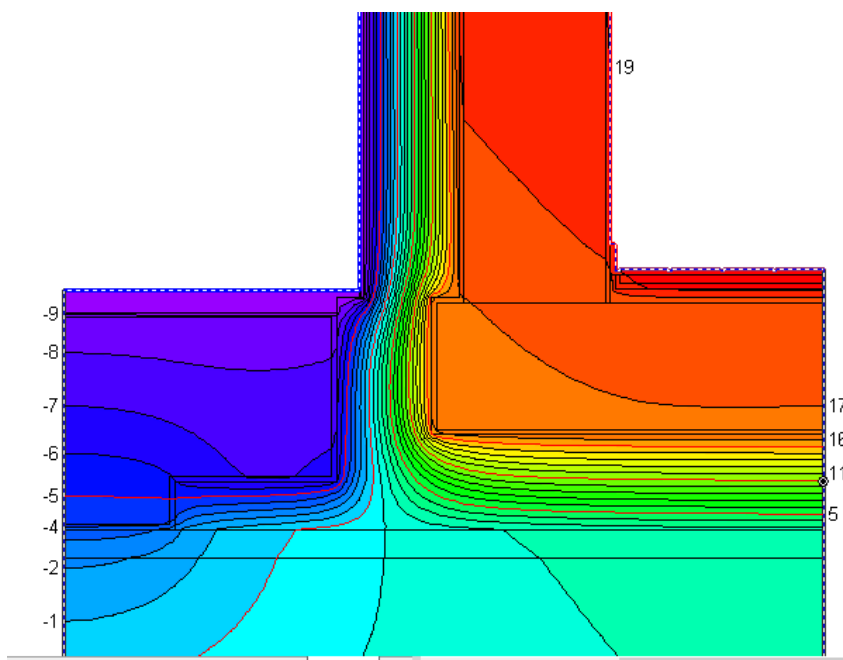


Slika 80. Temperaturna raspodjela detalja na trakastom temelju bez XPS-a u Dubrovniku i Zagrebu

Za detalj s temeljnom pločom na lokaciji Dubrovnik, uz prethodno spomenute rubne uvjete, definirane s vanjskom temperaturom $\Theta_e=10^\circ\text{C}$, unutarnjom temperaturom $\Theta_i=20^\circ\text{C}$ i temperaturom tla $\Theta=8^\circ\text{C}$ te pripadnim plošnim otporima, dobivena je temperaturna raspodjela prikazana na Slikama 63.-66. Gušća raspodjela izoterma na mjestu izolacije predstavlja znatniji pad temperature (npr. pad od 8°C kod detalja s temeljnom pločom i debljinom izolacije $d=20\text{ cm}$, vidljiv na Slici 81.) te smanjenje prijenosa topline kroz taj građevni dio.



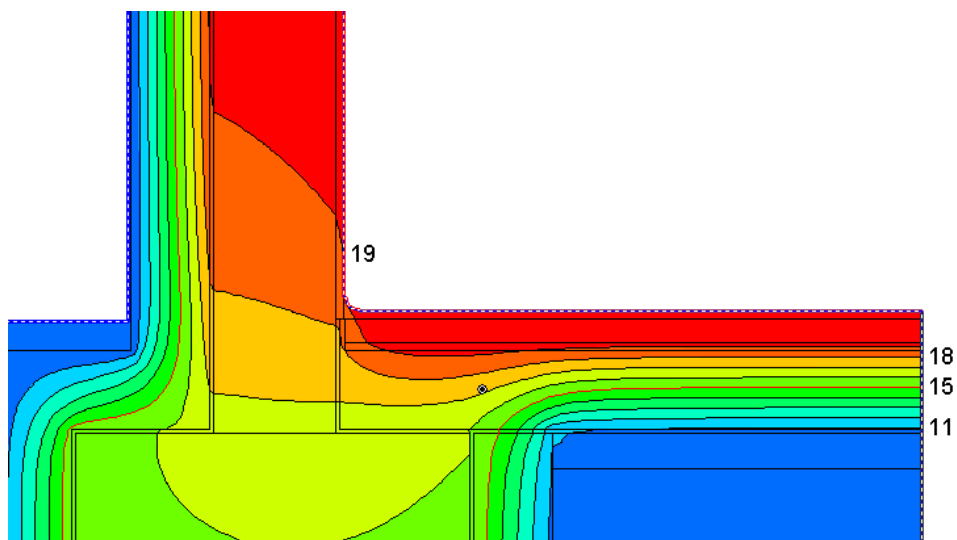
Slika 81. Pad temperature prikazan izotermama (Dubrovnik)



Slika 82. Pad temperature prikazan izotermama (Zagreb)

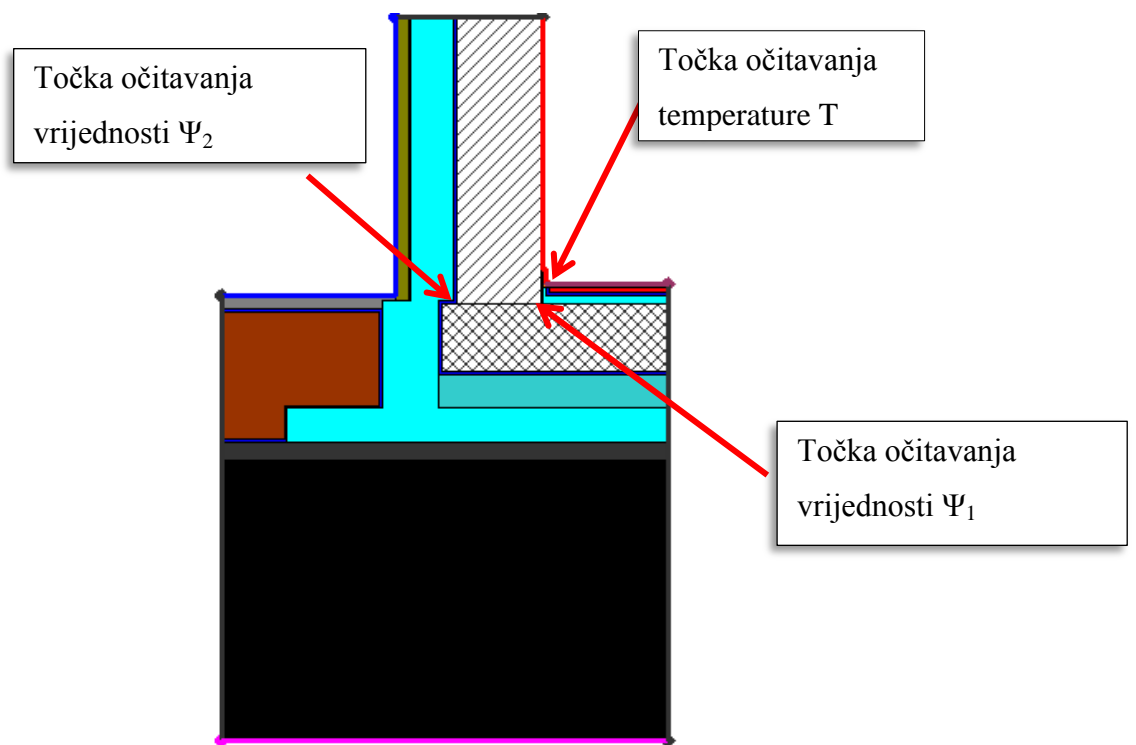
Za isti detalj na različitoj lokaciji, Zagreb definirane su vanjska temperatura $\Theta_e=-10^{\circ}\text{C}$, unutarnja temperatura $\Theta_i=20^{\circ}\text{C}$ i temperatura tla $\Theta=2^{\circ}\text{C}$ te pripadni plošni otpori. Na osnovi dobivenih rezultata uočena je gušća raspodjela izoterma na mjestu izolacije temeljne ploče nego u Dubrovniku. Do toga je došlo zbog veće razlike između unutarnje temperature i temperature tla te samim tim i većeg temperaturnog pada (pad od 11°C kod detalja s temeljnom pločom i debljinom izolacije $d=20\text{ cm}$, vidljiv na Slici. 82.). To nam ukazuje na dobra toplinsko-izolacijska svojstva XPS-a. Različita preraspodjela izoterma za Dubrovnik i Zagreb ispod temeljne ploče je rezultat različito definirane temperature tla.

Kod detalja s trakastim temeljom (Slike 71.-78.) uočeno je zadržavanje topline unutar temelja što je posljedica izoliranja istog. Kao i kod temeljne ploče, pojavile su se gušće izoterme na mjestu izolacije, ali s nešto manjim temperaturnim gradijentom (pad od 4°C na obje lokacije prikazan na Slici 83.).

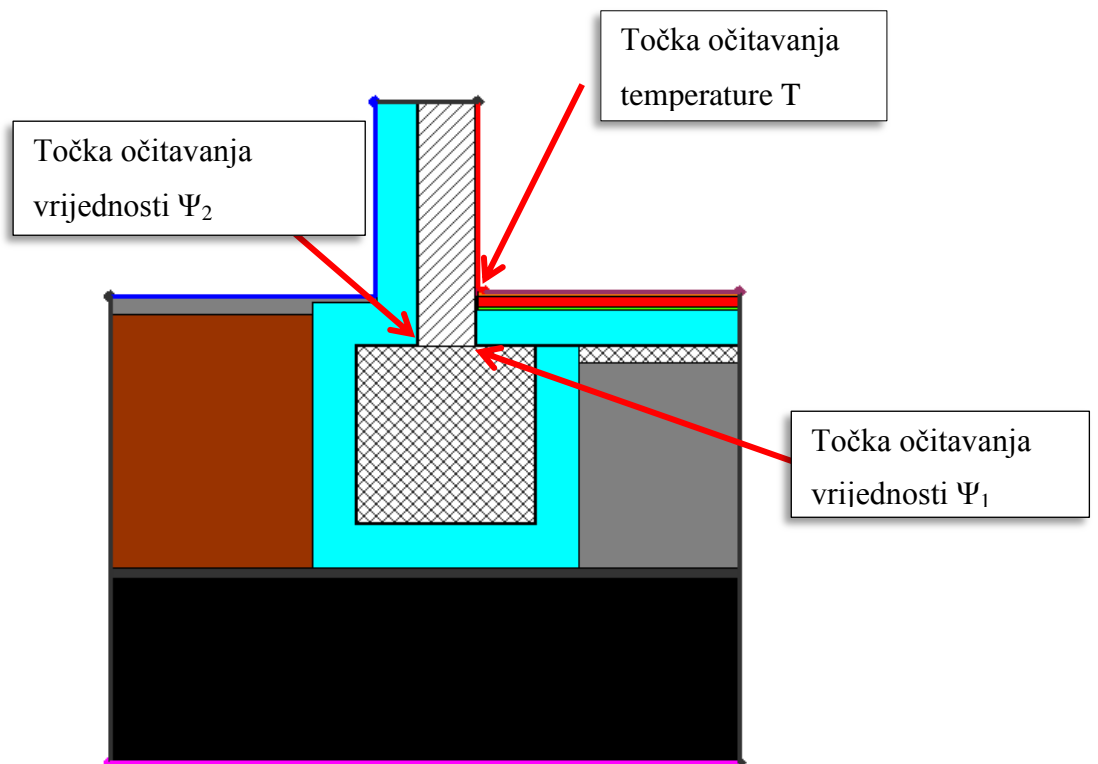


Slika 83. Pad temperature prikazan izotermama

Iz prethodno navedenog, zaključeno je da je u pogledu energetske učinkovitosti bolje izvesti izolaciju ispod temeljne ploče nego trakastog temelja jer je u tom slučaju dvostruko ili čak trostruko povećan pad temperature.



Slika 84. Mjesta očitavanja vrijednosti za detalj temeljne ploče



Slika 85. Mjesta očitavanja vrijednosti za detalj trakastog temelja

Tablica 21. Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti, temperature dobivene u Flixu za temeljnu ploču

	Debljina izolacijskog sloja[cm]	Lokacija	Ψ_1 [W/(mK)]	Ψ_2 [W/(mK)]	T[°C]	f_{Rsi}
1	10	Zagreb	0,121	0,083	18,79	0,96
		Dubrovnik	0,147	0,087	19,44	0,953
2	12	Zagreb	0,109	0,075	18,88	0,949
		Dubrovnik	0,136	0,08	19,47	0,942
3	20	Zagreb	0,088	0,064	18,91	0,946
		Dubrovnik	0,101	0,062	19,51	0,949
4	24	Zagreb	0,081	0,06	19,09	0,956
		Dubrovnik	0,093	0,059	19,54	0,962

Tablica 22 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za referentni model temeljne ploče

Lokacija	Ψ_1 [W/(mK)]	Ψ_2 [W/(mK)]	T[°C]	f_{Rsi}
Zagreb	0,583	0,49	15,3	0,843
Dubrovnik	0,653	0,503	18,13	0,844

Tablica 23 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za trakasti temelj

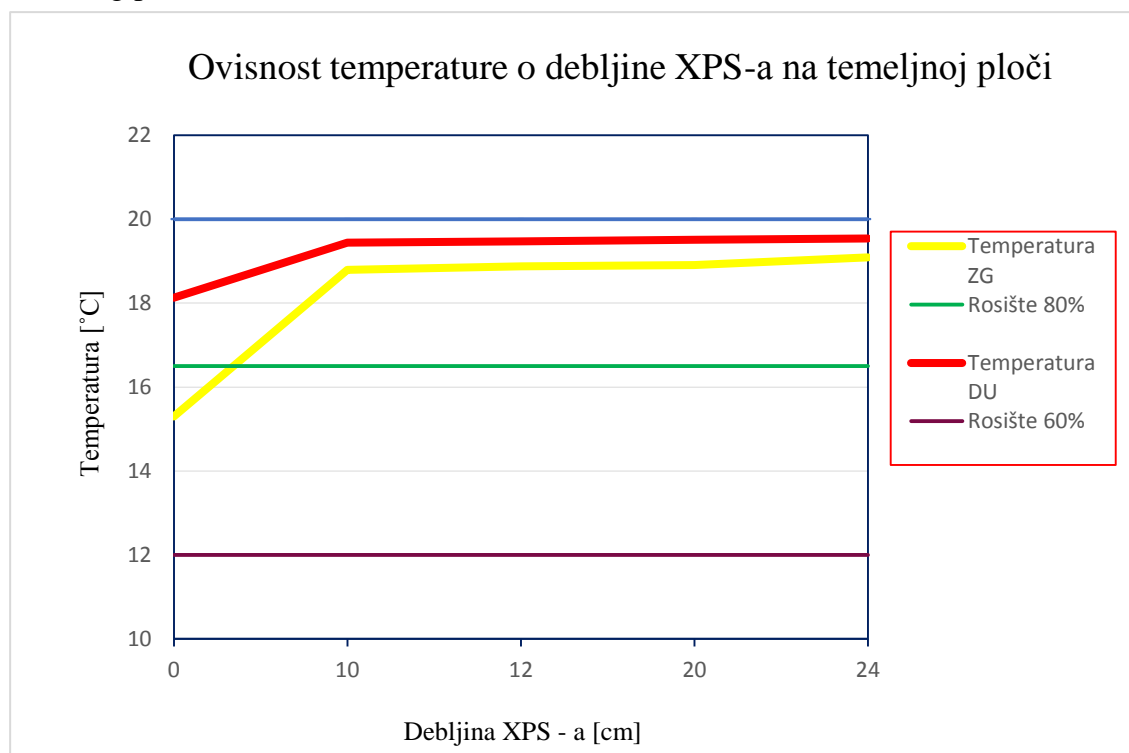
	Debljina izolacijskog sloja[cm]	Lokacija	Ψ_1 [W/(mK)]	Ψ_2 [W/(mK)]	T[°C]	f_{Rsi}
1	10	Zagreb	0,242	0,221	18,18	0,939
		Dubrovnik	0,326	0,297	19,16	0,93
2	12	Zagreb	0,227	0,211	18,37	0,943
		Dubrovnik	0,307	0,281	19,27	0,926
3	20	Zagreb	0,208	0,194	18,76	0,959
		Dubrovnik	0,285	0,262	19,42	0,952
4	24	Zagreb	0,194	0,182	18,97	0,966
		Dubrovnik	0,266	0,246	19,47	0,956

Tablica 24 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za referentni model trakastog temelja

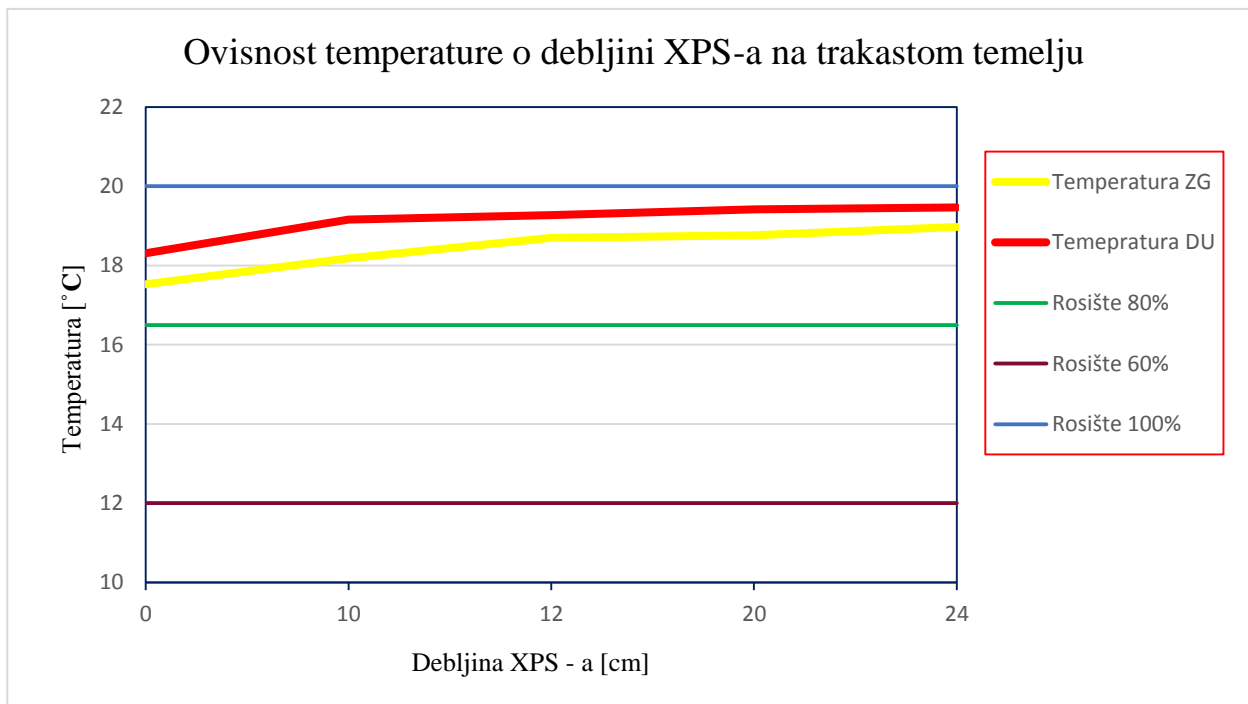
Lokacija	Ψ_1 [W/(mK)]	Ψ_2 [W/(mK)]	T[°C]	f_{Rsi}
Zagreb	0,49	0,463	17,53	0,918
Dubrovnik	0,572	0,53	18,31	0,904

Temperatura rošenja pri unutarnjoj temperaturi zraka 20°C i relativnoj vlažnosti od 60% iznosi 12°C dok pri relativnoj vlažnosti zraka od 80% ona iznosi 16.5 °C. Prema grafu ovisnosti temperature o debljini XPS-a, za detalj temeljne ploče s izolacijom u Zagrebu i Dubrovniku, u promatranoj točki konstrukcije (Slika 84.) očito neće doći do pojave kondenzacije ni u jednom od ova dva slučaja pri relativnoj vlažnosti zraka od 60% budući da je temperatura promatrane točke veća od temperature rošenja (Slika 86.) pa je to ujedno i na strani sigurnosti. Ukoliko se promatra relativna vlažnost zraka od 80% vidljivo je na referentnom detalju za Zagreb temperatura na promatranoj točki niža od temperature rošenja te je došlo do kondenzacije. Kod detalja s izolacijom iz slike 86. Vidljivo je da ne dolazi do kondenzacije jer je temperatura rošenja manja od temperature promatrane točke. Za istu relativnu vlažnost uočeno je da su temperature veće od temperature rošenja te samim tim nije kritična.

Pri unutarnjoj temperaturi zraka od 20°C i relativnoj vlažnosti od 100% temperatura rošenja je 20°C. Prema slici 86. temperature promatrane točke za različite debljine XPS-a manje su od temperature rošenja te će doći do kondenzacije. Vrlo je teško doseći relativnu vlažnost od 100% te ovaj slučaj nije smatran relevantnim, ali je prikazan radi boljeg razumijevanja promatranog problema.



Slika 86. Grafički prikaz ovisnosti temperature o debljini XPS-a za temeljnu ploču



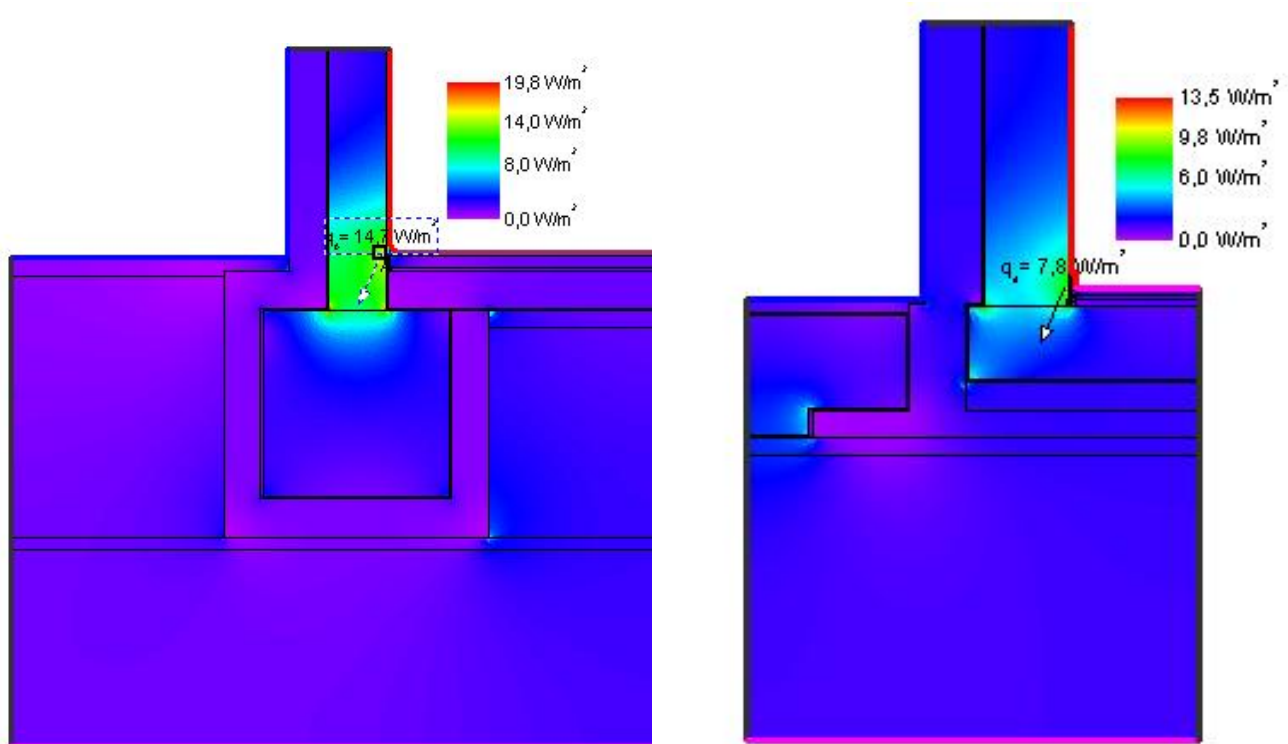
Slika 87. Grafički prikaz ovisnosti temperature o debljini XPS-a za trakasti temelj

Na isti način promatran je odnos temperatura rošenja i temperatura promatranih točaka detalju ukoliko je izveden trakasti temelj. Slika 87. je promatrana na isti način kao i prethodna te je uočeno da za bilo koju relativnu vlažnost osim one od 100% neće doći do kondenzacije. S obzirom na prethodnu diskusiju o pojavi relativne vlažnosti od 100% donesen je zaključak da ona nije relevantna.

Za oba slučaja detalja temeljne ploče i trakastog temelja detalji pri relativnoj vlažnosti od 60% su sigurni od kondenzacije, dok kod relativne vlažnosti od 80% za referentni detalj temeljne ploče u Zagrebu je došlo do kondenzacije. Pojava kondenzacije izaziva rizik od građevne štete kao što su korozije čelika i pojava gljivica.

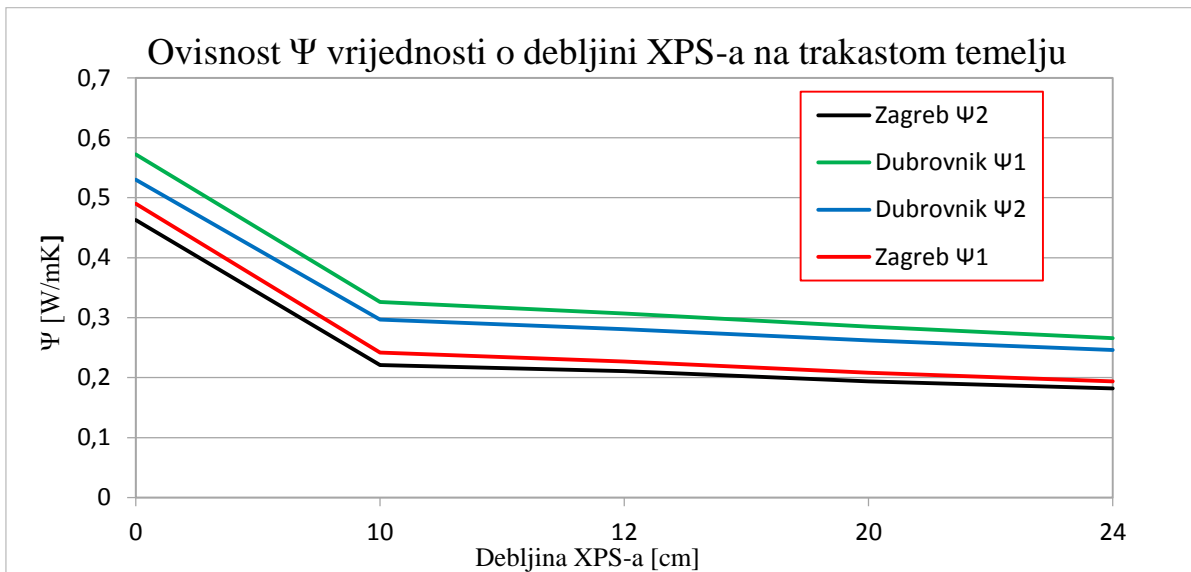
Osim temperatura, očitane su i vrijednosti faktora temperature na unutarnjoj površini f_{Rsi} . Iz Tablica 21., 22., 23. i 24. vidljivo je da su se povećale vrijednosti u odnosu na referentni model. Vrijednosti f_{Rsi} su blizu 1 što znači da je površinska temperatura približno jednaka temperaturi zraka u prostoriji i da ne dolazi do rizika od pojave kondenzacije, a samim tim i gljivica.

Do promjene vrijednosti toplinskog toka dolazi na mjestima promjene geometrije ili materijala gdje je toplinski tok povećan što je vidljivo na Slici 88. Analizom toplinskog toka kroz detalj temeljne trake i temeljne ploče debljine 20 cm u Dubrovniku dobivena je dvostruka vrijednost toplinskog toka kroz temeljnu traku (14.7 W/m^2) u odnosu na temeljnu ploču (7.8 W/m^2). Povećanje toplinskog toka ukazuje na pojavu toplinskog mosta što je još jedna prednost temeljne ploče u odnosu na temeljnu traku

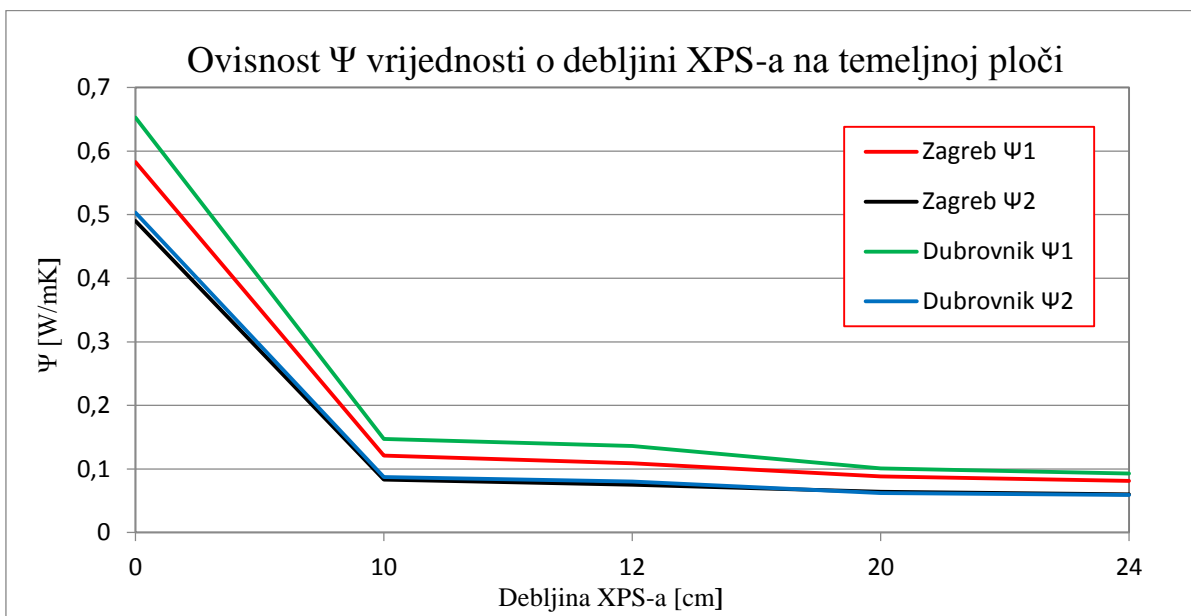


Slika 88. Raspodjela toplinskog toka na trakastom temelju i temeljnoj ploči

Linijski koeficijent prolaska topline Ψ znatno je smanjen u odnosu na referentni model što ukazuje na manji toplinski gubitak kroz toplinski most. Promatrane su dvije referentne točke s vrijednostima Ψ_1 i Ψ_2 za svaki detalj označene na Slici 78. Ψ vrijednosti kod detalja s temeljnom pločom su manje nego kod detalja s trakastim temeljom što se vidi na Slikama 89. i 90. S iste slike uočena je veća vrijednost Ψ_1 u odnosu na Ψ_2 . Razlog tome je što su kod unutarnjih dimenzija preklopljeni podni i zidni element te ukupni prijenos topline sadrži više materijala nego što ga ima u konstrukciji.



Slika 89. Grafički prikaz Ψ vrijednosti i temperature u ovisnosti o debljini izolacije i lokaciji za temeljnu ploču



Slika 90. Grafički prikaz Ψ vrijednosti i temperature u ovisnosti o debljini izolacije i lokaciji za temeljnu ploču

14. Zaključak

U okviru ovog rada provedeno je istraživanje pri čemu se analizirao utjecaj temeljenja konstrukcije na sloju XPS-a. Promatrao se utjecaj na seizmičke i toplinske probleme. Konstrukcija je modelirana u dva softvera, ETABS za seizmičku i Flixo za toplinsku analizu. Budući da je ovo područje slabo istraženo, rješenja koja su prikazana u ovom radu mogu biti jako korisna inženjerima pri projektiranju u budućnosti.

Seizmička analiza konstrukcije modela temeljenog na XPS-u pokazuje značajna odstupanja modalnih oblika od referentnog modela bez obzira na krutost i debljinu XPS-a. Osim modalnih oblika i njihovog povećanja (za temeljnu ploču povećanje od 3,5 puta te za trakasti temelj povećanje od 3,8) mogu se vidjeti oscilacije momenata najopterećenijih zidova kod modela temeljenog na XPS-u, u odnosu na referentni model (maksimalno odstupanje 38%). Prikazani rezultati mogu biti dvosmisleni ukoliko se razmatraju površno, pa se napominje da konstrukcija promatrana u ovom radu ne daje nužno referentne odnose razmatranih parametara koji vrijede za svaku konstrukciju. Unatoč tome, pregled ponašanja ove konstrukcije i XPS-a može se uzeti u obzir u preliminarnom koncipiranju građevine, a svakako se preporuča, pogotovo za veće i značajnije konstrukcije, provesti slične seizmičke analize utjecaja XPS-a na konstrukciju.

Dobiveni rezultati toplinske analize za prijenos topline preko tla za detalj temeljne ploče i trakastog temelja položenih na XPS-u različitih debljina iskazani su pomoću Ψ vrijednosti, temperaturnih raspodjela, toplinskih tokova i f_{Rsi} vrijednosti.

Za slučaj detalja temeljne ploče na XPS-u u Dubrovniku i Zagrebu dobivene su oko 5 puta manje Ψ vrijednosti u odnosu na referentni model, dok su za detalj trakastog temelja dobivene oko 2 puta manje Ψ vrijednosti. Ovo je samo jedan od pokazatelja prednosti postavljanja izolacije ispod temelja u odnosu na neizolirani temelj. Naime, što je manja Ψ vrijednosti to je manja opasnost od pojave toplinskog mosta u konstrukciji, a to je danas ujedno i jedan od najvažnijih kriterija za projektiranje zgrada gotovo nulte energije. Izbjegavanje toplinskih mostova u projektiranju i izgradnji nužan je način da se izbjegne nepotrební gubitak topline. Posebnu pažnju treba posvetiti projektiranju i modeliranju spoja međukatne konstrukcije i temelja jer su tu potencijalno najveći gubici topline. Osim gubitaka

toplina potrebno je obratiti pozornost potencijalnu građevnu štetu uslijed kondenzacije koja se manifestira u obliku stalnih problema sa pojavom gljivica, korozije armature koja čak može dovesti do gubitka stabilnosti.

U konačnici, na osnovu dobivenih rezultata toplinskog i seizmičkog numeričkog proračuna dolazi se do zaključka da je prihvatljivije rješenje izvedbe temelja na sloju XPS-a u odnosu na rješenje na izvedbu XPS-a na temeljnoj ploči. Također iz dobivenih rezultata i okvirnom ekonomskom računicom dolazi se do zaključka da je bolje rješenje izvedba temeljne ploče temeljene na sloju XPS-a u odnosu na rješenje sa trakastim temeljima. Kao što je već prethodno navedeno kod detalja s toplinskom izolacijom Ψ vrijednosti su 5 puta manje za temeljnu ploču odnosno 2 puta za trakasti temelj u odnosu na referentni. To je jedan od razloga zašto bi projektant izabrao radije temeljnu ploču, a ne trakasti temelj. Pod ekonomskom računicom podrazumijeva se ušteda na vremenu, utrošku betona, armature, izvedbi i ugradnji oplata temeljne ploče u odnosu na trakaste temelje. Svakako da se ova rješenja moraju kalibrirati između optimalnog odnosa utjecaja XPS-a ispod temelja na toplinske i seizmičke parametre konstrukcije te je ovim radom dan doprinos inženjerskoj zajednici za provedbu takvih analiza u praktičnoj primjeni s preporukom za provedbu dodatnih analiza na konstrukcijama različitih tlocrta i vrstama XPS-a kako bi se znanje i informiranost o ovom problemu znatno poboljšala u odnosu na trenutno stanje.

Zahvale

Puno hvala mentorima doc.dr.sc. Bojanu Milovanoviću, dipl. ing. građ. i doc. dr. sc. Josipu Ataliću, dipl. ing. građ. na izuzetnom zalaganju, strpljenju i savjetima pri istraživanju i izradi numeričkog modela.

Veliko hvala i tvrtci FIBRAN d.o.o Slovenia za pomoć, suradnju i ustupanje potrebnih informacija o svojstvima materijala korištenih u ovom radu. Posebno hvala gospođi Marjeti Vide Lutman i Tanji Herr koje su nam svojom susretljivošću i vrijednim savjetima pomogle tijekom izrade rada.

Na kraju, hvala svima koji su nam davali savjete, ali i kritike koje su nam pomogle pri sazrijevanju i usavršavanju kako pojedinca, tako i skupine.

Popis literature

- [1] Eurostat, “Consumption of energy.” [Online]. Available: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy.
- [2] M. G. I and PROSTORNOGA UREĐENJA, “Tehnički propis o racionalnoj upotrebi energije....pdf.” NARODNE NOVINE, p. 16, 2015.
- [3] I. Ivančić, “SEIZMIČNOST HRVATSKE.” [Online]. Available: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_seizmologiji.
- [4] Ž. Koški, “GRAĐEVINSKA FIZIKA,” 2015.
- [5] B. Milovanović and I. Banjad Pečur, “Građevinska fizika - predavanja.”
- [6] V. Šimetin, *Građevinska fizika*. Zagreb.
- [7] P. Kulišić, *Mehanika i toplina*. Zagreb: Školska knjiga, 2005.
- [8] D. R. Pitts and L. E. Sissom, “Theory and Problems of Heat Transfer,” 1998.
- [9] A. Galović, “Termodinamika 2,” Zagreb, 2003.
- [10] “Građevni elementi,” *Građevinar*, vol. 63, no. 4, pp. 401–404, 2011.
- [11] H. Nyberg, “Thermal bridges at foundations.” [Online]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/155743.pdf>.
- [12] V. Kilar, D. Koren, and M. Zbašnik-senegačnik, “Ponašanje zgrada temeljenih na toplinskoj izolaciji pri potresu,” *Građevinar*, vol. 65, no. 5, pp. 423–433, 2013.
- [13] “Toplinski most.” [Online]. Available: <http://www.enu.fzoeu.hr/ee-savjeti/toplinska-zastita-objekta/toplinski-most>.
- [14] “Toplinska, zvučna i hidroizolacija.” [Online]. Available: http://www.masterplast.hu/toplinska_zvucna_hidrozilacija/1st/9876.
- [15] Ž. Šimunić, “Polimeri u graditeljstvu,” Građevinski fakultet Zagreb, 2006.
- [16] “Polistiren.” [Online]. Available: http://www.arhitekko.hr/menu.html?http://www.arhitekko.hr/_polistiren.html.
- [17] V. Bokan-Bosiljkov, “Report about test results obtained by testing FIBRAN products

- in compression and shear,” Ljubljana, 2013.
- [18] C. Plummer, D. McGeary, and D. Carlson, *Physical Geology*, 8. Boston: MCGraw Hill, 2001.
- [19] M. Hrasnica, *Seizmička analiza zgrada*. Sarajevo, 2005.
- [20] D. Meštrović, “Potresno inženjerstvo.” 2016.
- [21] M. Čaušević, *Potresno inženjerstvo*. Zagreb: Školska knjiga, 2001.
- [22] D. Lazarević, *Dinamika konstrukcija s uvodom u potresno inženjerstvo*. Zagreb, 2013.
- [23] T. Kalman and V. Sigmund, “Superpozicija modalnih odgovora spektralne analize,” *Teh. Vjesn.*, vol. 4, pp. 17–24, 2007.
- [24] J. Chambers and T. Kelly, “Nonlinear Dynamic Analysis - The Ony Option for Irregular Structures,” *13th World Conf. Earthq. Eng.*, no. 1389, 2004.
- [25] M. Meštrović, “METODA KONAČNIH ELEMENATA,” 2017.
- [26] J. Atalić and D. Lazarević, “Plošni nosači - predavanja,” Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [27] D. Kaučić, “Karakteristike temperatura tla u Hrvatskoj,” *Rasprave 24*, pp. 65 – 71, Zagreb 1989.

Popis slika

Slika 1. <i>Podjela ukupne potrošnje energije</i> [1]	1
Slika 2. <i>Epicentri potresa u Hrvatskoj (razdoblje 1850. – 2015.g.)</i> [3].....	2
Slika 3. <i>Prijenos topline kroz elemente</i> [11]	16
Slika 4. <i>Prijenos topline kroz elemente s ukupnim unutarnjim dimenzijama</i> [11].....	16
Slika 5. <i>Spoj vanjskog zida i podne ploče- prekid toplinskog mosta izolacijskom bazom</i> [17]	18
Slika 6. <i>Spoj vanjskog zida i podne ploče temeljene na toplinskoj izolaciji – spoj bez toplinskog mosta</i> [17].....	18
Slika 7. <i>Toplinski tok kroz ovojnicu podruma</i> [11]	19
Slika 8. <i>Shema prijenosa topline u kutu kuće</i> [11]	20
Slika 9. <i>Shema prijenosa topline kroz elemente u kutu</i> [11]	20
Slika 10. <i>Ekstrudirani polistiren (XPS)</i>	21
Slika 11. <i>Proces proizvodnje XPS-a</i>	24
Slika 12. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 400-L</i> [17].	25
Slika 13. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 400-L - početni dio grafa</i> [17]	25
Slika 14. <i>Faze opterećenja/rasterećenja uzorka XPS 400-L</i> [17]	26
Slika 15. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 700-L</i> [17].	27
Slika 16. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim tlačnim ispitivanjem XPS-a 700-L - početni dio grafa</i> [17]	27
Slika 17. <i>Faze opterećenja/rasterećenja uzorka XPS 700-L</i> [17]	28
Slika 18. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim posmičnim ispitivanjem XPS-a 400-L</i> [17]	29
Slika 19. <i>Posmični test primijenjen na posmičnom stroju</i> [17].....	30
Slika 20. <i>Rezultati ispitivanja dobiveni monotonim posmičnim ispitivanjem XPS-a 700-L</i> [17]	31
Slika 21. <i>Radni dijagrami krhkog i duktilnog materijala</i>	40
Slika 22. <i>Bilinearni dijagram sila-pomak</i>	41
Slika 23. <i>Mjerodavno spektralno ubrzanje za određeni period osciliranja</i>	43
Slika 24. <i>Elastični i projektni spektri odziva</i>	44

Slika 25. <i>Spektri odgovora prema Eurocodeu 8</i>	45
Slika 26. <i>Elastični projektni spektar</i>	46
Slika 27. <i>Sustav s koncentriranom masom, izložen ubrzanju tla [20]</i>	54
Slika 28. <i>Koordinatne funkcije u obliku kvadratne parabole</i>	62
Slika 29. <i>Četverokutni konačni elementi za problem savijanja ploča</i>	64
Slika 30. <i>Numerički model konstrukcije (10 katova)</i>	67
Slika 31. <i>Raspored linkova XPS-a u odnosu na razmatrane vrste temeljenja: temeljna ploča(dolje) i trakasti temelj(gore)</i>	68
Slika 32. <i>Prikaz promatranih zidova prizemlja konstrukcije: P 11, P 1088, P 1002</i>	68
Slika 33. <i>Prikaz interakcije konstrukcije i tla bez utjecaja XPS-a za temeljnu ploču (gore) i trakasti temelj (dolje)</i>	69
Slika 34. <i>Prikaz interakcije konstrukcije i tla bez preko sloja XPS-a za temeljnu ploču (gore) i trakasti temelj (dolje)</i>	70
Slika 35. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P11</i>	71
Slika 36. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1088</i>	71
Slika 37. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1002</i>	72
Slika 38. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period</i>	72
Slika 39. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period</i>	73
Slika 40. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period</i>	73
Slika 41. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P11</i>	74
Slika 42. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1088</i>	74
Slika 43. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1002</i>	75
Slika 44. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period</i>	75
Slika 45. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period</i>	76
Slika 46. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period</i>	76
Slika 47. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P11</i>	77
Slika 48. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1088</i>	77
Slika 49. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1002</i>	78
Slika 50. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period</i>	78
Slika 51. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period</i>	79
Slika 52. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period</i>	79
Slika 53. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P11</i>	80
Slika 54. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1088</i>	80

Slika 55. <i>Dijagram momenti – katnost za zid P1002</i>	81
Slika 56. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 1. vlastiti period</i>	81
Slika 57. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 2. vlastiti period</i>	82
Slika 58. <i>Dijagram vlastiti periodi – katnost za 3. vlastiti period</i>	82
Slika 59. <i>Usporedba modalnih oblika referentnog modela (lijevo) i modela s XPS-om (desno)</i>	83
Slika 60. <i>Usporedba maksimalnih katnih pomaka za model temeljen na XPS-u (gore) i model bez XPS-a (dolje)</i>	87
Slika 61. <i>Projektni spektar</i>	88
Slika 62. <i>Generiranje mreže konačnih elemenata u Flixo-u</i>	91
Slika 63. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=10$ cm u Dubrovniku</i>	95
Slika 64. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=12$cm u Dubrovniku</i>	96
Slika 65. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=20$cm u Dubrovniku</i>	97
Slika 66. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=24$ cm u Dubrovniku</i>	98
Slika 67. <i>Temeljna ploča</i>	99
Slika 68. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=12$ cm u Zagrebu</i>	100
Slika 69. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=20$ cm u Zagrebu</i>	101
Slika 70. <i>Temeljna ploča s izolacijom $d=24$ cm u Zagrebu</i>	102
Slika 71. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=10$ cm u Dubrovniku</i>	103
Slika 72. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=12$ cm u Dubrovniku</i>	104
Slika 73. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=20$ cm u Dubrovniku</i>	105
Slika 74. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=24$ cm u Dubroniku</i>	106
Slika 75. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d = 10$ cm u Zagrebu</i>	107
Slika 76. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d = 12$ cm u Zagrebu</i>	108
Slika 77. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=20$ cm u Zagrebu</i>	109
Slika 78. <i>Trakasti temelj s izolacijom $d=24$ cm u Zagrebu</i>	110
Slika 79. <i>Temperaturna raspodjela detalja na temeljnoj ploči bez XPS-a u Dubrovniku i Zagrebu</i>	111
Slika 80. <i>Temperaturna raspodjela detalja na trakastom temelju bez XPS-a u Dubrovniku i Zagrebu</i>	111
Slika 81. <i>Pad temperature prikazan izotermama (Dubrovnik)</i>	112
Slika 82. <i>Pad temperature prikazan izotermama (Zagreb)</i>	112
Slika 83. <i>Pad temeperature prikazan izotermama</i>	113

Slika 84. <i>Mjesta očitavanja vrijednosti za detalj temeljne ploče</i>	114
Slika 85. <i>Mjesta očitavanja vrijednosti za detalj trakastog temelja</i>	114
Slika 86. <i>Grafički prikaz ovisnosti temperature o debljini XPS-a za temeljnu ploču</i>	116
Slika 87. <i>Grafički prikaz ovisnosti temperature o debljini XPS-a za trakasti temelj.....</i>	117
Slika 88. <i>Raspodjela toplinskog toka na trakastom temelju i temeljnoj ploči.....</i>	118
Slika 89. <i>Grafički prikaz Ψ vrijednosti i temperature u ovisnosti o debljini izolacije i lokaciji za temeljnu ploču</i>	119
Slika 90. <i>Grafički prikaz Ψ vrijednosti i temperature u ovisnosti o debljini izolacije i lokaciji za temeljnu ploču</i>	119

Popis tablica

Tablica 1. Najveće dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline.....	7
Tablica 2. Svojstva XPS-a [4].....	21
Tablica 3. Karakteristike XPS 400-L u skladu s EN 826: 1996. [17].....	26
Tablica 4. Karakteristike XPS 700-L u skladu s EN 826: 1996. [17].....	28
Tablica 5. Karakteristike XPS 400-L u skladu s EN 21090: 1997 [17].....	30
Tablica 6. Karakteristike XPS 700-L u skladu s EN 21090: 1997 [17].....	31
Tablica 7. Vertikalna i posmična krutost XPS-a.....	37
Tablica 8. Varijacija parametara XPS-a.....	65
Tablica 9. Varijacija katnosti konstrukcije na području Zagreba u odnosu na parametre XPS-a.....	65
Tablica 10. Varijacija katnosti konstrukcije na području Dubrovnika u odnosu na parametre XPS-a.....	65
Tablica 11. Parametri za uspoređivanje.....	66
Tablica 12. Krutosti XPS-a.....	67
Tablica 13. Krutosti temeljnog tla.....	67
Tablica 14. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P1002.....	84
Tablica 15. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P11.....	85
Tablica 16. Prikaz odstupanja iznosa momenata modela sa XPS-om od referentnog modela za zid P1088.....	85
Tablica 17. Parametri koji su varirani u Flixo-u.....	92
Tablica 18. Slojevi detalja s pripadajućim karakteristikama materijala.....	93
Tablica 19. Vrijednosti temperatura tla po mjesecima.....	94
Tablica 20. Definiranje rubnih uvjeta.....	94
Tablica 21. Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti, temperature dobivene u Flixu za temeljnu ploču.....	115
Tablica 22 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za referentni model temeljne ploče.....	115

Tablica 23 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za trakasti temelj..... 115

Tablica 24 Prikaz Ψ i f_{Rsi} vrijednosti i temperature dobivene u Flixu za referentni model trakastog temelja..... 115

Sažetak

„UTJECAJ TEMELJENJA NA XPS-u NA TOPLINSKE GUBITKE I PONAŠANJE PRI POTRESU ZGRADE GOTOVO NULTE ENERGIJE“

Proučavanjem temeljenja zgrada na potresnoj izolaciji u zemljama zapadne Europe javila se ideja za analiziranjem temeljenja na XPS- u na seizmički aktivnim područjima Hrvatske (Dubrovnik i Zagreb). Detaljno proučavanje temeljenja karakterističnih građevina na XPS- u na potresno djelovanje, potkrijepljeno je rezultatima dobivenim u programskom paketu ETABS 2016 u kojem su varirani parametri: debljina i krutost XPS-a, način temeljenja (temeljna ploča, trakasti temelj), lokacija i katnost građevina. Izvršena je i analiza toplinskih gubitaka pomoću programa Flixo u kojem su varirani parametri: način temeljenja, debljina XPS-a i lokacija građevina (različite vrste tla). Pregledom i analizom rezultata zaključuje se da je potrebna analiza interakcije XPS-a i konstrukcije zbog neizbježnih utjecaja na toplinsko i dinamičko ponašanje konstrukcije.

Ključne riječi: XPS (ekstrudirani polistiren), potresna izolacija, potresno djelovanje, toplinski mostovi, temperatura

Summary

„THE INFLUENCE OF XPS FOUNDED BUILDING ON HEAT LOSSES AND SEISMIC BEHAVIOUR OF NEARLY ZERO-ENERGY BUILDING“

The idea of analyzing the foundations on XPS on seismically active regions of Croatia (Dubrovnik and Zagreb) came from the study of the foundations on seismic isolation in buildings in Western European countries. Detailed study of XPS founded structures on seismic action is supported by the results obtained in the ETABS 2016 program package, in which the following parameters were varied: thickness and stiffness of XPS, type of foundation (strip and slab foundation), location and number of stories. Heat losses analysis was performed with Flixo software in which varied parameters were: type of foundation, thickness of XPS and building location (different soil types). Trough review and analysis of results, it is concluded that it is necessary to overview interaction between XPS and construction because of inevitable influence on thermal and dynamic behaviour of construction.

Keywords: XPS (extruded polystyrene), seismic isolation, seismic activity, thermal bridges, temperature

Životopisi

Lucija Đurković rođena je 22.01.1992. godine u Dubrovniku gdje nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Opću gimnaziju Dubrovnik. Završetkom srednje škole upisuje Tehničko veleučilište u Zagrebu, smjer Graditeljstvo gdje završava tri godine stručnog studija. 2014. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Nakon završetka preddiplomskog sveučilišnog studija upisuje diplomski studij na Građevinskom fakultetu, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija.

Dijana Knežević rođena je 5.5.1993. godine u Metkoviću. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja, upisuje Prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Metkoviću koju završava 2012. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij na Građevinskom fakultetu u Sveučilišta u Zagrebu, a nakon završenog istog upisuje diplomski studij, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija. Trenutno je na drugoj godinu diplomskog studija.

Katarina Konjevod rođena je 26.02.1994. godine u Dubrovniku. Nakon završenog osnovnoškolskog te srednjoškolskog obrazovanja u Prirodoslovnoj-matematičkoj gimnaziji Metković, 2012. godine upisuje Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Godine 2014. završava preddiplomski studij pod mentorstvom prof. dr. sc. Davora Malusa. Trenutno pohađa drugu godinu diplomskog studija na smjeru Teorija i modeliranje konstrukcija.

Ivan Kukina rođen je 23. travnja 1994. godine u Zagrebu gdje je nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2009. upisao XV Gimnaziju u Zagrebu (Matematičko informatički obrazovni centar). Srednjoškolsko obrazovanje završava s vrlo dobrim uspjehom 2013. godine. Iste godine nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Zagrebu. Na četvrtoj godini studija (akademska godina 2016./2017.) dobio je Rektorovu nagradu za pojedinačan rad. Po završetku Preddiplomskog stručnog studija upisao je diplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te trenutno pohađa 2. godinu Diplomskog studija na usmjerenju Teorija i modeliranje konstrukcija.

Tea Maleš rođena je 30. ožujka 1994. godine u Splitu gdje je nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2008. upisala Prvu gimnaziju Split. Srednjoškolsko obrazovanje završava s odličnim uspjehom 2012. godine. Iste godine nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski stručni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Splitu. Na trećoj godini studija (akademska godina 2014./2015.) dobila je Dekanovu nagradu za odličan uspjeh. Po završetku Preddiplomskog stručnog studija upisala je Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu te trenutno pohađa 2. godinu Diplomskog studija na usmjerenju Teorija i modeliranje konstrukcija.

Dino Vidić rođen je 23. rujna 1993. godine u Sinju gdje je nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2008. godine upisao Tehničku i industrijsku školu Ruđera Boškovića, smjer elektrotehničar. Završni rad za smjer elektrotehničar obranio s odličnim uspjehom 2012 godine. Iste godine nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski stručni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Splitu. Na drugoj godini studija (akademska godina 2013/2014.) dobitnik Dekanove nagrade za odličan uspjeh. Nakon završenog preddiplomskog stručnog studija u Splitu akademske godine 2014/2015., prebacuje se na Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Trenutno pohađa drugu godinu Diplomskog studija Građevinarstva, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija.