

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Borislav Majkić**

# **Požarna analiza jeklenih stavb z naprednimi metodami**

**Diplomska naloga št.: 2964**

**Mentor:**  
prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 28. 6. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Borislav Majkić izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**POŽARNA ANALIZA JEKLENIH STAVB Z NAPREDNIMI METODAMI.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 15. 06. 2007

---

(podpis)

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Darku Begu, za strokovno pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvala gre tudi mladim raziskovalcem na katedri, za tehnično pomoč in nasvete ter za prijetno vzdušje.

Na koncu bi se rad zahvalil tudi mojima staršema, ki sta mi tekom študija nudila pomoč in moralno podporo.

---

**BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>614.84:624.014.2(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Borislav Majkić</b>
<b>Mentor:</b>	<b>Prof. dr. Darko Beg</b>
<b>Naslov:</b>	<b>POŽARNA ANALIZA JEKLENIH STAVB Z NAPREDNIMI METODAMI</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>115 strani, 1 preglednica, 195 slik</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>požar, požarna analiza, napredne metode, temperaturne krivulje, požarni scenarij, OZone V2, Abaqus 6.6</b>

**Izvleček**

Diplomska naloga obravnava postopek požarne analize jeklenih stavb z naprednimi metodami v skladu z Evrokod standardi. V uvodu so predstavljene osnove in različni postopki požarne analize stavb. Ker diplomska naloga temelji na napredni požarni analizi, so bili uporabljeni napredni požarni modeli in napredni računski modeli.

Pri požarni analizi stavb z naprednimi metodami je mogoče bolj realno in zanesljivo določiti obnašanje stavb v primeru požara. Z upoštevanjem dejanskih karakteristik požara in aktivnih protipožarnih ukrepov, ki so nameščeni v stavbi, se lahko izvede bolj natančna in realna požarna analiza, kot z uporabo doslej uveljavljenih metod, ki so v analizo vključevale uporabo standardnih temperaturnih krivulj.

Program OZone V2 je bil uporabljen kot napredni požarni model s katerim je bila določena temperatura jeklene konstrukcije v požarnem sektorju, ki je bil že vnaprej izbran. Abaqus 6.6 pa predstavlja napredni računski model s katerim je bila izvedena mehanska analiza konstrukcij pri povišanih temperaturah zaradi požara. Pri analizi s programom Abaqus 6.6 so uporabljeni linijski končni elementi.

Požarna analiza je bila izvedena za posamezne nosilne elemente (steber, nosilec), konstrukcijske sklope (pomičen in nepomičen ravninski okvir) in za celo konstrukcijo (prostorski okvir). Za vsak posamezen primer so predstavljeni protipožarni ukrepi in rezultati požarne analize, ki v glavnem predstavljajo pomike in notranje sile na izbranih mestih.

---

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>614.84:624.014.2(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Borislav Majkić</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. dr. Darko Beg</b>
<b>Title:</b>	<b>FIRE ANALYSIS OF STEEL BUILDINGS WITH ADVANCED METHODS</b>
<b>Volume and appendices:</b>	<b>115 pages, 1 table, 195 pictures</b>
<b>Key words:</b>	<b>fire, fire analysis, advanced methods, temperature curves, fire scenario, OZone V2, Abaqus 6.6</b>

### **Abstract**

The degree represents procedure of fire analysis of steel buildings with advanced methods regarding Eurocode standards. Introduction consists of basics and procedures of fire analysis of buildings. Because entire work is based on advanced fire analysis, advanced fire models and advanced calculation models were used.

Fire analysis of buildings with advanced methods describes behaviour of structure in case of fire more realistic and credible. Taking into account real fire characteristics and active fire fighting measures, we can make more accurate and realistic analysis in comparison with well known methods that use standard temperature curves.

OZone V2 software was used as advanced fire model to calculate temperature of steel structure in compartment. Abaqus 6.6 presents advanced calculation model which was used to calculate mechanical response of structure at elevated temperatures because of fire. Beam finite elements were used in programme Abaqus 6.6.

Fire analyses were made for individual members (column, beam), for subassemblies (frames in plane) and for entire structure (frame in space). Fire fighting measures and results of fire analysis are represented in each case.

## VSEBINA

---

KAZALO SLIK .....	X
KAZALO PREGLEDNIC .....	XVII
SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK .....	XVIII
1 UVOD .....	1
2 OSNOVE O POŽARNI ANALIZI STAVB .....	2
2.1 Nominalne temperaturne krivulje v odvisnosti od časa .....	2
2.2 Naravni požari .....	3
2.3 Naravni požarni modeli .....	3
2.4 Poenostavljeni požarni modeli .....	4
2.5 Napredni požarni modeli .....	4
2.6 Postopki projektiranja .....	6
2.7 Lastnosti požarnega sektorja .....	7
2.8 Lastnosti požara .....	8
2.9 Mehanske lastnosti jekla .....	10
3 UPORABA PROGRAMA OZONE V2 .....	11
4 UPORABA PROGRAMA ABAQUS 6.6 .....	15
4.1 Primerjava kritičnih uklonskih sil po EN1993-1-1 in s programom Abaqus .....	15
4.2 Vnos podatkov za požarno analizo s programsko opremo Abaqus 6.6 .....	22
4.3 Vpliv velikosti intervala na rezultate pri požarni analizi .....	34
4.4 Požarna analiza treh osnovnih primerov .....	37
4.4.1 Tlačno obremenjen steber .....	38
4.4.2 Upogibno obremenjen nosilec .....	41

4.4.3	Upogibno in tlačno obremenjen nosilec .....	43
4.5	Požarna analiza pomičnega (okvir 1) in nepomičnega (okvir 2) okvira .....	45
4.5.1	Pomični okvir (okvir 1) .....	45
4.5.1.1	Požarna analiza okvira 1 s programom Abaqus za požar v trgovini .....	50
4.5.1.2	Požarna analiza okvira 1 s programom Abaqus za požar v bolnišnici .....	62
4.5.2	Nepomični okvir (okvir 2) .....	68
4.5.2.1	Požarna analiza okvira 2 s programom Abaqus za požar v trgovini .....	74
4.5.2.2	Požarna analiza okvira 2 s programom Abaqus za požar v bolnišnici .....	87
4.6	Požarna analiza prostorskega okvira .....	93
5	ZAKLJUČKI NALOGE.....	113
VIRI	.....	114

## KAZALO SLIK

Slika 1: Primerjava temperatur pri različnih standardnih požarih .....	2
Slika 2: Primerjava poteka temperature med standardno krivuljo in izračunanimi vrednostmi za izbran primer s programom OZone V2 .....	5
Slika 3: Zveza med napetostmi in deformacijami za jeklo S235 pri povišanih temperaturah	10
Slika 4: Osnovno delovno okno programa OZone V2 .....	11
Slika 5: Modul za definiranje požarnega sektorja .....	12
Slika 6: Podajanje materialov v posameznih prečnih prerezih .....	12
Slika 7: Definiranje odprtin v izbranem konstrukcijskem sklopu .....	12
Slika 8: Določanje požarne obtežbe .....	13
Slika 9: Izračunan potek temperature v požarnem sektorju .....	13
Slika 10: Podajanje profila in izbira protipožarne zaščite .....	14
Slika 11: Definiranje lege profila v požaru .....	14
Slika 12: Obremenitev prostoležečega nosilca .....	16
Slika 13: Prva uklonska oblika in lastna vrednost pri koncentrirani sili 1 kN .....	17
Slika 14: Reakcija v pomični podpori .....	17
Slika 15: Prečni pomik na sredini nosilca .....	18
Slika 16: Obremenitev prostoležečega nosilca .....	18
Slika 17: Prva uklonska oblika in lastna vrednost pri koncentrirani sili 1 kN .....	19
Slika 18: Reakcija v prečni smeri .....	20
Slika 19: Prečni pomik na sredini nosilca .....	20
Slika 20: Prva uklonska oblika in lastna vrednost oz. $\gamma_{cr}$ pri koncentrirani sili 1kN .....	21
Slika 21: Reakcija v prečni smeri .....	21
Slika 22: Prečni pomik na sredini .....	22
Slika 23: Geometrijske nepopolnosti zaradi uklona (a) in zaradi nadomestne obtežbe (b) .....	23
Slika 24: Definiranje uklonske analize v programu Abaqus 6.6 .....	24
Slika 25: Definiranje lastnih vrednosti .....	24
Slika 26: Definiranje koncentrirane obtežbe .....	25
Slika 27: Vnos ukaza v ukazno okno .....	26
Slika 28: Izbrana mreža končnih elementov .....	26



---

Slika 29: Podajanje linijskega modela .....	27
Slika 30: Definiranje jekla S235 v Abaqusu 6.6 .....	28
Slika 31: Podajanje profila .....	30
Slika 32: Podajanje lastnosti prereza .....	30
Slika 33: Podajanje temperature .....	31
Slika 34: Podajanje obtežbe pri požarni obtežni kombinaciji .....	32
Slika 35: Definiranje požara .....	32
Slika 36: Podajanje temperatur v amplitudo .....	33
Slika 37: Vnašanje nepopolnosti .....	34
Slika 38: Obremenitev prostoležečega nosilca .....	35
Slika 39: Temperatura jekla pri različno dolgih intervalih med vmesnimi točkami .....	35
Slika 40: Upogib U2 na sredini nosilca pri različnih intervalih .....	36
Slika 41: Prečni pomik U3 na sredini nosilca pri različnih intervalih .....	36
Slika 42: Temperatura jekla zaradi požara v bolnišnici .....	38
Slika 43: Tlačno obremenjen steber .....	38
Slika 44: Izbrana zaščita za steber HEB240 (program Ozone V2) .....	39
Slika 45: Primerjava temperatur jekla med zaščiten in nezaščitenim profilom .....	40
Slika 46: Prečni pomik pri zaščitenem in nezaščitenem stebru .....	40
Slika 47: Upogibno obremenjen nosilec .....	41
Slika 48: Prečni pomik na sredini prostoležečega nosilca .....	42
Slika 49: Upogib na sredini prostoležečega nosilca .....	42
Slika 50: Upogibno in tlačno obremenjen nosilec .....	43
Slika 51: Upogib na sredini nezaščitenega in zaščitenega prostoležečega nosilca .....	44
Slika 52: Prečni pomik na sredini nezaščitenega in zaščitenega prostoležečega nosilca .....	45
Slika 53: Profili na pomičnem okviru .....	46
Slika 54: Medetažna konstrukcija .....	46
Slika 55: Strešna konstrukcija .....	46
Slika 56: Požar v spodnji etaži .....	48
Slika 57: Temperatura različnih profilov v okviru 1 pri požaru v trgovini .....	49
Slika 58: Temperatura različnih profilov v okviru 1 pri požaru v bolnišnici .....	49
Slika 59: Pozicije opazovanih točk pri okviru 1 .....	50

---

Slika 60: Pomik U3 na mestu T1 .....	51
Slika 61: Pomik U1 na mestu T2 .....	51
Slika 62: Upogib U2 na mestu T3 .....	51
Slika 63: Pomik U3 na mestu T5 .....	52
Slika 64: Upogib U2 na mestu T6 .....	52
Slika 65: Pomik U1 na mestu T7 .....	52
Slika 66: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti .....	53
Slika 67: Pozicije opazovanih notranjih sil v konstrukcijskih elementih .....	53
Slika 68: Osna sila N na mestu P1 .....	54
Slika 69: Osna sila N na mestu P2 .....	54
Slika 70: Upogibni moment M na mestu P3 .....	54
Slika 72: Upogibni moment M na mestu P4 .....	55
Slika 71: Osna sila N na mestu P3 .....	55
Slika 73: Deformirana oblika neizoliranega pomičnega okvira pri času $t = 24\text{min } 16\text{s}$ .....	56
Slika 74: Potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih profilih v trgovini .....	56
Slika 75: Pomik U3 na mestu T1 .....	57
Slika 76: Pomik U1 na mestu T2 .....	57
Slika 77: Upogib U2 na mestu T3 .....	57
Slika 78: Pomik U3 na mestu T5 .....	58
Slika 79: Upogib U2 na mestu T6 .....	58
Slika 80: Pomik U1 na mestu T7 .....	58
Slika 81: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti .....	59
Slika 82: Osna sila N na mestu P1 .....	59
Slika 83: Osna sila N na mestu P2 .....	60
Slika 84: Upogibni moment M na mestu P3 .....	60
Slika 85: Osna sila N na mestu P3 .....	60
Slika 86: Upogibni moment M na mestu P4 .....	61
Slika 87: Deformirana oblika izoliranega okvira 1 pri $t = 30\text{min}$ .....	61
Slika 88: Primerjava med potekom temperatur pri požaru v trgovini in pri požaru v bolnišnici .....	62
Slika 89: Pomik U3 na mestu T1 .....	63

---

Slika 90: Pomik U1 na mestu T2 .....	63
Slika 91: Upogib U2 na mestu T3 .....	63
Slika 92: Pomik U3 na mestu T5 .....	64
Slika 93: Upogib U2 na mestu T6 .....	64
Slika 94: Pomik U1 na mestu T7 .....	64
Slika 95: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti .....	65
Slika 96: Osna sila N na mestu P1 .....	65
Slika 97: Osna sila N na mestu P2 .....	66
Slika 98: Upogibni moment M na mestu P3 .....	66
Slika 99: Osna sila N na mestu P3 .....	66
Slika 100: Upogibni moment M na mestu P4 .....	67
Slika 101: Deformirana oblika neizoliranega okvira 1 pri požaru v bolnišnici v času t = 78min .....	67
Slika 102: Standardna temperaturna krivulja (ISO-834) .....	68
Slika 103: Profili na nepomičnem okviru .....	68
Slika 104: Medetažna konstrukcija .....	69
Slika 105: Strešna konstrukcija .....	69
Slika 106: Požar v 1. in 2. nadstropju hkrati .....	71
Slika 107: Temperatura različnih profilov v okviru 2 pri požaru v trgovini .....	72
Slika 108: Temperatura različnih profilov v okviru 2 pri požaru v bolnišnici .....	73
Slika 109: Pozicije opazovanih točk pri okviru 1 .....	73
Slika 110: Pomik U3 na mestu T1 .....	74
Slika 111: Pomik U1 na mestu T2 .....	75
Slika 112: Upogib U2 na mestu T3 .....	75
Slika 113: Pomik U2 na mestu T4 .....	75
Slika 114: Pomik U3 na mestu T5 .....	76
Slika 115: Pomik U2 na mestu T6 .....	76
Slika 116: Pomik U2 na mestu T7 .....	76
Slika 117: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti .....	77
Slika 118: Pozicije opazovanih notranjih sil v konstrukcijskih elementih .....	77
Slika 119: Osna sila N na mestu P1 .....	78

---

Slika 120: Osna sila N na mestu P2 .....	78
Slika 121: Upogibni moment M na mestu P3 .....	79
Slika 122: Osna sila N na mestu P4 .....	79
Slika 123: Upogibni moment M na mestu P4 .....	79
Slika 124: Deformirana oblika neizoliranega nepomičnega okvira v času $t = 23\text{min } 24\text{s}$ .....	80
Slika 125: Potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih profilih v trgovini .....	81
Slika 126: Pomik U3 na mestu T1 .....	81
Slika 127: Pomik U1 na mestu T2 .....	82
Slika 128: Upogib U2 na mestu T3 .....	82
Slika 129: Pomik U2 na mestu T4 .....	82
Slika 130: Pomik U3 na mestu T5 .....	83
Slika 131: Pomik U2 na mestu T6 .....	83
Slika 132: Pomik U2 na mestu T7 .....	83
Slika 133: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti .....	84
Slika 134: Osna sila N na mestu P1 .....	84
Slika 135: Osna sila N na mestu P2 .....	85
Slika 136: Upogibni moment M na mestu P3 .....	85
Slika 137: Osna sila N na mestu P4 .....	85
Slika 138: Upogibni moment M na mestu P4 .....	86
Slika 139: Deformirana oblika izoliranega okvira 2 v času $t = 31\text{min}$ .....	86
Slika 140: Primerjava med potekom temperatur pri požaru v trgovini in pri požaru v bolnišnici .....	87
Slika 141: Pomik U3 na mestu T1 .....	87
Slika 142: Pomik U1 na mestu T2 .....	88
Slika 143: Upogib U2 na mestu T3 .....	88
Slika 144: Pomik U2 na mestu T4 .....	88
Slika 145: Pomik U3 na mestu T5 .....	89
Slika 146: Pomik U2 na mestu T6 .....	89
Slika 147: Pomik U2 na mestu T7 .....	89
Slika 148: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti .....	90
Slika 149: Osna sila N na mestu P1 .....	90

---

Slika 150: Osna sila N na mestu P2 .....	91
Slika 151: Upogibni moment M na mestu P3 .....	91
Slika 152: Osna sila N na mestu P4 .....	91
Slika 153: Upogibni moment M na mestu P4 .....	92
Slika 154: Deformirana oblika neizoliranega okvira 2 pri požaru v bolnišnici v času t = 54min .....	92
Slika 155: Prostorski okvir .....	93
Slika 156: Izbrani profili v notranjem okviru (os 2) .....	94
Slika 157: Izbrani profili v zunanjem okviru (os 1 in 3) .....	95
Slika 158: Medetažna konstrukcija .....	95
Slika 159: Strešna konstrukcija .....	95
Slika 160: Požar v spodnji etaži pri prostorskem okviru .....	97
Slika 161: Potek temperature v nosilnih elementih prostorskega okvira zaradi požara .....	98
Slika 162: Pozicije karakterističnih točk na prostorskem okviru .....	99
Slika 163: Upogib U2 na mestu T13 .....	99
Slika 164: Upogib U2 na mestu T14 .....	100
Slika 165: Vertikalni pomik U2 na mestu T20 .....	100
Slika 166: Vertikalni pomik U2 na mestu T12 .....	100
Slika 167: Prečni pomik U1 na mestu T9 .....	101
Slika 168: Horizontalni pomik U1 na mestu T17 .....	101
Slika 169: Horizontalni pomik U3 na mestu T17 .....	101
Slika 170: Pozicije opazovanih notranjih sil v prostorskem okviru .....	102
Slika 171: Osna sila N na mestu P1 .....	102
Slika 172: Osna sila N na mestu P3 .....	102
Slika 173: Osna sila N na mestu P9 .....	103
Slika 174: Upogibni moment M na mestu P5 .....	103
Slika 175: Osna sila N na mestu P14 .....	103
Slika 176: Upogibni moment M na mestu P14 .....	104
Slika 177: Deformiran prostorski okvir v času t = 23min 12s .....	104
Slika 178: Pomik točke T9 na srednjem stebri v prečni smeri U1 .....	105
Slika 179: Pomik U2 na vrhu srednjega stebra .....	105

---

Slika 180: Deformiran prostorski okvir pri izoliranih nosilcih v času $t = 37\text{min } 9\text{s}$ .....	106
Slika 181: Upogib U2 na mestu T13 .....	107
Slika 182: Upogib U2 na mestu T14 .....	107
Slika 183: Vertikalni pomik U2 na mestu T12 .....	107
Slika 184: Vertikalni pomik U2 na mestu T20 .....	108
Slika 185: Prečni pomik U1 na mestu T9 .....	108
Slika 186: Horizontalni pomik U1 na mestu T17 .....	108
Slika 187: Horizontalni pomik U3 na mestu T17 .....	109
Slika 188: Osna sila N na mestu P1 .....	109
Slika 189: Osna sila N na mestu P3 .....	109
Slika 190: Osna sila N na mestu P9 .....	110
Slika 191: Upogibni moment M na mestu P5 .....	110
Slika 192: Osna sila N na mestu P14 .....	110
Slika 193: Upogibni moment M na mestu P14 .....	111
Slika 194: Deformiran prostorski okvir pri protipožarno izoliranih nosilnih elementih v času $t = 48\text{min}$ .....	111
Slika 195: Potek temperatur pri požarno zaščiteneh nosilnih elementih .....	112

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zveze med dejanskimi napetostmi in dejanskimi deformacijami pri različnih temperaturah .....	29
---	----

## SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK

Postavka	Oznaka
Teorija drugega reda	TDR
Končni elementi	KE
Mejno stanje nosilnosti	MSN
Mejno stanje uporabnosti	MSU



## 1 Uvod

Z uporabo naprednih metod je omogočen bolj realen pristop k analizi stavb v primeru požara, v katerem je zajet vpliv njegovih dejanskih karakteristik in aktivnih protipožarnih ukrepov.

Ta splošni postopek, imenovan tudi "Globalni koncept požarne varnosti", zajema naslednje korake:

- obravnava vpliv lastnosti stavb na rast in razvoj požara: požarni scenarij, požarna obtežba, stopnja izgorevanja, namembnost prostora in pogoji prezračevanja
- upošteva nevarnost oziroma verjetnost pojava požara v odvisnosti od velikosti požarnega sektorja in namembnosti prostora, zajema vpliv aktivnih protipožarnih naprav; verjetnost je določena na osnovi obstoječih statističnih podatkov o dejanskih požarih
- na podlagi predhodnjega koraka določi računsko vrednost ključnega parametra, to je požarne obtežbe
- določa računsko temperaturno krivuljo v odvisnosti od računske požarne obtežbe, ki implicitno zajema verjetnost pojava požara
- prikaže globalno obnašanje stavbe podvržene spremenljivi temperaturi v skladu s temperaturno krivuljo v kombinaciji s statično obtežbo v primeru požara
- poda računski čas požarne odpornosti; pogosto je ta čas lahko neomejen, v kolikor je stavba sposobna prenesti statično obtežbo do konca naravnega požara
- preveri varnost stavbe s primerjavo računskega časa požarne odpornosti z zahtevanim časom v istočasni odvisnosti od evakuacijskega časa uporabnikov stavbe in posledic morebitnega porušenja stavbe

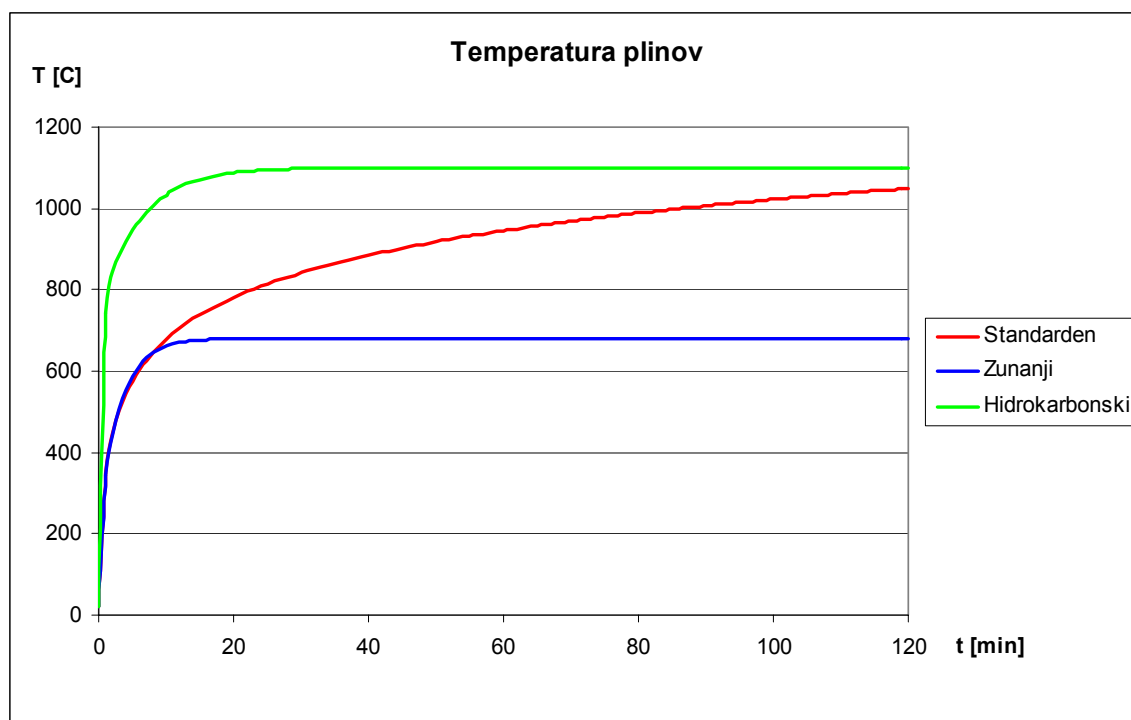
Poudariti je potrebno, da opisani postopek izpolnjuje zahteve Evrokodov! Uporaba naravnih požarov je eksplicitno dovoljena v Evrokodu EN1990.

Omenjeni pristop ima finančne prednosti ter pripelje do višje varnosti. Osredotoča se na aktivne protipožarne ukrepe, ki zagotavljajo zaščito za ljudi. Ti ukrepi so: naprave za zaznavanje dima, akustični alarmi, varne požarne poti, avtomatsko obveščanje gasilskih enot o požaru, sistem za odvajanje dima, šprinklerji.

## 2 Osnove o požarni analizi stavb

### 2.1 Nominalne temperaturne krivulje v odvisnosti od časa

Glede na EN1991-1-2 so nominalni požari lahko definirani z enostavno formulo in je privzeto, da so identični ne glede na velikost ali zasnovu stavbe. Nominalni požari so: standarden požar po ISO-834; zunanji požar, ki se uporablja za zunanje stene in ima po 30 minutah konstantno temperaturo 680 °C; hidrokarbonski požar, ki ima po 30 minutah konstantno temperaturo 1100 °C (slika 1). Požarna odpornost elementov je v nacionalnih predpisih podana glede na enega izmed zgoraj navedenih nominalnih požarov.



**Slika 1: Primerjava temperatur pri različnih standardnih požarih**

Potrebno se je zavedati, da ti nominalni požari veljajo za polno razvite požare, kar pomeni, da je celoten požarni sektor v plamenih. To dejstvo jasno pove, da nominalni požari v nobenem pogledu ne ustrezajo dejanskim požarom, ampak se pojavijo izključno na testih v laboratorijih. Zato bi morali pri analizi požarne varnosti stavb, zanemariti analizo, ki vključuje

ISO-834 požar in namesto nominalnih požarov obravnavati požare, ki so bolj podobni dejanskim požarom!

## 2.2 Naravni požari

Uporaba varnostne analize stavb v primeru požara, ki upošteva vpliv aktivnih protipožarnih ukrepov in dejanskih požarnih karakteristik, je mnogo bolj racionalna. Omogoča izračun naravne temperaturne krivulje za vsak sektor v stavbi v primeru požara.

Za naravne požare so značilne naslednje faze:

- vžig, ki sledi fazi zadimljenosti z zelo nizkimi temperaturami; dolžino te faze je zelo težko napovedati
- faza, ko temperatura narašča zaradi lokalnega požara; dolžina te faze je v veliki meri odvisna od karakteristik sektorja; požar ostane lokalni do morebitnega izbruha
- "flashover" ; nenaden izbruh požara po celem sektorju; ta faza je v glavnem zelo kratka
- faza v kateri je požar polno razvit po celem sektorju, z naraščajočo temperaturo zraka; dolžina je odvisna od požarne obtežbe in pogojev prezračevanja
- padajoča faza v kateri se temperature znižujejo vse dokler vsi gorljivi materiali popolnoma ne izgorijo

## 2.3 Naravni požarni modeli

Naravni požarni modeli obravnavajo razvoj požara bolj realno in v skladu z dejanskimi požari, ki se lahko pojavijo v stavbi. Zajemajo vpliv ključnih parametrov, ki vplivajo na rast in razvoj požara.

Naravni požarni modeli se glede na EN1991-1-2 delijo na: poenostavljene in na napredne modele.

## 2.4 Poenostavljeni požarni modeli

Poenostavljeni požarni modeli obravnavajo požare, kjer je za notranje elemente požarnega sektorja metoda izračuna enakomerne temperature sektorja podana v EN1991-1-2 (aneks A), vendar pa obravnavajo tudi lokalne požare, za katere je postopek izračuna temperature podan v aneksu C. Aneks B podaja postopek za izračun toplotnih razmer za zunanje elemente, ki so izpostavljeni polno razvitemu požaru skozi odprtine požarnega sektorja na fasadi.

Aneks A podaja za notranje elemente poenostavljene formule, ki zajemajo: požarno obtežbo, faktor odprtin  $O = A_v \sqrt{h} / A_t$  (kjer je  $A_v$ , površina vertikalnih odprtin;  $h$ , višina vertikalnih odprtin;  $A_t$ , skupna površina ovoja), in toplotne lastnosti sten, ki obdajajo požarni sektor.

## 2.5 Napredni požarni modeli

Napredni požarni modeli zajemajo poleg parametrov, ki jih upoštevajo že poenostavljeni požarni modeli še: lastnosti plinov in izmenjavo mas in energije. To omogoča simulacijo naravnega požara, ki je sprva lokalni, kar pomeni, da je dejanska površina požara  $A_{fi}$  omejena glede na celotno površino požarnega sektorja  $A_f$ . Sprva se pojavijo razmere, ki cel požarni sektor razdelijo na dve coni. Zgornja cona je napolnjena z dimom in ima višje temperature, spodnja cona pa predstavlja del z nižjimi temperaturami.

Pri uporabi naprednih požarnih modelov je glede na EN1991-1-2, 3.3, potrebna uporaba enega od naslednjih modelov:

- model z eno cono; privzame enakomerno, časovno odvisno temperaturno razopreditev v prostoru
- model z dvema conama; privzame v zgornji plasti spremenljivo debelino plasti in časovno odvisno enakomerno temperaturo po plasti, kot tudi v spodnji plasti z nižjo temperaturo
- modeli z računom dinamike tekočin; podajajo razvoj temperature v prostoru v odvisnosti od časa in prostora

Vse dokler je višina spodnje cone razmeroma velika in dokler v zgornji coni temperature ne presežejo 500 °C, ne pride do nenadnega izbruha po celem sektorju (ang. flashover), ter tako

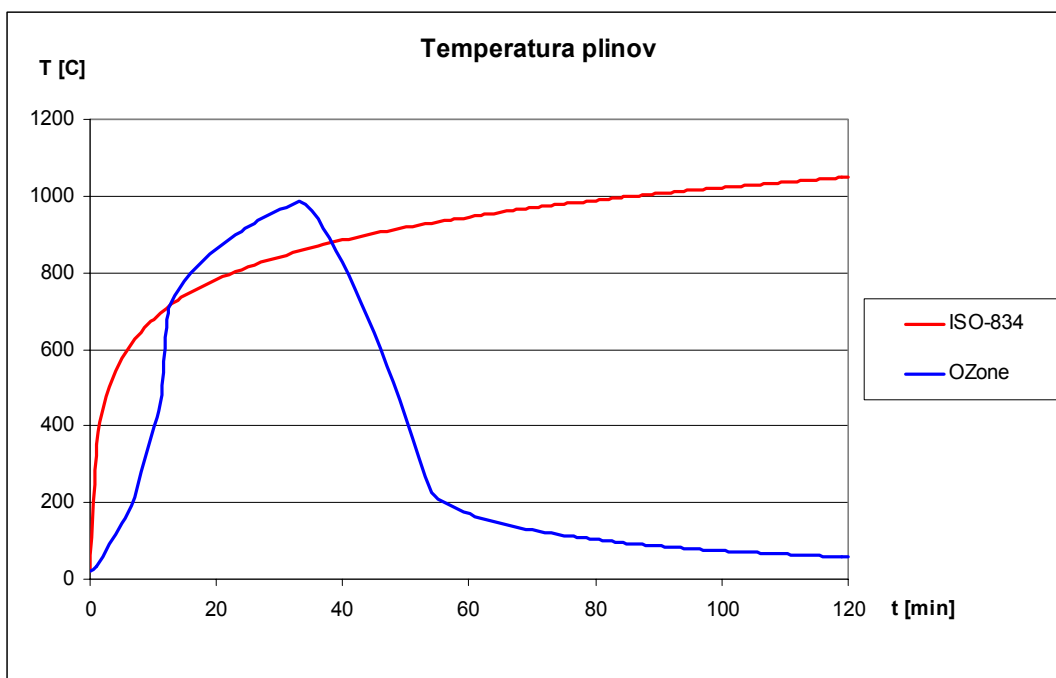
naravni požar ostane na nivoju lokalnega. Takšne razmere se pojavijo pri gorečem avtomobilu v odprti parkirni hiši, kjer dim in toplota lahko brez težav uhajata iz stavbe skozi ogromne odprtine, izvor toplote pa ostane omejen na goreči avtomobil.

Računski modeli, ki vključujejo dejstvo, da je požar na začetku lokalni in se kasneje lahko razvije v požar po celem sektorju, se imenujejo dvo-conski požarni modeli.

V okviru raziskav na Univerzi v Liegu in v skladu z EN1991-1-2 in aneksom D, je bil razvit računalniški program OZone V2, ki vključuje dvo-conske požarne modele. Temperaturne krivulje pridobljene s programom OZone so mnogo bolj realne, kot tiste dobljene v skladu z aneksom A v EN1991-1-2, saj je naraščanje temperature na samem začetku bolj napredno, v fazi ohlajanja pa temperatura ne upada enostavno linearно, kot je to določeno v aneksu A.

Primerjava rezultatov dobljenih na podlagi izračunov s programom OZone V2 in tistimi dobljenimi z dejanskimi testi pokaže, da je povprečno razmerje med izmerjenimi in izračunanimi maksimalnimi temperaturami enako 0,89.

Slika 2 razločno prikazuje razliko med potekom temperature plinov po standardni krivulji in eni izmed možnih krivulj dobljenih s programom OZone V2, ki je zelo blizu dejanskemu poteku temperature v izbranem požarnem sektorju.



**Slika 2: Primerjava poteka temperature med standardno krivuljo in izračunanimi vrednostmi za izbran primer s programom OZone V2**

## 2.6 Postopki projektiranja

Stavba, del stavbe ali njen element morajo biti sposobni prenašati pripadajočo obtežbo v primeru požara do predpisanega časa  $t$ , tako da velja (EN1991-1-2):

$$E_{f_i,d,t} \leq R_{f_i,d,t} \quad (1)$$

$E_{f_i,d,t}$  je računski vpliv v primeru požara v času  $t$  glede na EN1991-1-2;

$R_{f_i,d,t}$  je računska odpornost stavbe, dela stavbe ali njenega elementa v primeru požara v času  $t$ .

Glede na EN1991-1-2, EN1993-1-2 in EN1994-1-2 mora ocena obnašanja stavbe v primeru požara sloneti na enem izmed predpisanih postopkov projektiranja:

- za specifične tipe elementov v stavbi se uporabljajo tabelarični podatki
- poenostavljeni računski modeli za specifične tipe elementov v stavbi
- napredni računski modeli, ki lahko analizirajo celo stavbo, del stavbe ali samo element v stavbi

Tabelarični podatki in poenostavljeni računski modeli naj bi podajali konzervativne rezultate v primerjavi z naprednimi računskimi modeli.

### Tabelarični podatki

Tabele so bile razvite na empirični osnovi, potrjene z ocenjevanjem testov in kalibrirane s teoretičnimi izračuni. Podatki veljajo samo za standardne požare.

V tabelah so podane minimalne dimenzije posameznih elementov glede na zahtevano standardno požarno odpornost.

### Penostavljeni računski modeli

Za jeklene elemente podaja EN1993-1-2 poenostavljene računske modele za določitev nosilnosti pri standardnih požarih za:

- elemente v nategu z enakomerno temperaturno razporeditvijo po celem prerezu
- elemente v tlaku z enakomerno temperaturno razporeditvijo
- nosilce z enakomerno ali neenakomerno temperaturno razporeditvijo z upoštevanjem nevarnosti bočne zvrnitve nosilca

- elemente izpostavljene upogibu in osnem tlaku z enakomerno temperaturno razporeditvijo

### **Napredni računski modeli**

Kot je omenjeno v EN1992-1-2, EN1993-1-2 in EN1994-1-2, napredni računski modeli temeljijo na osnovnih fizikalnih principih s katerimi opišemo obnašanje stavbe v požaru na najbolj realen način.

Pri delu z naprednimi računskimi modeli se lahko uporabljajo katerekoli časovno odvisne temperaturne krivulje, upoštevajoč da so materialne karakteristike podane za ustrezen temperaturni razpon. Napredni računski modeli upoštevajo:

- kombiniran učinek mehanske obremenitve, geometrijske nepopolnosti in toplotne obremenitve
- temperaturno odvisne materialne lastnosti
- različne zveze deformacija-napetost zaradi spremenljive temperature materiala
- geometrijsko nelinearnost
- nelinearne materialne lastnosti

V splošnem zahtevajo napredni numerični modeli razdelitev konstrukcijskega elementa na več manjših elementov. Velikost teh končnih elementov mora biti izbrana tako, da dodatna delitev elementov ne bi bistveno vplivala na rezultate analize.

Napredni modeli temeljijo pri iskanju rešitev na iteracijskem postopku. Pomembno je, da so izbrani časovni in obtežni inkrementi takšni, da je v vsakem inkrementu dosežena ustrezna rešitev.

## **2.7 Lastnosti požarnega sektorja**

Za naravni požar, ki se pojavi v določenem požarnem sektorju, je predvideno, da se ne more razširiti na ostale sektorje. To je odvisno od obnašanja zunanjih elementov: stropa, tal in sten vključno z vrati, itd.. V praksi se pogosto uporabljajo ISO-požarni predpisi, ki govorijo o tem koliko časa morajo biti zunanji elementi sposobni zadržati požar v nekem požarnem sektorju, ne da bi se ta razširil na sosednje dele.

Izguba toplote skozi ovoj sektorja je pomemben dejavnik pri določanju razvoja temperature v požarnem sektorju. Toplota se na zunanje ovire prenaša s konvekcijo in radiacijo. Toplotne lastnosti sten morajo biti znane, da lahko zaradi prevodnosti določimo toplotni tok skozi stene. Trije glavni parametri določajo toplotne lastnosti materiala: gostota [ $\text{kg/m}^3$ ], specifična toplota [ $\text{J/kgK}$ ] in toplotna prevodnost [ $\text{W/mK}$ ].

Odprtine v ovoju požarnega sektorja so lahko: okna, vrata in zračniki. Jakost požara v sektorju je med drugim odvisna od deleža odprtin. Faktor odprtin  $O$  je definiran kot:  $O = A_v \sqrt{h} / A_t$  [ $\text{m}^{1/2}$ ] (kjer je  $A_v$ , površina vertikalnih odprtin;  $h$ , višina vertikalnih odprtin;  $A_t$ , skupna površina ovoja).

V naprednih požarnih modelih se pogosto upošteva vpliv mehanskega prezračevanja prostora na odvajanje toplote in dima iz požarnega sektorja. V primeru požara se morajo klimatske naprave izključiti.

## 2.8 Lastnosti požara

Požarna obtežba, uporabljena v izračunih, mora biti računsko vrednost, ki temelji na osnovi meritev ali pa v posebnih primerih temelji na zahtevah požarne odpornosti podanih v nacionalnih predpisih.

Računska vrednost požarne obtežbe je lahko določena:

- iz nacionalne klasifikacije prostorov po namembnosti
- specifično za individualni projekt z izdelavo poročila o požarni obtežbi

Računska vrednost požarne obtežbe  $q_{f,d}$  je v EN1991-1-2 (aneks E) definirana kot:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad , \quad (2)$$

kjer je  $m$  faktor izgorevanja (za celulozne materiale se privzame  $m = 0,8$ )  
 $\delta_{q1}$  faktor, ki zajema vpliv nevarnosti pojava požara glede na velikost požarnega sektorja  
 $\delta_{q2}$  faktor, ki zajema vpliv nevarnosti pojava požara glede na namembnost prostora



$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$  faktor, ki zajema vpliv različnih aktivnih protipožarnih ukrepov

$q_{f,k}$  je karakteristična vrednost požarne obtežbe na enoto površine [MJ/m<sup>2</sup>]

**Koeficienti  $\delta_{q1}$  in  $\delta_{q2}$  (EN1991-1-2:2002, Annex E, E.1)**

Površina požarnega sektorja $A_f$ [m <sup>2</sup> ]	$\delta_{q1}$	Namembnost prostora	$\delta_{q2}$
25	1,10	galerija, muzej, plavalni bazen	0,78
250	1,50	pisarna, rezidenca, hotel, papirna industrija	1,00
2 500	1,90	strojna in motorna industrija	1,22
5 000	2,00	kemični laboratorij, pleskarske delavnice	1,44
10 000	2,13	pirotehnična industrija, barvna industrija	1,66

**Koeficienti  $\delta_{ni}$  (EN1991-1-2:2002, Annex E, E.1)**

$\delta_{ni}$ faktor aktivnih protipožarnih ukrepov											
Avtomatsko gašenje z vodo	Samostojna oskrba z vodo			Avtomatsko zaznavanje požara & alarm		Avtomatsko opozarjanje gasilske postaje	Lastna gasilska enota	Zunanje gasilske enote	Varne dostopne poti	Ročne naprave za gašenje požara	Sistem za odvod dima
$\delta_{n1}$	0	1	2	s toploto	z dimom	$\delta_{n5}$	$\delta_{n6}$	$\delta_{n7}$	$\delta_{n8}$	$\delta_{n9}$	$\delta_{n10}$
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ali	0,73	0,87	0,61 ali	0,78	1,0 ali 1,5	1,0 ali 1,5	1,0 ali 1,5

Za običajne protipožarne naprave, ki bi morale biti vedno prisotne, kot so varne dostopne poti, naprave za ročno gašenje požara in sistem za odvajanje dima na stopniščih, se privzame, da je vrednost  $\delta_{ni}$  enaka 1,0. V kolikor te naprave niso prisotne, se privzame vrednost 1,5 za ustrezne koeficiente  $\delta_{ni}$ . V kolikor se na stopnišču v primeru požara aktivira nadtlak, potem se za  $\delta_{n8}$  privzame vrednost 0,9.

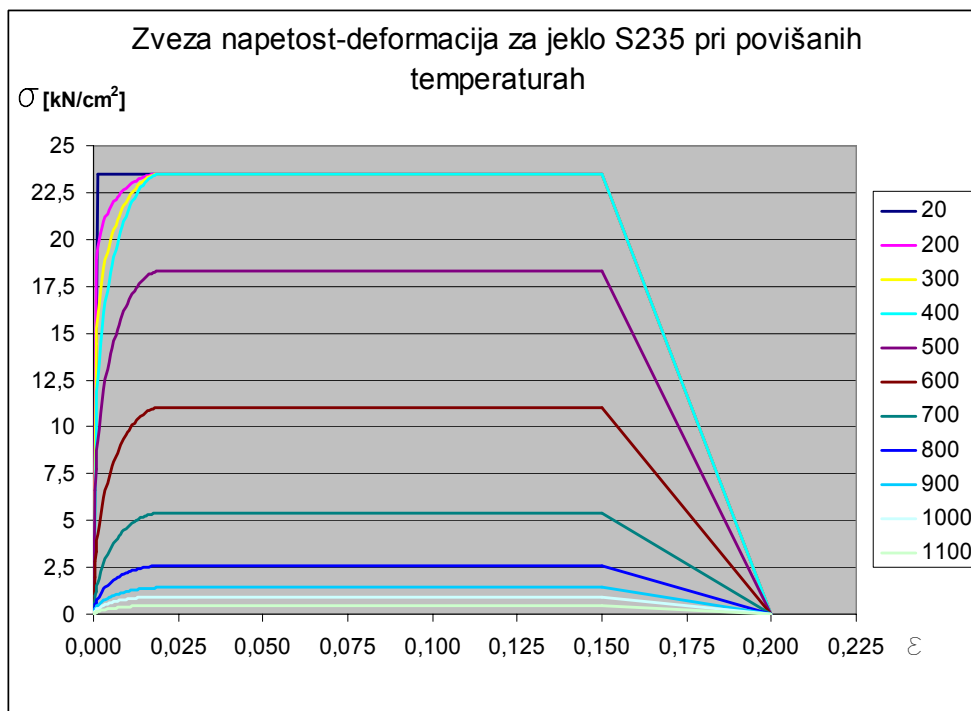
Spodnja tabela prikazuje karakteristične vrednosti požarne obtežbe glede na namembnost prostorov.

### Požarna obtežba glede na različno namembnost prostorov (EN1991-1-2:2002, Annex E, E.2.5)

Namembnost	$q_{f,k}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]
stanovanje	780
bolnišnica	230
hotel (soba)	310
knjižnica	1 500
pisarna	420
šolski razred	285
trgovina	600
gledališče	300
javni transport	100

### 2.9 Mehanske lastnosti jekla

Za vse konstrukcijske sklope, ki so obravnavani v nadaljevanju diplomske naloge, je predvideno, da so iz jekla S235. Za stopnjo segrevanja med 2 in 50 K na minuto, so v EN1993-1-2 podane zveze med deformacijami in napetostmi pri povišanih temperaturah jekla (slika 3). Gostota jekla znaša 7850 kg/m<sup>3</sup>.

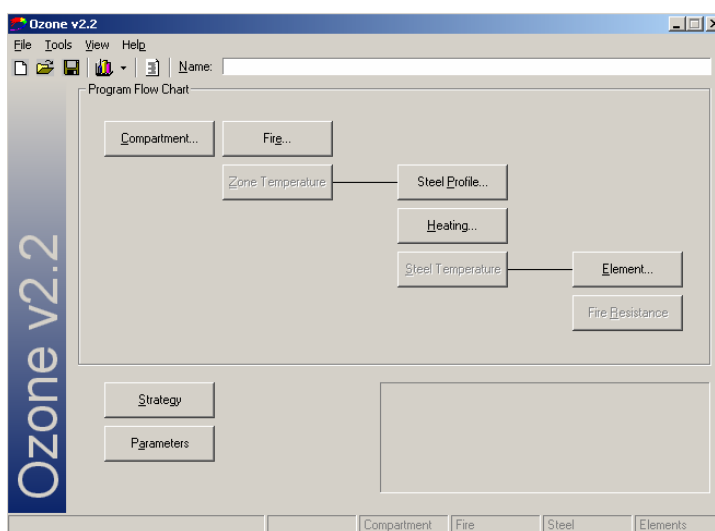


**Slika 3: Zveza med napetostmi in deformacijami za jeklo S235 pri povišanih temperaturah**

### 3 Uporaba programa OZone V2

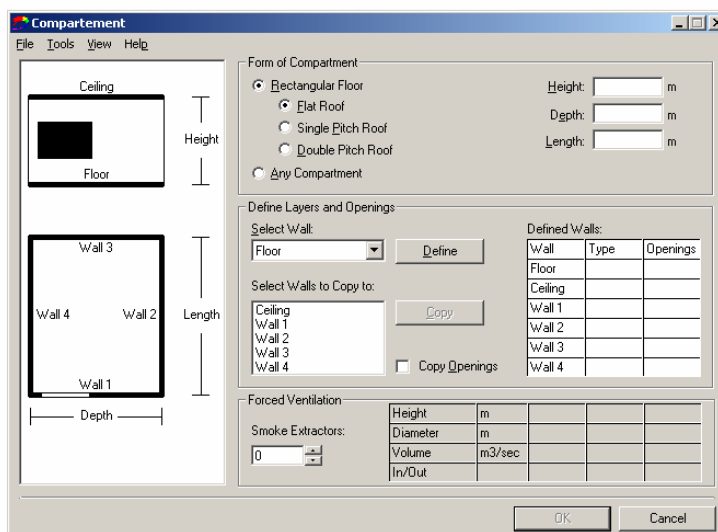
Program OZone V2 vključuje modele z dvema conama, modele z eno cono in modele pri katerih je možen preskok iz dvo-conskega na model z eno cono, v kolikor so izpolnjeni določeni pogoji. Zato program loči med lokalnim in polno razvitim požarom. OZone V2 je nadgradnja za OZone V1, ki je lahko analiziral le modele z eno cono. Postopek izračuna požarne obtežbe je popolnoma v skladu z EN1991-1-2.

Program vsebuje več modulov (slika 4), ki si sledijo v vrstnem redu: Požarni sektor, Požar, Temperatura plinov, Jekleni profil, Segrevanje, Temperatura jekla.

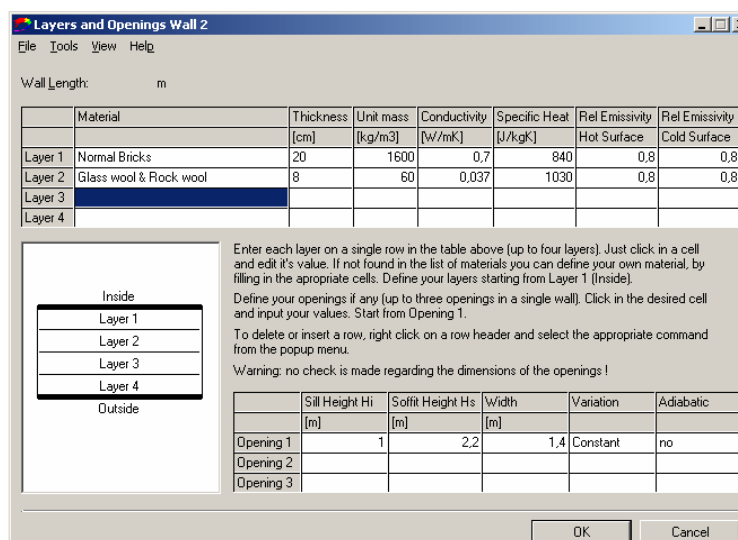


**Slika 4: Osnovno delovno okno programa OZone V2**

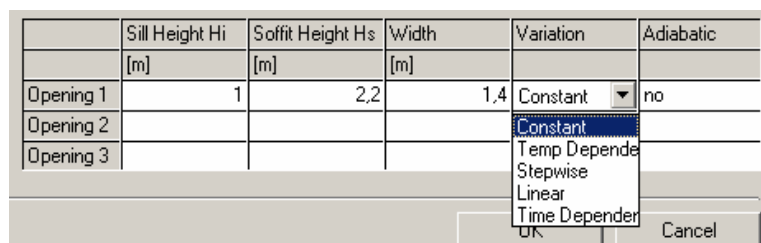
Na samem začetku se definira požarni sektor. Potrebno je določiti: obliko požarnega sektorja, obliko stropa oziroma strehe, dimenzije požarnega sektorja, prečni prerez posamezne stene, stropa in tal ter število in lastnosti odvajalcev dima (slika 5). Pri definiranju prečnih prerezov vsebuje program knjižnico materialov, ki se uporabljajo v praksi, ter njihove toplotne karakteristike. Izbranim materialom se poda debelina. Konstrukcijskim sklopom, ki vsebujejo odprtine (stene, streha), se v istem modulu podajo dimenzije in število odprtin, kot je to prikazano na sliki 6. Pri določanju posamezne odprtine (slika 7) se definira, kako se velikost odprtine spreminja med požarom (konstantno, linearno, v odvisnosti od temperature, v odvisnosti od časa ali stopničasto).



Slika 5: Modul za definiranje požarnega sektorja

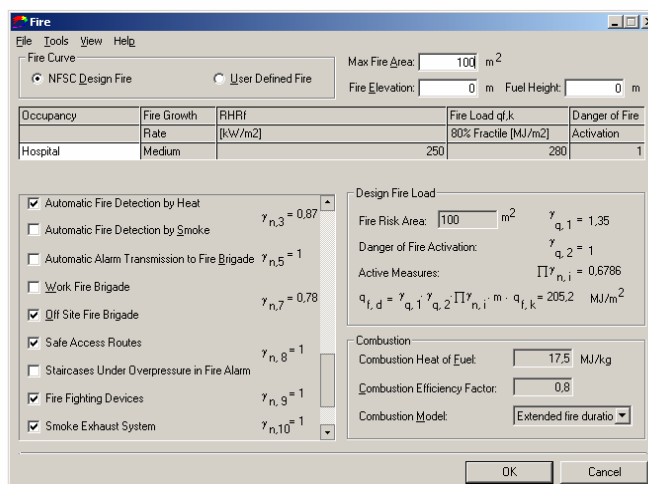


Slika 6: Podajanje materialov v posameznih prečnih prerezih



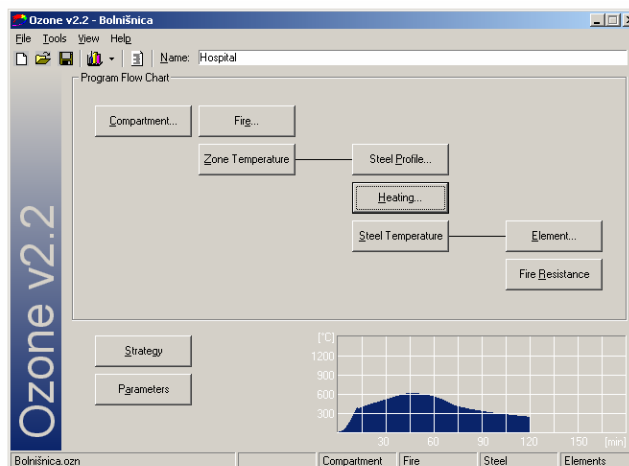
Slika 7: Definiranje odprtín v izbranem konstrukcijskem sklopu

V modulu Požar je potrebno definirati: aktivne protipožarne ukrepe, namembnost prostora in gorljivo površino (slika 8). Na omenjeni sliki se vidi, da izračun požarne obtežbe poteka popolnoma v skladu z EN1991-1-2 (aneks E) in po formuli (2).



**Slika 8: Določanje požarne obtežbe**

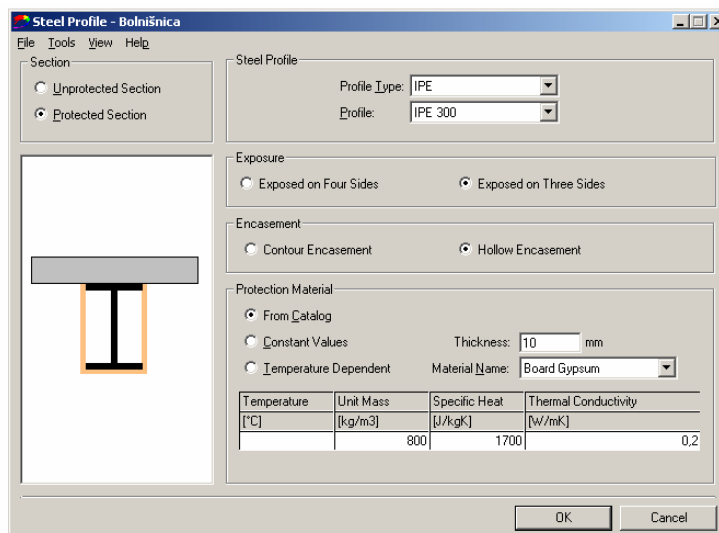
Potem, ko sta definirana oba modula: Požarni sektor in Požar, se aktivira še modul Temperatura plinov v požarnem sektorju. Program poda potek temperature v obliki grafikona v osnovnem oknu (slika 9).



**Slika 9: Izračunan potek temperature v požarnem sektorju**

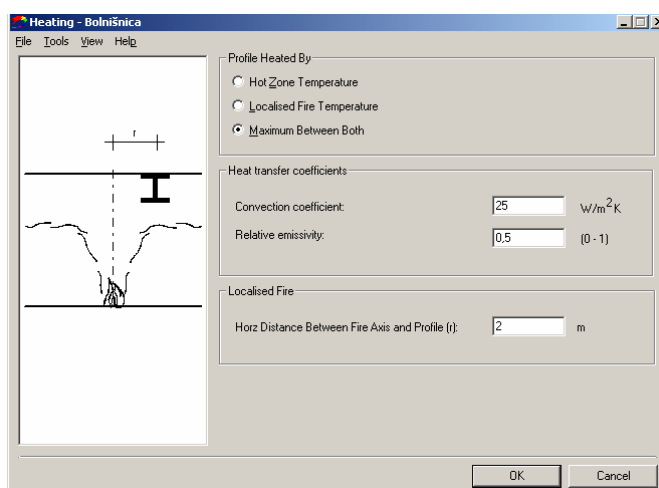
V modulu Jekleni profil se izbere profil (slika 10) za katerega bo program izračunal potek temperature v odvisnosti od izračunane temperature v požarnem sektorju. V kolikor je element protipožarno zaščiten se v tem modulu poleg profila definira še oblika in material s

katerim je profil zaščiten pred neposrednim segrevanjem ter debelina zaščite. Podati je potrebno še način segrevanja profila (s treh ali štirih strani).



**Slika 10: Podajanje profila in izbira protipožarne zaščite**

V naslednjem modulu Segrevanje se določi, kje se izbrani profil nahaja (slika 11). Torej temperaturo profila program izračuna za: lokalni požar, vročo cono ali maksimum med obema. Pri lokalnem požaru in maksimalni vrednosti je potrebno podati oddaljenost elementa od osi požara.



**Slika 11: Definiranje lege profila v požaru**

Na koncu se aktivira še modul Temperatura jekla, ki potek temperature jekla izračuna in shrani. Vsi rezultati se lahko pogledajo z ukazom View v orodni vrstici.

## 4 Uporaba programa Abaqus 6.6

S programom Abaqus 6.6 je izvedena mehanska analiza vseh konstrukcijskih sklopov v tej diplomski nalogi. Omenjeni program služi kot napredni računski model. V analizi zajema:

- kombiniran učinek mehanske obremenitve, geometrijske nepopolnosti in toplotne obremenitve
- različne zveze deformacija-napetost zaradi spremenljive temperature materiala
- geometrijsko nelinearnost
- nelinearne materialne lastnosti

V nadaljevanju je opisana uporaba programa Abaqus 6.6, nato pa sledijo različni primeri na katerih je bila izvedena mehanska analiza s tem programom v primeru požara.

### 4.1 Primerjava kritičnih uklonskih sil po EN1993-1-1 in s programom Abaqus

V kolikor želimo dobiti lastne vrednosti oz.  $\gamma_{cr}$  (Euler – elastična uklonska sila) izbranega obtežnega primera je potrebno narediti uklonsko analizo. V modulu Step namesto General postopka (Procedure type) izberemo Linear Perturbation in Buckle!

S pomočjo rezultatov (pomiki pri uklonskih oblikah) lahko v nadaljevanju pri napetostni analizi ustvarimo začetne geometrijske nepopolnosti, ki bodo imele obliko sorazmerno merodajni uklonski obliki!

Za kaj takega je potreben naslednji ukaz: v orodni vrstici izberemo Model/Edit KeyWord in na koncu zapisa vstavimo:

```
*Output, field, variable=PRESELECT
```

```
*Node file
```

```
U
```

```
*End Step
```

S tem povemo, da želimo zapis pomikov oz. razmerja pomikov med vozlišči shraniti za nadaljno obdelavo! Ustvari se nova datoteka s končnico .fil iz katere program v nadaljevanju bere koordinate vozlišč!

V nadaljevanju je potrebno izvesti napetostno analizo oz. izračun nosilnosti obravnavanega elementa. Za to, da vnesemo željene imperfektnosti, je potreben naslednji ukaz:

\*Imperfection, file=UklonskeOblike(ime datoteke s končnico .fil), step=1  
1(uklonska oblika), 0.02 (max. amplituda v metrih)

Zgoraj naveden izraz vstavimo pred podatke o Stepu v ukaznem oknu (ang. Edit KeyWord)!

**Primer 1:** Izračun uklonske sile prostoležečega nosilca dolžine 5m, HEA450 (slika 12)



**Slika 12: Obremenitev prostoležečega nosilca**

Z upoštevanjem EN1993-1-1 znaša za podan primer mejna uklonska sila:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} = 2\,890 \text{ kN}$$

$$\text{Elastična uklonska sila po Euler-ju znaša } N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_u^2} = 7\,851 \text{ kN.}$$

S programom Abaqus pridemo do sledečih rezultatov:

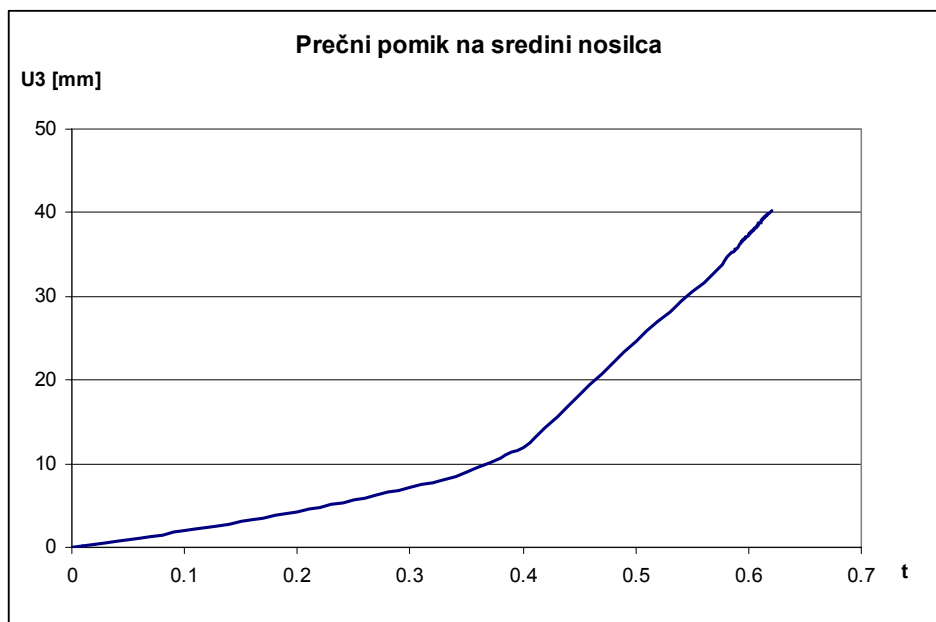
lastna vrednost oz. elastična uklonska sila znaša  $N_{cr} = 7\,736 \text{ kN}$ , kjer pride do razlike predvsem na račun manjšega vztrajnostnega momenta pri modelu HEA450 ( $A_{dej} = 178 \text{ cm}^2$ ,  $A_{Abaqus} = 171,8 \text{ cm}^2$ ) zaradi vogalov v profilu!

Nato v napetostni analizi upoštevamo geometrijske nepopolnosti sorazmerne 1. uklonski obliki (slika 13), kjer znaša največji pomik 1/250 razpona (EN1993-1-1, preglednica 5.1, uklonska krivulja b), kar predstavlja 2,0 cm. Ker želimo ugotoviti maksimalno silo, ki jo osno



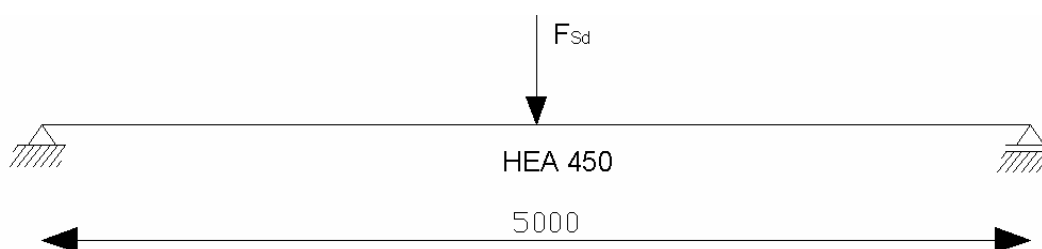


Na sliki 15 je prikazan prečni pomik na sredini nosilca v smeri močne osi. Za absolutni pomik je potrebno k podanim vrednostim prišteti še geometrijsko nepopolnost, ki na sredini nosilca znaša 20 mm.



Slika 15: Prečni pomik na sredini nosilca

**Primer 2:** Izračun bočne zvrnitve prostoležečega nosilca dolžine 5m in profila HEA450, (slika 16)



Slika 16: Obremenitev prostoležečega nosilca

$$F_{b,Rd} = \frac{M_{b,Rd} \cdot 4}{l} = 512,5 \text{ kN},$$

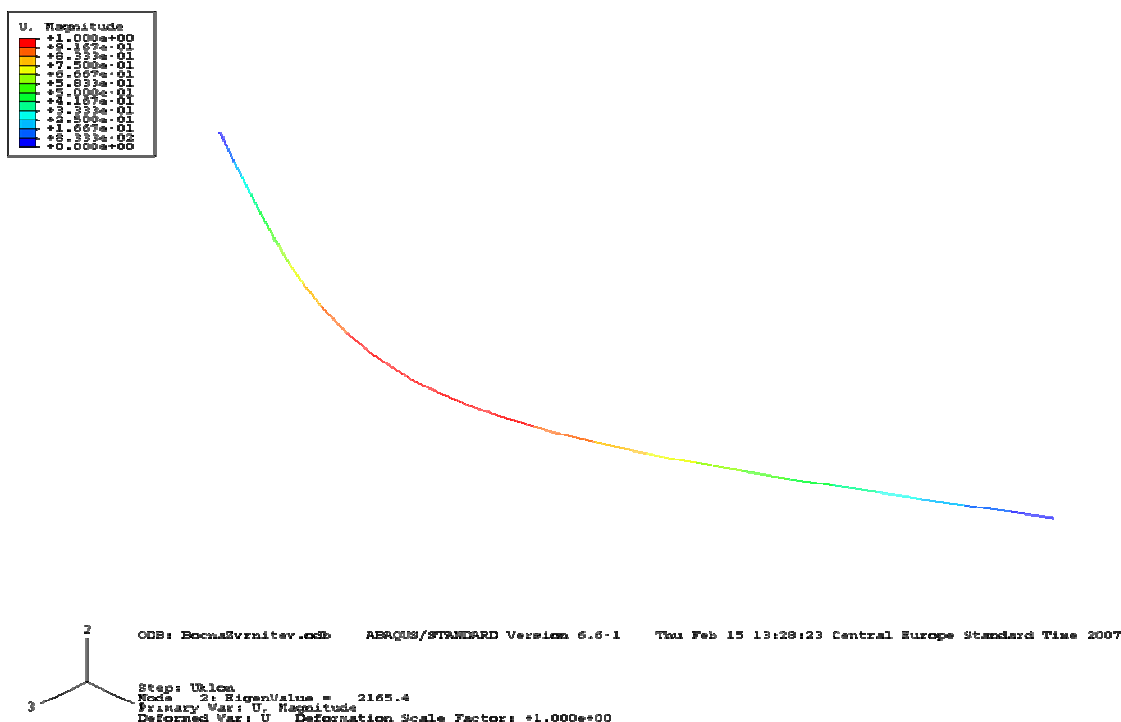
$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M1} = 640,6 \text{ kNm},$$

$$M_{el,Rd} = W_{el,y} \cdot f_y / \gamma_{M1} = 681,6 \text{ kNm} \rightarrow \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{el,Rd}}{M_{CR}}} = 0,45 \rightarrow \chi_{LT} = 0,94$$

$$M_{CR} = C_1 \cdot \frac{\pi}{k \cdot l} \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w \cdot E \cdot I_z}{(k_w \cdot l)^2}} = 3\,369,5 \text{ kNm} \rightarrow F_{Cr} = \frac{M_{CR} \cdot 4}{5} = 2\,696 \text{ kN}$$

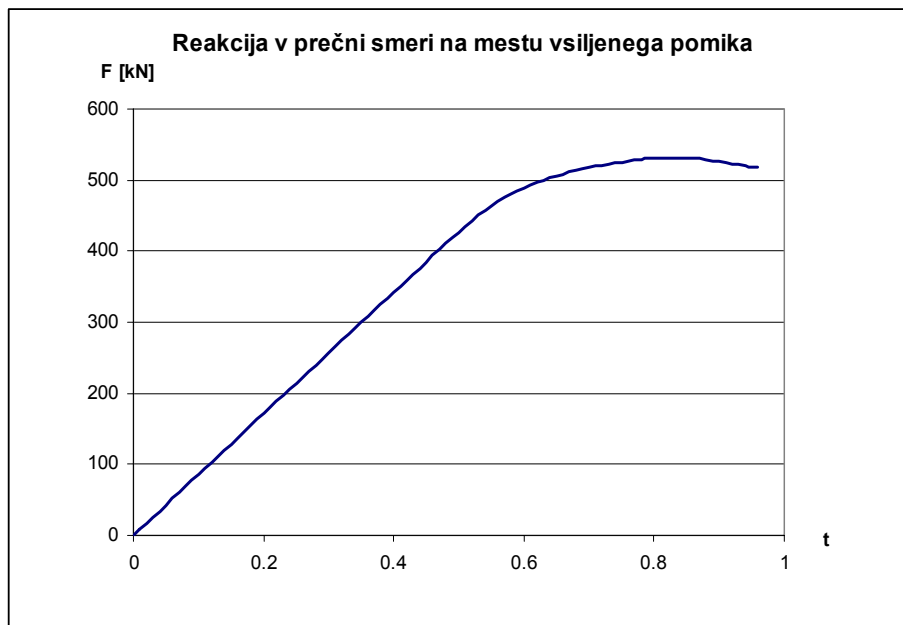
Ob upoštevanju EN1993-1-1 znaša za podan primer mejna sila za bočno zvrnitev  $F_{b,Rd} = 512,5 \text{ kN}$ , medtem ko znaša kritična uklonska sila  $F_{cr} = 2\,696 \text{ kN}$ .

V računalniški analizi upoštevamo geometrijske nepopolnosti sorazmerne 1. uklonski obliki (slika 17), kjer znaša največji prečni pomik 1/250 razpona (EN1993-1-1, preglednica 5.1), kar predstavlja 2,0 cm. Ker želimo ugotoviti maksimalno silo, ki jo upogibno obremenjen nosilec lahko prenese, se namesto, da bi vnašali silo, vnaša pomik na sredini v prečni smeri nosilca, beleži pa se reakcijo na mestu vsiljenega pomika v smeri vsiljevanja! Računa se izvaja po TDR, material je jeklo S235 z elastičnim odzivom in nosilnostjo 235 MPa! Maksimalna zabeležena (mejna) sila, ki se pojavi v nosilcu preden le-ta odpove znaša 531 kN, kritična uklonska pa 2165 kN (slika 17)!



Slika 17: Prva uklonska oblika in lastna vrednost pri koncentrirani sili 1 kN

Nosilcu na sredini vsilimo 2 cm pomika v smeri gravitacije, vendar nosilec pri približno 95% vnesenega pomika odpove (slika 18)!



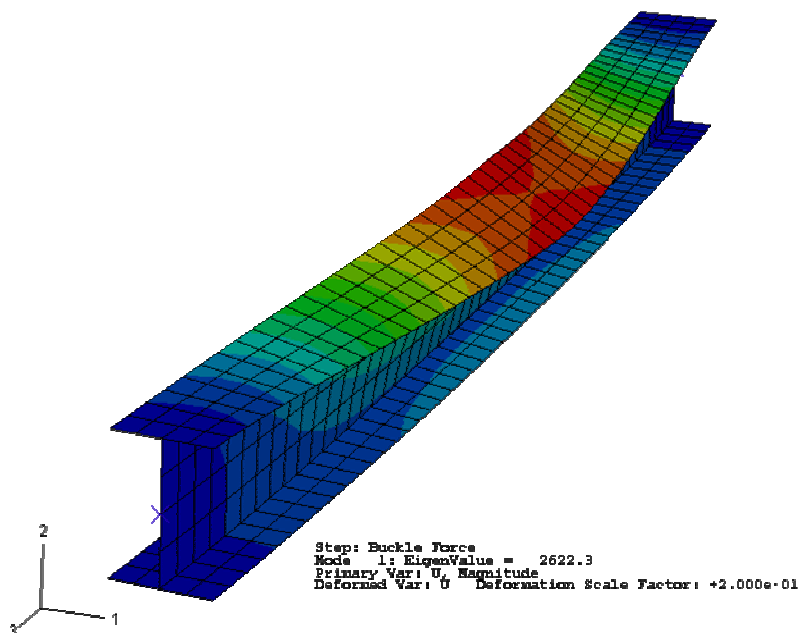
**Slika 18: Reakcija v prečni smeri**

Na sliki 19 je prikazan prečni pomik na sredini nosilca. Za absolutni pomik je potrebno k podanim vrednostim prišteti še geometrijsko nepopolnost, ki na sredini nosilca znaša 20 mm.



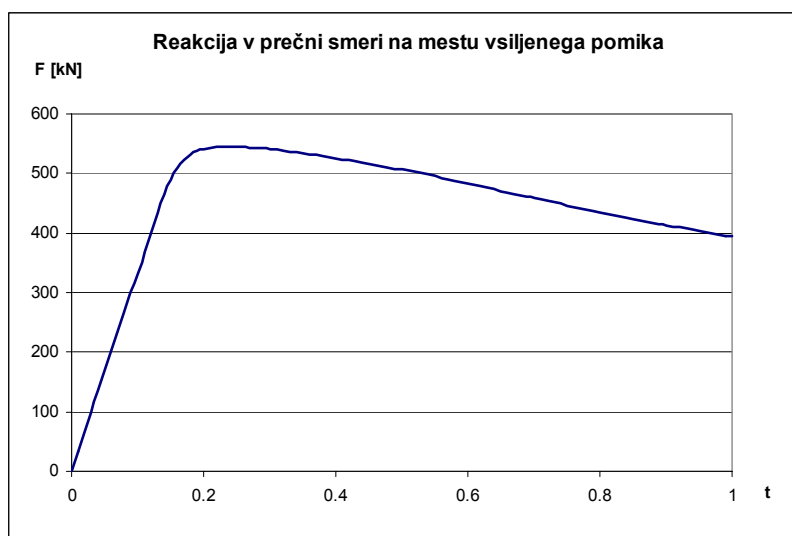
**Slika 19: Prečni pomik na sredini nosilca**

Vsi zgoraj navedeni rezultati dobljeni z numeričnimi analizami se nanašajo na uporabo linijskih končnih elementov (KE)! Za primerjavo so v nadaljevanju podani rezultati, ko v Abaqusu namesto linijskih končnih elementov uporabimo ploskovne končne elemente! Osredotočimo se na analizo upogibno obremenjenega prostoležečega nosilca (slika 20).



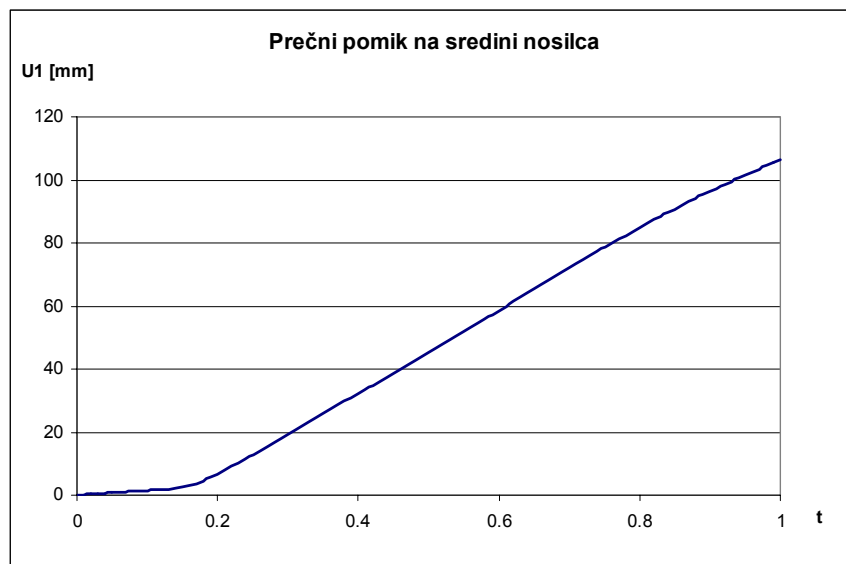
**Slika 20: Prva uklonska oblika in lastna vrednost oz.  $\gamma_{cr}$  pri koncentrirani sili 1kN**

Nosilcu na sredini vsilimo pomik v smeri gravitacije. Analiza se izvede do konca, vendar je maksimalna vnešena koncentrirana sila enaka 545 kN (slika 21), medtem ko je kritična uklonska sila enaka 2622 kN (slika 20)!



**Slika 21: Reakcija v prečni smeri**

Na sliki 22 je prikazan prečni pomik na sredini nosilca v smeri močne osi. Za absolutni pomik je potrebno k podanim vrednostim prišteti še geometrijsko nepopolnost, ki na sredini nosilca znaša 20 mm.



**Slika 22: Prečni pomik na sredini**

Z uporabo ploskovnih končnih elementov sta kritična in mejna uklonska sila bolj podobni vrednostim dobljenim v skladu z EN1993-1-1, kot z uporabo linijskih končnih elementov!

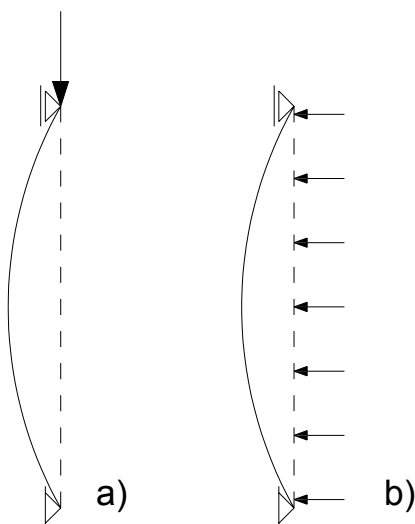
## 4.2 Vnos podatkov za požarno analizo s programsko opremo Abaqus 6.6

V nadaljevanju je opisan postopek vnosa podatkov za požarno analizo s programom Abaqus 6.6. Poudariti je potrebno, da so podatki o poteku temperature v posameznem elementu v odvisnosti od časa pridobljeni s programom Ozone V2!

Za prikaz podajanja podatkov v Abaqusu se omejimo na enostaven primer, zato je v nadaljevanju opisan postopek za požarno analizo prostoležečega nosilca. V kolikor želimo v analizi upoštevati lokalne nepopolnosti konstrukcijskih elementov v njihovi vzdolžni smeri, sta potrebni dve ločeni analizi. V prvi analizi je torej potrebno idealno raven element deformirati tako, da bo njegova deformirana oblika ustrezala elementu z lokalno geometrijsko nepopolnostjo!

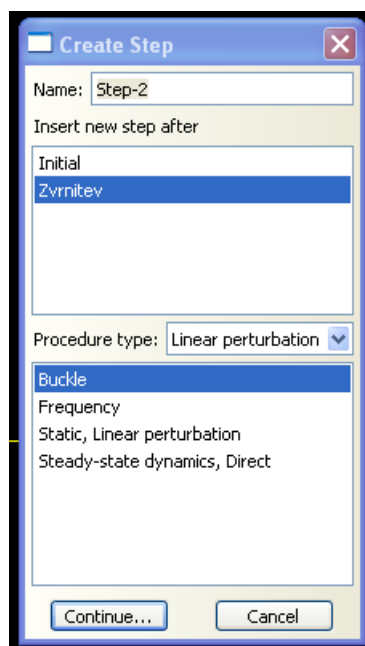
Predpostavimo, da je idealno raven model linijskega nosilca že definiran. Sedaj je potrebno obliko nosilca spremeniti tako, da bo deformirana oblika ustrezala modelu prostoležečega nosilca z lokalno nepopolnostjo.

To lahko storimo na dva načina: izberemo primerno uklonsko obliko nosilca (slika 23.a) in podamo vrednost amplitude oziroma odklona od idealne linije (ločna nepopolnost) ali pa nosilec obremenimo z nadomestno horizontalno obtežbo tako (slika 23.b), da se ustrezno deformira in da amplituda oziroma odklon ustreza željenemu oziroma zahtevanemu! Drugi način je bolj primeren, ko imamo opravka z modelom, ki vključuje več konstrukcijskih elementov, kot so na primer okviri v prostoru. Pri nadomestni obtežbi je pomembno, da se v napetostno analizo prenesejo samo podatki o deformirani obliki elementov in ne tudi napetosti, ki se pri tem pojavijo!



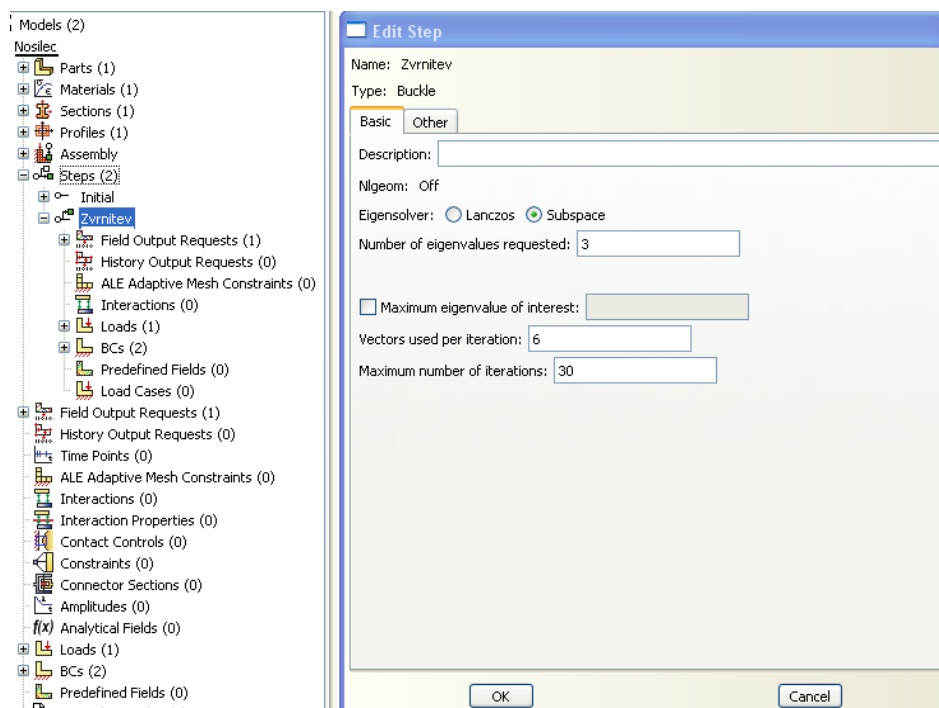
**Slika 23: Geometrijske nepopolnosti zaradi uklona (a) in zaradi nadomestne obtežbe (b)**

Ko se odločimo za izračun uklonskih oblik, je potrebna uklonska analiza. V koraku, ko definiramo Step, moramo pri Procedure type namesto General vključiti Linear Perturbation in izbrati Buckle (slika 24)! V našem primeru bomo iskali primerno uklonsko obliko za bočno zvrnitev nosilca; Step se imenuje Zvrnitev.



Slika 24: Definiranje uklonske analize v programu Abaqus 6.6

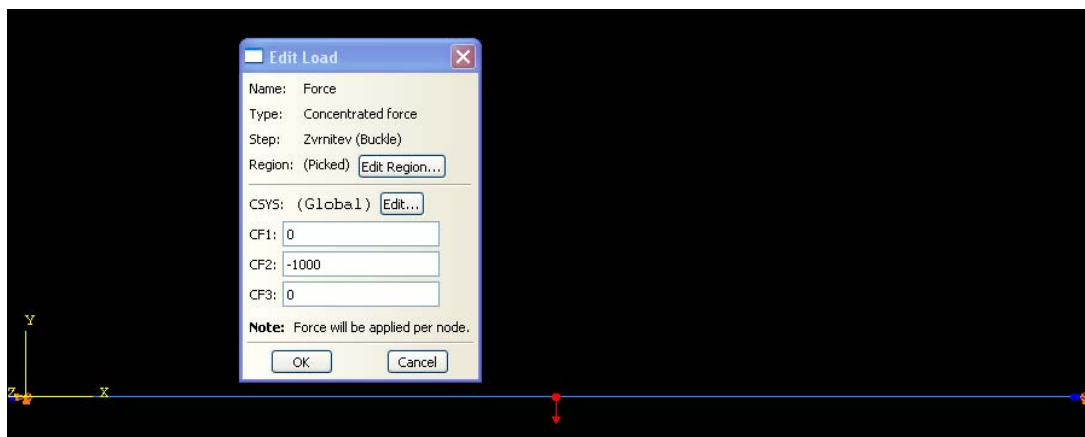
V oknu Edit Step se definira število lastnih vrednosti (uklonskih oblik), ki jih program izračuna; v tem primeru 3 (slika 25).



Slika 25: Definiranje lastnih vrednosti



Sedaj je potrebno podati obtežbo zaradi katere bo prišlo do izgube stabilnosti. V tem primeru je to koncentrirana sila na sredini razpona, ki povzroča upogib nosilca in posledično privede do bočne zvrnitve (slika 26). Vrednost sile je 1000 N. Zato bodo dobljene lastne vrednosti predstavljale elastične kritične uklonske sile v kN!



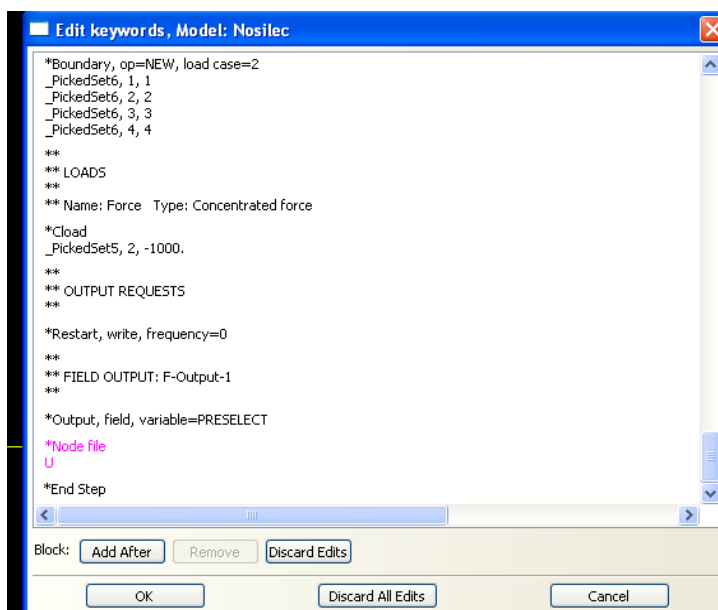
**Slika 26: Definiranje koncentrirane obtežbe**

Preden se konča s prvo analizo je v ukazno okno Edit keywords potrebno vnesti ukaz s katerim se pove, naj se shranijo podatki o vozliščih posameznih končnih elementov (KE) po tem, ko se zaradi enotske obtežbe nosilec ukloni! Pred koncem zapisa Load Step se vnese ukaz obarvan rdeče na sliki 27: \*Node file

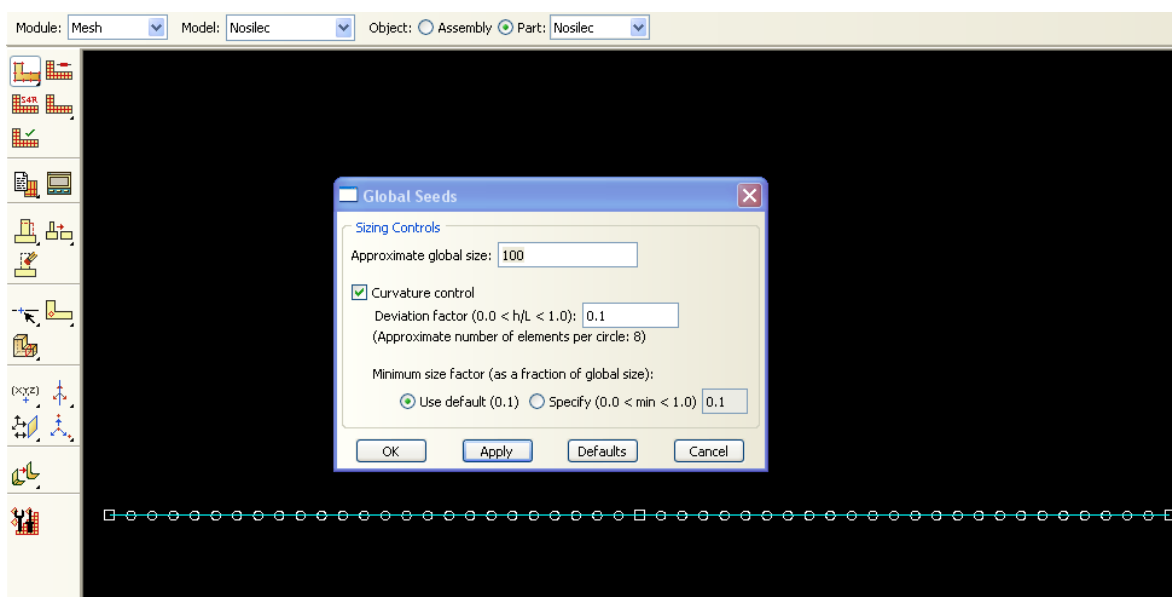
U

S tem ukazom se doseže, da se po zaključku uklonske analize ustvari datoteka s končnico .fil v kateri so zapisani podatki o vozliščih končnih elementov. Enak ukaz se vnese tudi za zapis podatkov o končnih elementih, ki so se premaknili zaradi izbrane obtežbe (prej omenjeni drugi način).

Pomembno dejstvo je, da morata biti mreži končnih elementov v uklonski analizi in kasneje v analizi nosilnosti popolnoma identični (slika 28)!



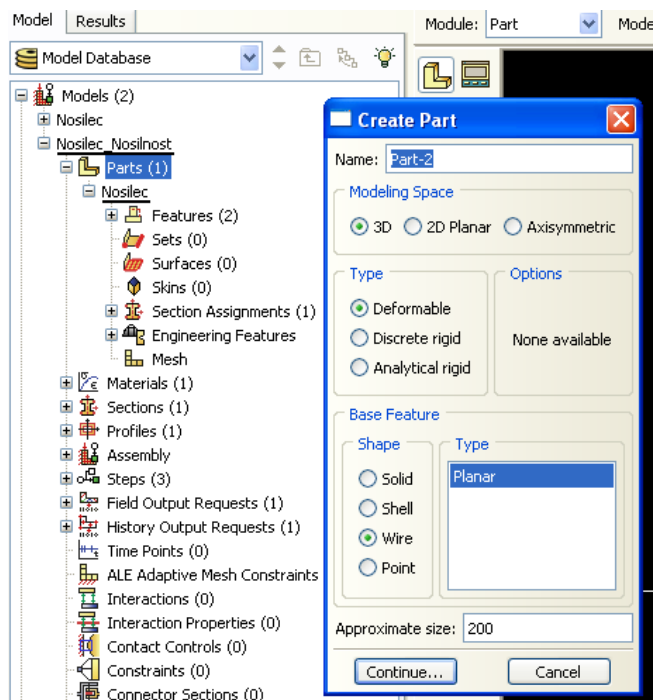
Slika 27: Vnos ukaza v ukazno okno



Slika 28: Izbrana mreža končnih elementov

Sedaj, ko je uklonska analiza že izvedena in je .fil datoteko ustvarjena, se lahko poda podatke za analizo nosilnosti nosilca zaradi spreminjajoče temperature v nosilcu.

V izbranem primeru so podani izključno linijski končni elementi v prostoru. Linijski model je bil podan že v uklonski analizi (slika 29).



**Slika 29: Podajanje linijskega modela**

Za podajanje materialnih karakteristik modela so ključni naslednji parametri: gostota materiala, odvisnost elastičnega modula materiala od temperature materiala, koeficient specifičnega toplotnega raztezka materiala ( $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ), zveza med dejanskimi napetostmi in dejanskimi plastičnimi deformacijami pri določeni temperaturi! Zato, da so omenjeni parametri podani v odvisnosti od temperature, je potrebno aktivirati oziroma odključati polje "Use Temperature Dependent Data" v oknu, kjer podajamo materialne karakteristike. Tako se pojavi še stolpec v katerega se vpiše pripadajočo temperaturo materiala za posamezni parameter.

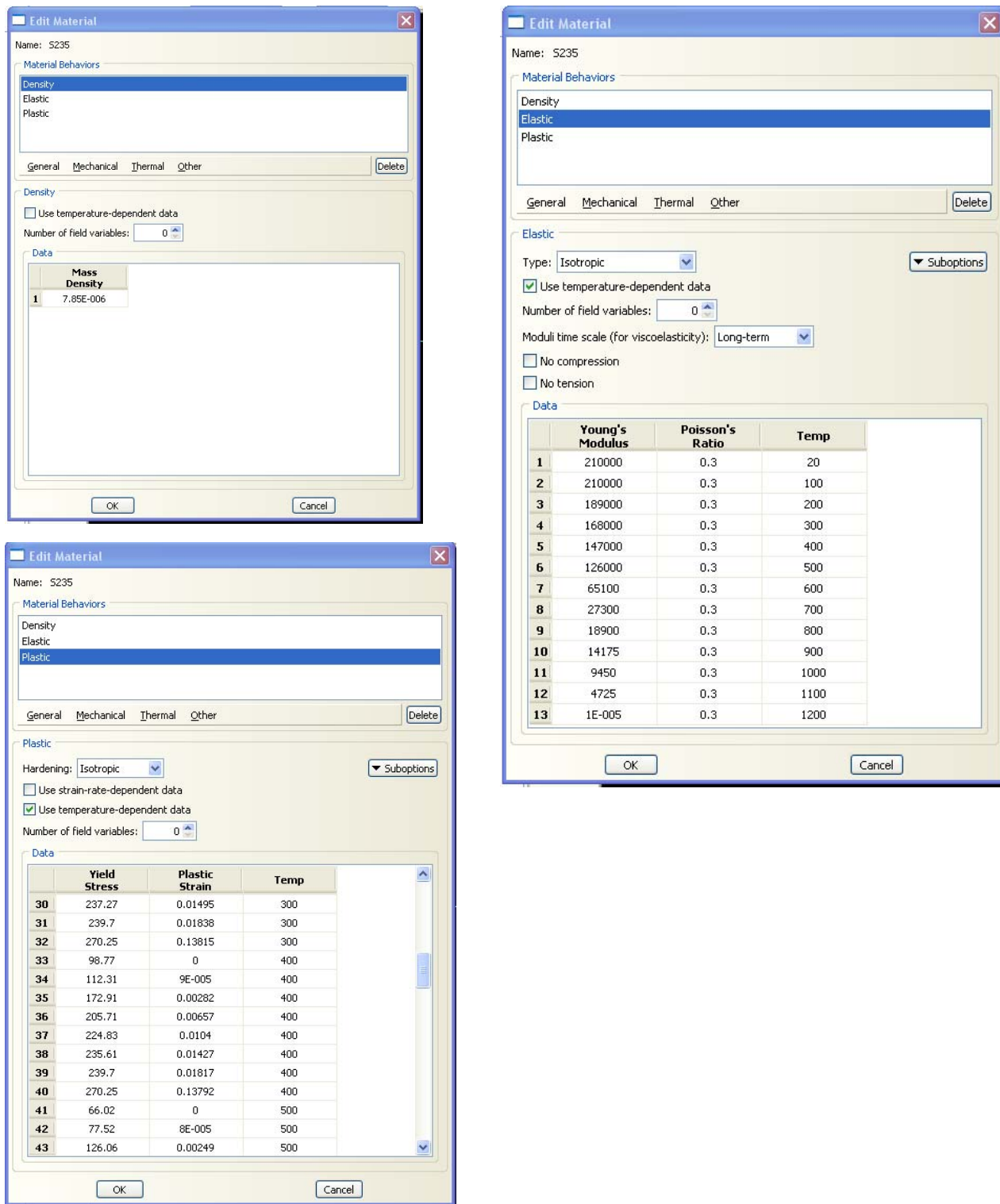
Pretvorbo iz nominalnih deformacij in napetosti v dejanske deformacije in napetosti se izvede po sledečih izrazih:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (4)$$

Zveze med nominalnimi deformacijami in nominalnimi napetostmi so privzete iz EN 1993-1-2, 3.2.1, slika 3.1.

Enote v katerih je definiran material, v obravnavanem primeru jeklo S235, in model so v mm in N kot tudi v  $\text{N/mm}^2$  (slika 30).



Slika 30: Definiranje jekla S235 v Abaqusu 6.6

Pri definiciji elasto-plastičnega dela zveze med napetostjo in deformacijo je za vsako temperaturno območje navedenih po 8 oziroma 9 vmesnih točk, ki zadoščajo za dovolj natančno ujemanje z dejanskim  $\sigma$ - $\epsilon$  diagramom (slika 30 in preglednica 1). Temperaturna območja so po EN1993-1-2 definirana na vsakih 100 °C; prvo pri sobni temperaturi 20 °C nato pri 100 °C, 200 °C, ..., vse do 1200 °C, kjer je nosilnost zanemarljiva.

Za vmesne temperature program uporablja interpolacijo, ter tako izračuna zvezo med dejansko napetostjo in dejansko deformacijo pri poljubni temperaturi!

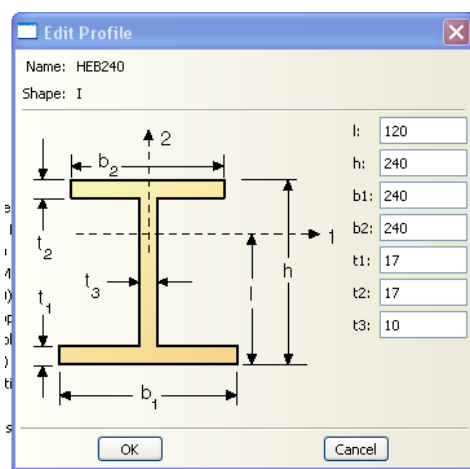
**Preglednica 1: Zveze med dejanskimi napetostmi in dejanskimi deformacijami pri različnih temperaturah**

T = 20 C°		T = 100 C°		T = 200 C°		T = 300 C°	
$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$
235,26	0,00000	235,26	0,00000	189,84	0,00000	144,18	0,00000
235,28	0,00008	235,28	0,00008	195,91	0,00016	153,21	0,00009
236,18	0,00386	236,18	0,00386	218,34	0,00383	197,23	0,00332
237,12	0,00783	237,12	0,00783	228,55	0,00775	218,07	0,00717
238,06	0,01178	238,06	0,01178	234,78	0,01167	230,36	0,01105
239,00	0,01572	239,00	0,01572	238,41	0,01560	237,27	0,01495
239,70	0,01866	239,70	0,01866	239,70	0,01853	239,70	0,01838
270,25	0,13848	270,25	0,13848	270,25	0,13833	270,25	0,13815

T = 400 C°		T = 500 C°		T = 600 C°		T = 700 C°	
$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$
98,77	0,00000	66,02	0,00000	19,89	0,00000	4,05	0,00000
112,31	0,00009	77,52	0,00008	28,04	0,00007	7,27	0,00003
172,91	0,00282	126,06	0,00249	62,52	0,00204	25,20	0,00157
205,71	0,00657	155,75	0,00624	86,83	0,00564	39,64	0,00503
224,83	0,01040	172,92	0,01006	100,78	0,00939	47,84	0,00869
235,61	0,01427	182,76	0,01393	108,87	0,01322	52,65	0,01247
239,70	0,01817	186,97	0,01832	112,42	0,01709	54,89	0,01632
270,25	0,13792	190,63	0,03771	112,66	0,01807	55,13	0,01778
		210,80	0,13809	127,02	0,13781	62,16	0,13749

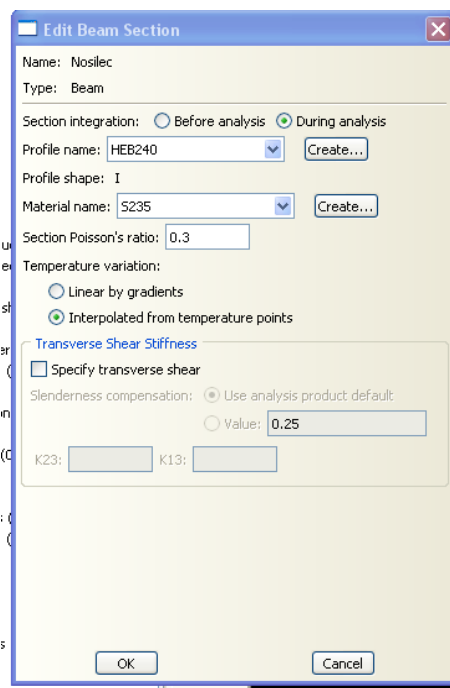
T = 800 C°		T = 900 C°		T = 1000 C°		T = 1100 C°	
$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon_{pl}$
1,29	0,00000	0,53	0,00000	0,24	0,00000	0,06	0,00000
2,46	0,00002	1,49	0,00005	0,61	0,00002	0,28	0,00002
10,93	0,00142	6,03	0,00157	3,42	0,00114	1,68	0,00114
18,40	0,00501	10,07	0,00527	6,43	0,00480	3,20	0,00481
22,53	0,00876	12,30	0,00908	8,04	0,00860	4,01	0,00861
24,98	0,01258	13,63	0,01294	9,00	0,01246	4,49	0,01246
25,99	0,01548	14,28	0,01683	9,49	0,01634	4,74	0,01634
26,37	0,01841	14,38	0,01879	9,59	0,01879	4,79	0,01879
29,73	0,13819	16,22	0,13862	10,81	0,13862	5,41	0,13862

Dimenzije profila so podane v milimetrih (slika 31).



Slika 31: Podajanje profila

Lastnosti profila se linijskemu modelu pripišejo na sledeč način (Property Module: Assign / Beam Section Orientation): integracija po prerezu naj se izvaja med analizo (Section Integration: During Analysis); izbere se ustrezen profil, ki je bil prej definiran; izbere se ustrezen material (S235); nenazadnje je pomembno, da se pri Temperature Variation vključi Interpolated From Temperature Points (slika 32), sicer se v integracijske točke zapišejo napačne vrednosti temperatur!



Slika 32: Podajanje lastnosti prereza

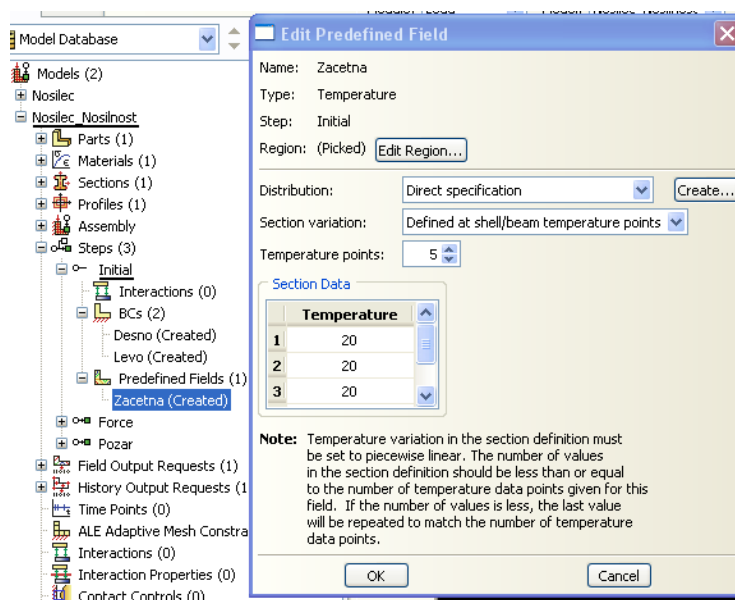
V nadaljevanju je potrebno v posameznih korakih definirati temperaturo v posameznih elementih. Najprej se v Initial Step pod Predefined Fields določi sobno temperaturo 20 °C v vseh petih integracijskih točkah po višini prereza. Po priporočilu iz Abaqusovega priročnika se izbere 5 integracijskih točk po višini prereza! Potrebno je izbrati naslednje opcije (slika 33):

Distribution: Direct Specification

Section Variation: Defined at Shell/Beam Temperature Points

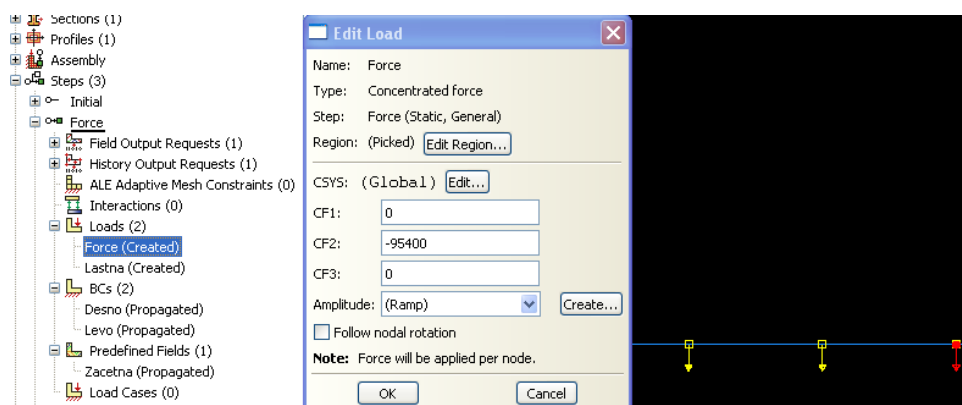
Temperature Points: 5

Z ukazom Edit Region se določi kateremu elementu se pripiše definirano temperaturo!



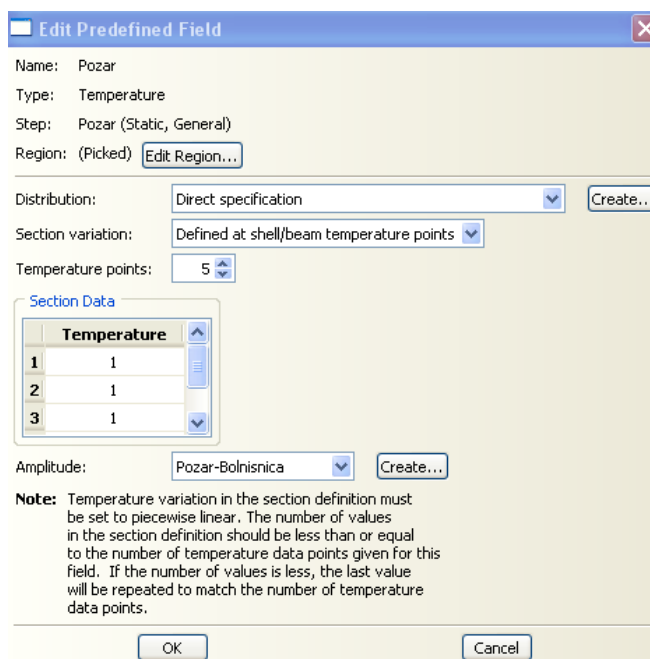
**Slika 33: Podajanje temperature**

V naslednjem koraku se definira obtežba pri požarni obtežni kombinaciji; v obravnavanem primeru je to koncentrirana sila v polju prostoležečega nosilca (slika 34).



Slika 34: Podajanje obtežbe pri požarni obtežni kombinaciji

Sedaj, ko sta definirani začetna temperatura nosilca in ustrezna obtežba za požarno obtežno kombinacijo, je potrebno definirati potek temperature v nosilcu v odvisnosti od časa! Potek temperature je definiran pri dve urnem požaru! Potrebno je definirati nov Step, imenovan Pozar, kjer se določi Step Time oziroma dolžino koraka, ki je enaka 7200 sekund! V tem koraku se definira nov Predefined Field imenovan Pozar, ki sledi prej definiranemu v Initial Stepu. V vseh petih integracijskih točkah je potrebno izbrati vrednost 1 (slika 35), saj se v nadaljevanju definira amplituda oziroma potek temperature po času za vsako točko!



Slika 35: Definiranje požara



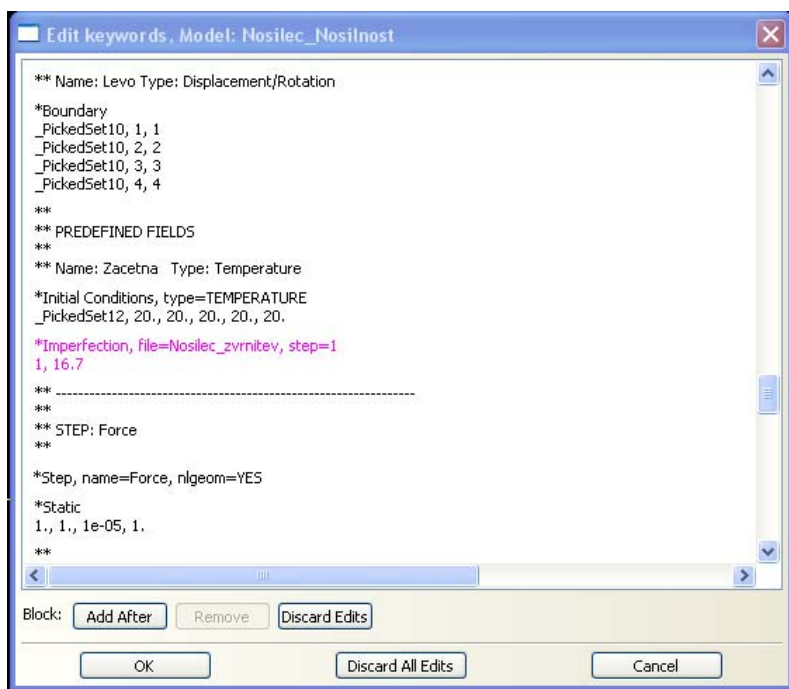
V amplitudi, poimenovani Pozar-Bolnisnica, se v obliki tabele zapiše potek temperature za vsakih 60 sekund požara (slika 36)! Te vrednosti so dobljene s programom Ozone V2!

	Time/Frequency	Amplitude
1	0	20
2	60	20.11
3	120	20.58
4	180	21.68
5	240	23.5
6	300	26.77
7	360	32.25
8	420	40.14
9	480	50.74
10	540	64.32
11	600	81.13
12	660	101.38
13	720	123.02
14	780	143.28
15	840	162.26
16	900	180.62
17	960	198.45
18	1020	215.78

Slika 36: Podajanje temperatur v amplitudo

Na koncu je potrebno, preden se zažene analiza, v Keyword Edit vnesti ukaz s katerim se pove, kolikšna naj bo maksimalna nepopolnost elementa glede na pomike, dobljene v uklonski analizi. Seveda velja podobno, v kolikor se nepopolnost doseže z nadomestno obtežbo. Ukaz se vstavi pred podatke o Step-ih (slika 37):

\*Imperfection, file=(vpiše se ime datoteke s končnico .fil), step=1(št. koraka)  
1(uklonska oblika), 16.7(vrednost pomika oz. nepopolnosti v mm)



**Slika 37: Vnašanje nepopolnosti**

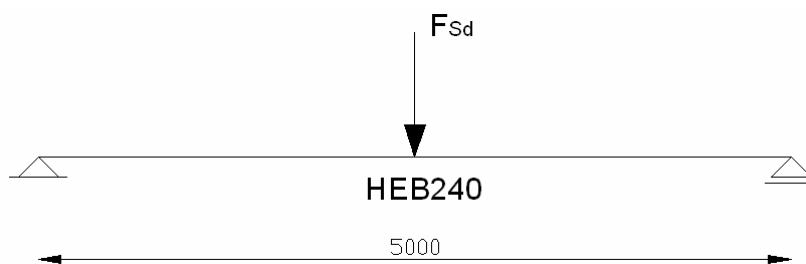
Pri večetažnih okvirih je postopek podoben, le da je tam enostavneje geometrijske nepopolnosti podati z nadomestno horizontalno obtežbo kot pa z iskanjem primerne uklonske oblike. V takih konstrukcijskih sklopih se nahajajo elementi z različnimi profili in je zato potrebno za vsako skupino profilov posebej definirati Predefined Field in jim tako pripisati ustrezen potek temperature v odvisnosti od časa!

### 4.3 Vpliv velikosti intervala na rezultate pri požarni analizi

V nadaljevanju sledi analiza vpliva velikosti intervala na rezultate požarne analize. Pri vseh analizah do sedaj so bili rezultati pridobljeni s programom Ozone izpisani na vsak 60 sekund! Ti rezultati se nanašajo predvsem na temperaturo izbranega profila v nekem požaru pri nekem času. Analize so bile izvedene za dve urne požare, kar pomeni, da vsakemu profilu pripada 120 vrednosti. Te vrednosti (temperatura v odvisnosti od časa) se nato vnesejo v program Abaqus, kjer se preveri odziv izbranega konstrukcijskega sklopa na vnešeno temperaturo elementov pri požarni obtežni kombinaciji.

Preveriti je potrebno, za koliko bi se rezultati razlikovali, v kolikor bi bila dolžina intervalov med zabeleženimi vrednostmi v Ozonu manjša oziroma večja. V nadaljevanju je izvedena primerjava rezultatov za tri različne intervale. Prvi interval je dolg 30 sekund, drugi ostane enak kot doslej, t.j. 60 sekund in tretji 600 sekund oziroma 5 minut.

Analiza se izvede za enostaven upogibno obremenjen prostoležeči nosilec, razpona 5 metrov s profilom HEB240 (slika 38).

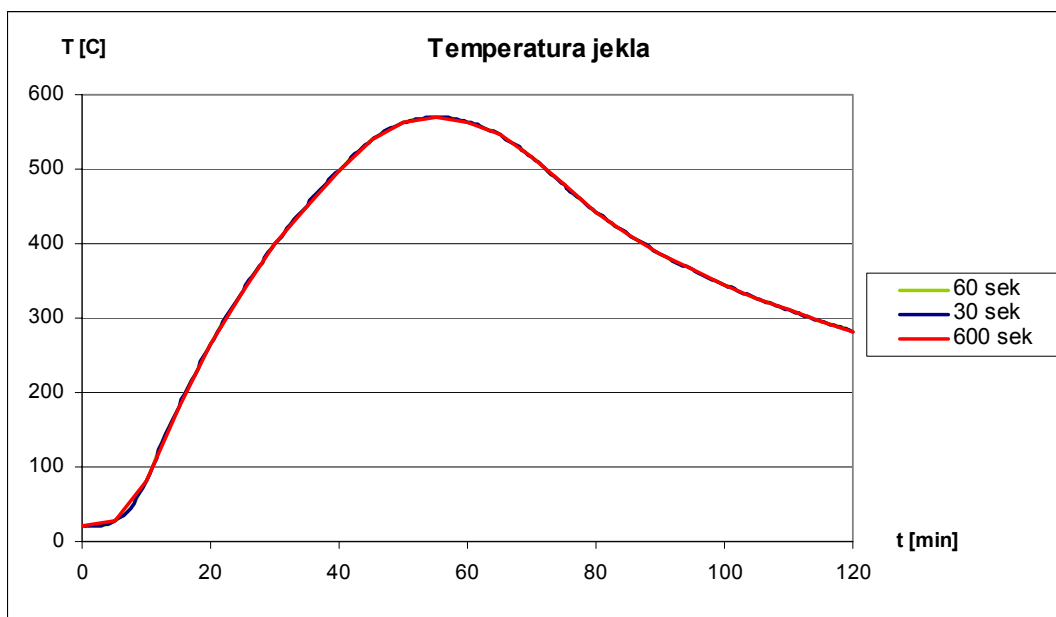


**Slika 38: Obremenitev prostoležečega nosilca**

Obtežba:  $F_G = F_Q = 56,1 \text{ kN}$

Požar:  $F_{Ed,A} = 1,0 \cdot F_G + 0,7 \cdot F_Q = 56,1 + 0,7 \cdot 56,1 = 95,4 \text{ kN}$

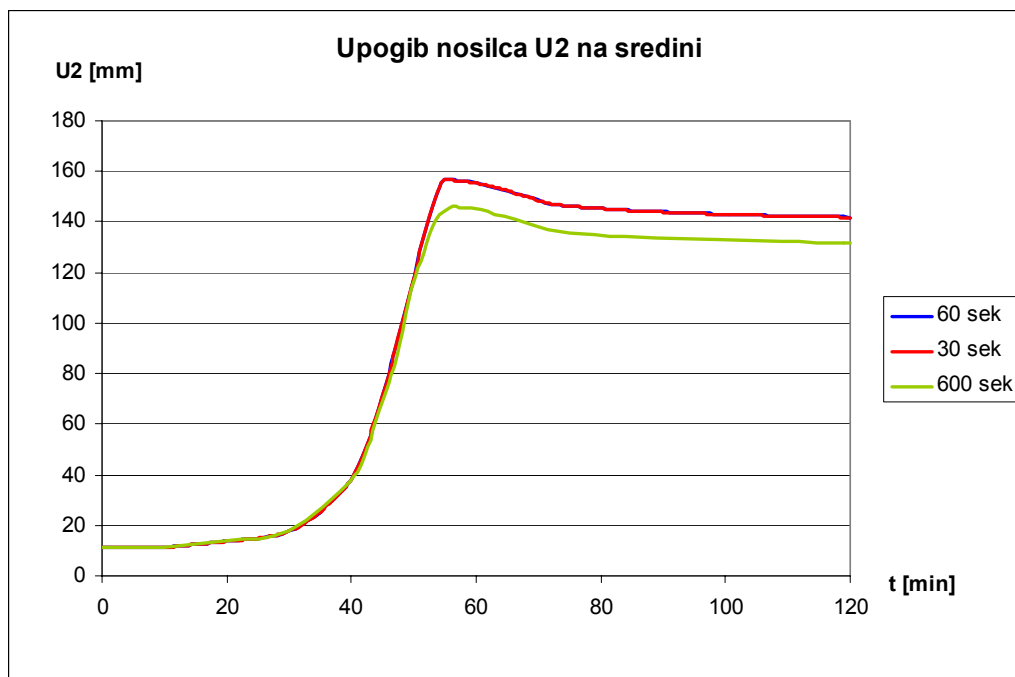
Slika 39 prikazuje temperaturo nosilca v izbranem požarnem sektorju (bolnišnica) pri različno dolgih intervalih beleženja podatkov.



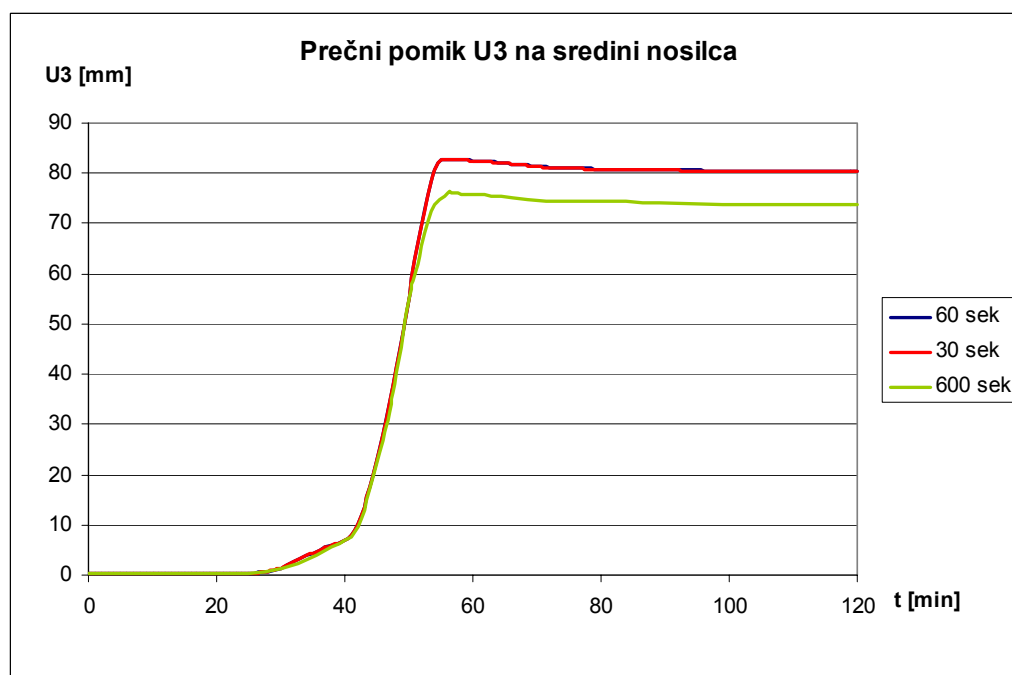
**Slika 39: Temperatura jekla pri različno dolgih intervalih med vmesnimi točkami**

Ni bistvene razlike med dolgim in kratkim intervalom beleženja podatkov! Na diagramu so točke povezane z linearnimi krivuljami.

Sledi primerjava prečnih pomikov U3 (slika 40) in upogibov U2 (slika 41) na sredini prostoležečega nosilca.



Slika 40: Upogib U2 na sredini nosilca pri različnih intervalih



Slika 41: Prečni pomik U3 na sredini nosilca pri različnih intervalih

Kot je razvidno iz zgornjih slik, sledi, da so razlike med 30 in 60 sekundnim intervalom minimalne, medtem, ko pri 600 sekundnem intervalu prihaja do večjih odstopanj pri pomikih! Torej je med opazovanimi intervali optimalna uporaba 60 sekundnih intervalov v katerih se zapisujejo podatki in izvajajo izračuni!

#### 4.4 Požarna analiza treh osnovnih primerov

Vsi trije elementi (tlačen steber, upogibno obremenjen nosilec, upogibno in tlačno obremenjen nosilec) so bili dimenzionirani po MSN, pri požarni analizi pa so bili obremenjeni s požarno obtežno kombinacijo, kjer je bila obremenitev nižja za približno 50%. Obtežba v MSN je bila izbrana tako, da je profil HEB240 zadoščal za vse tri obtežne primere. Pri obtežbi je upoštevan enak delež stalne in spremenljive obtežbe ( $F_G = F_Q$ ).

Za določitev temperatur v jeklenem profilu je potrebna analiza s programom Ozone V2. Določiti je potrebno dimenzije požarnega sektorja, konstrukcijske sklope požarnega sektorja, velikost odprtin, namembnost prostora, gorljivo površino ter aktivne ukrepe za preprečitev požara, ki zmanjšujejo požarno obtežbo oz. jakost požara!

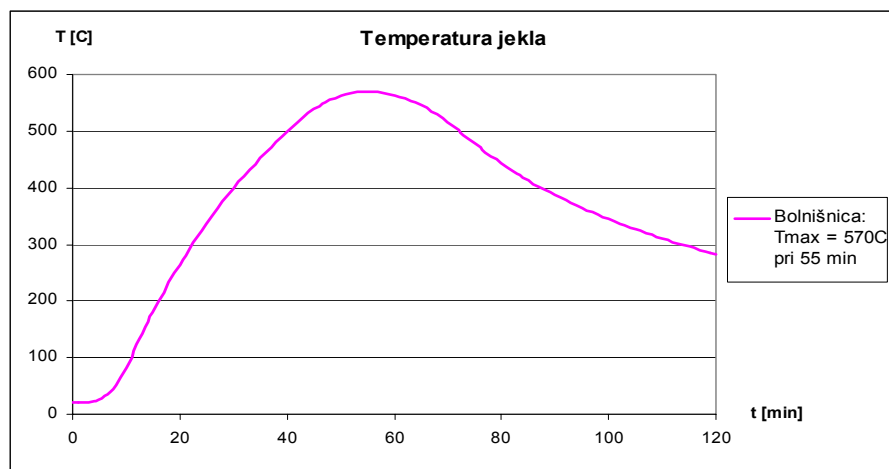
Obravnavan je požar v bolnišnici, kjer znaša maksimalna temperatura v nezaščitenem profilu 570 °C po 55 minutah požara!

Požarni sektor: **Bolnišnica**: gorljiva površina 100 m<sup>2</sup>,

dimenzije sektorja: 10m · 10m · 4m; odprtino predstavljajo samo vrata.

Aktivni protipožarni ukrepi:

- avtomatsko zaznavanje požara s toploto
- zunanje gasilske enote
- varne dostopne poti
- naprave za gašenje požara
- sistem odvajanja dima
- šprinklerji

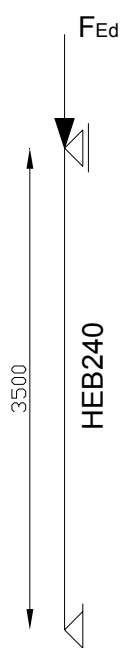


Slika 42: Temperatura jekla zaradi požara v bolnišnici

V vseh treh primerih so upoštevane lokalne (ločne) geometrijske nepopolnosti elementov!

#### 4.4.1 Tlačno obremenjen steber

V nadaljevanju je opisana požarna analiza tlačno obremenjenega stebra (slika 43). Najprej je na podlagi znane stalne in spremenljive obtežbe izvedena analiza v mejnem stanju nosilnosti (MSN), kasneje pa še za požarno obtežno kombinacijo.



$$F_G = F_Q = 350,9 \text{ kN} ; e_0 = L / 150 = 2,33 \text{ cm}$$

MSN:

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot F_G + 1,5 \cdot F_Q = 1,35 \cdot 350,9 + 1,5 \cdot 350,9 = 1000 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \chi_z A f_y / \gamma_{MI} = 0,78 \cdot 106 \cdot 23,5 / 1,0 = 1943 \text{ kN} \geq F_{Ed}$$

$$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 350 / (6,08 \cdot 93,9) = 0,61 \rightarrow \chi^c = 0,78$$

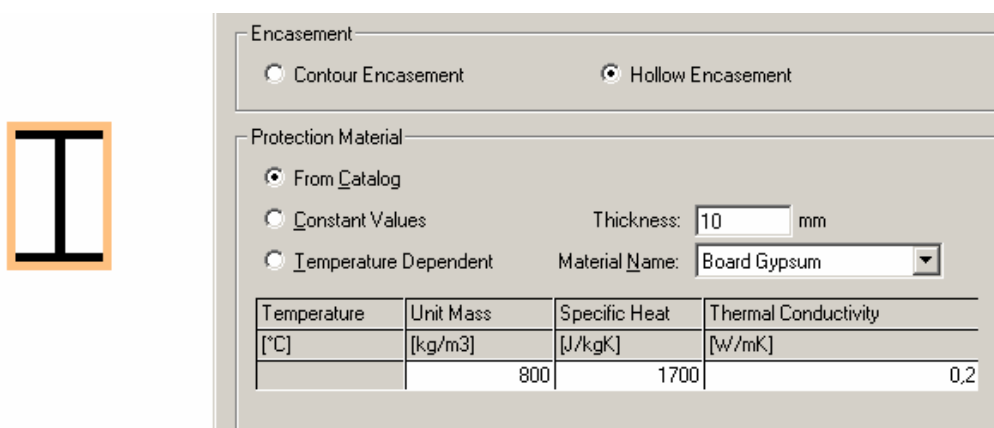
Slika 43: Tlačno obremenjen steber

Požarna obtežna kombinacija:  $\sum G_{K,j} + \psi_{1,1} Q_{K,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{K,i} + \sum A_{d(t)}$

$$F_{Ed,A} = 1,0 \cdot F_G + 0,7 \cdot F_Q = 350,9 + 0,7 \cdot 350,9 = 596,5 \text{ kN}$$

Na sliki 46 prikazuje modra krivulja prečni pomik na sredini nezaščitenega stebra. Opazimo, da pomik od 43 minute dalje strmo narašča, kar pomeni da se je stebec uklonil okoli svoje šibke osi.

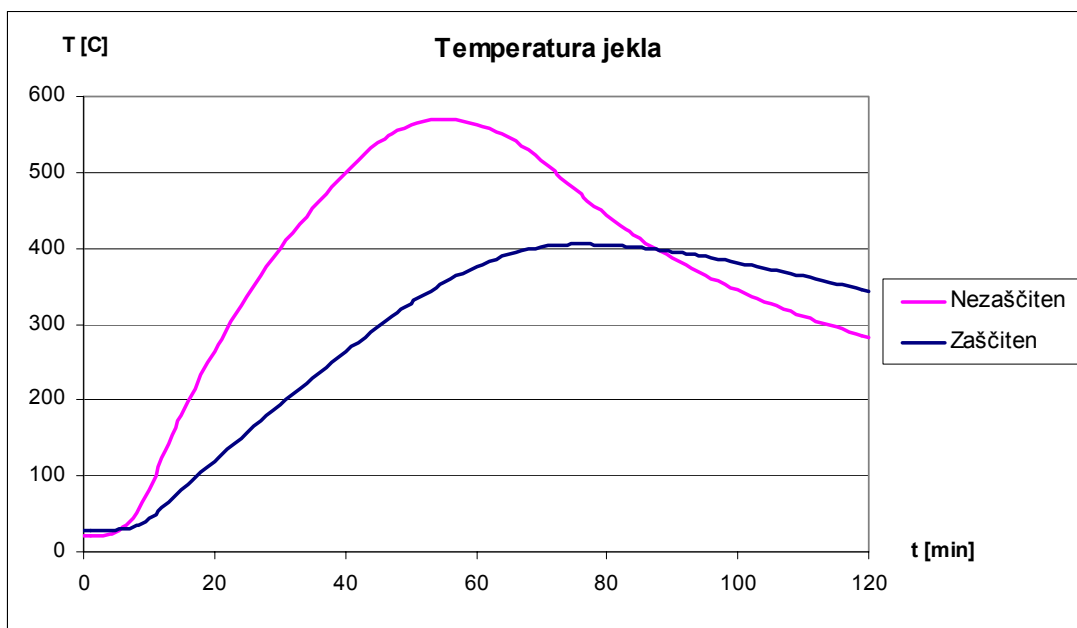
Ker omenjeni stebec ni sposoben prenesti podanega požara, ga je potrebno zaščititi! Izbrana zaščita je 10 mm debela mavčna plošča. Plošča je nameščena tako, da je I - profil z njo oblečen (slika 44).



**Slika 44: Izbrana zaščita za stebec HEB240 (program Ozone V2)**

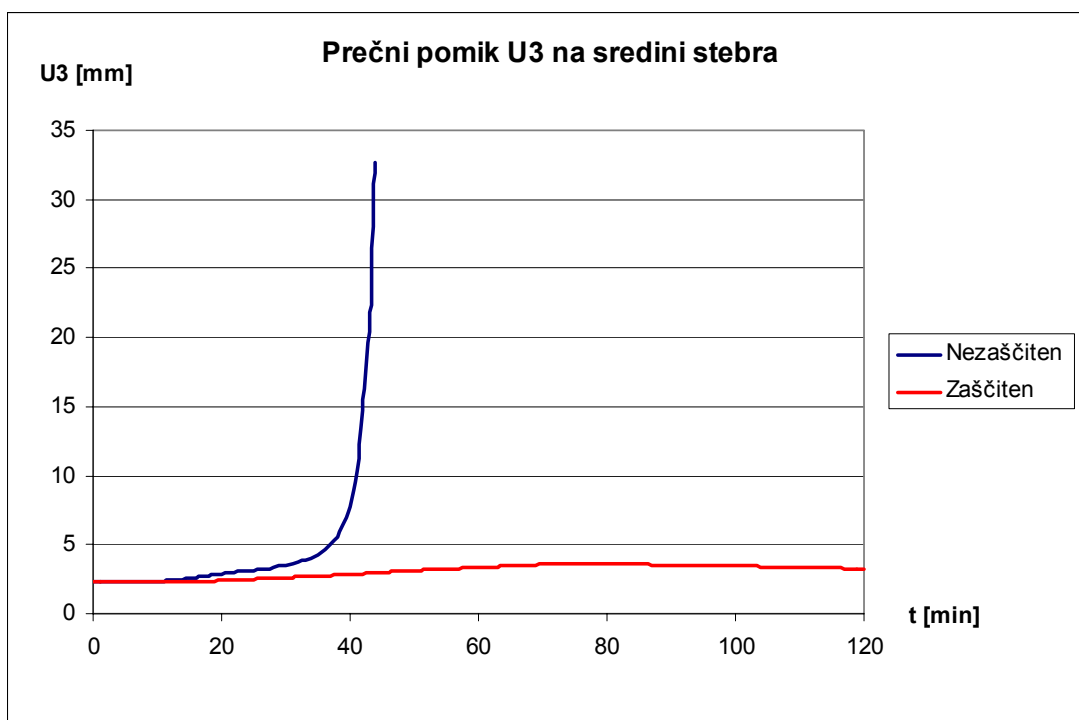
Spodnji krivulji na sliki 45 prikazujeta potek temperature v profilu HEB240 v odvisnosti od časa. Rdeča krivulja prikazuje temperaturo nezaščitenega profila, medtem ko modra prikazuje temperaturo v profilu HEB240, ki je obdan z 10 mm debelo mavčno ploščo! Razlika v maksimalni doseženi temperaturi med obema primeroma znaša 165 °C (nezaščiten profil:

$$T_{\max} = 570 \text{ °C, zaščiten profil: } T_{\max} = 405 \text{ °C}.$$



Slika 45: Primerjava temperatur jekla med zaščiten in nezaščitenim profilom

Rdeča krivulja prikazuje prečni pomik požarno zaščitenega stebra (slika 46).

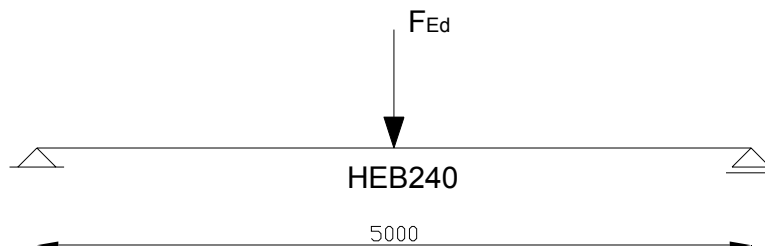


Slika 46: Prečni pomik pri zaščitenem in nezaščitenem stebri



#### 4.4.2 Upogibno obremenjen nosilec

Sledi požarna analiza upogibno obremenjenega nosilca (slika 47). Najprej je na podlagi znane stalne in spremenljive obtežbe izvedena analiza v mejnem stanju nosilnosti (MSN), kasneje pa še za požarno obtežno kombinacijo.



**Slika 47: Upogibno obremenjen nosilec**

$$F_G = F_Q = 56,1 \text{ kN}$$

MSN:

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot F_G + 1,5 \cdot F_Q = 1,35 \cdot 56,1 + 1,5 \cdot 56,1 = 160 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = F_{Ed} / 2 = 80 \text{ kN} \leq V_{Rd} = A_v f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0}) =$$

$$= 1,04 \cdot 24 \cdot 1,0 \cdot 23,5 / (\sqrt{3} \cdot 1,0) = 339 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \cdot 5 / 4 = 200 \text{ kNm}$$

$$M_{b,Rd} = \lambda_{LT} M_{pl,Rd} = 0,91 \cdot 247 = 225 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 200 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{M_{pl,Rd} / M_{CR}} = \sqrt{247 / 865} = 0,53 \rightarrow X_{LT} = 0,91$$

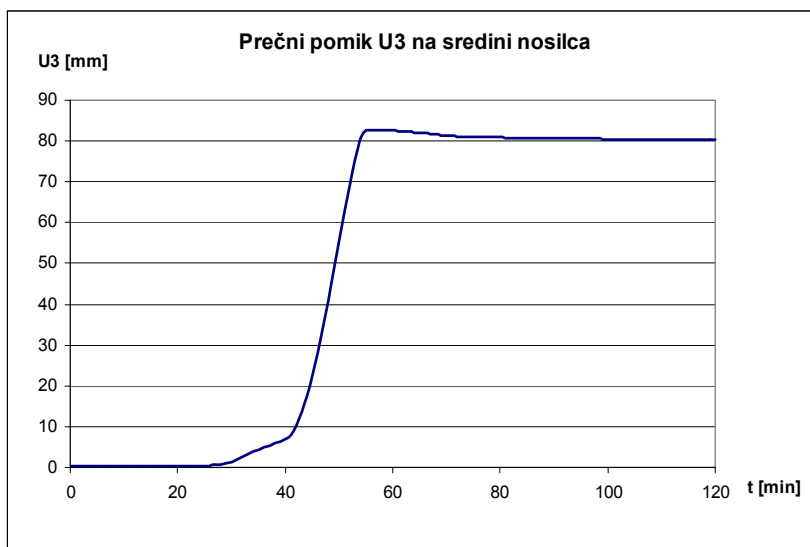
$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi}{k \cdot l} \cdot \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t \cdot \frac{\pi^2 \cdot E^2 \cdot I_w \cdot I_z}{(k_w \cdot l)^2}} =$$

$$= 1,365 \cdot \frac{\pi}{1 \cdot 500} \cdot \sqrt{21000 \cdot 3920 \cdot 8077 \cdot 103 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000^2 \cdot 486900 \cdot 3920}{(1 \cdot 500)^2}} = 865 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} = 1053 \cdot 23,5 / 1,0 = 247 \text{ kNm}$$

Požarna obtežna kombinacija:

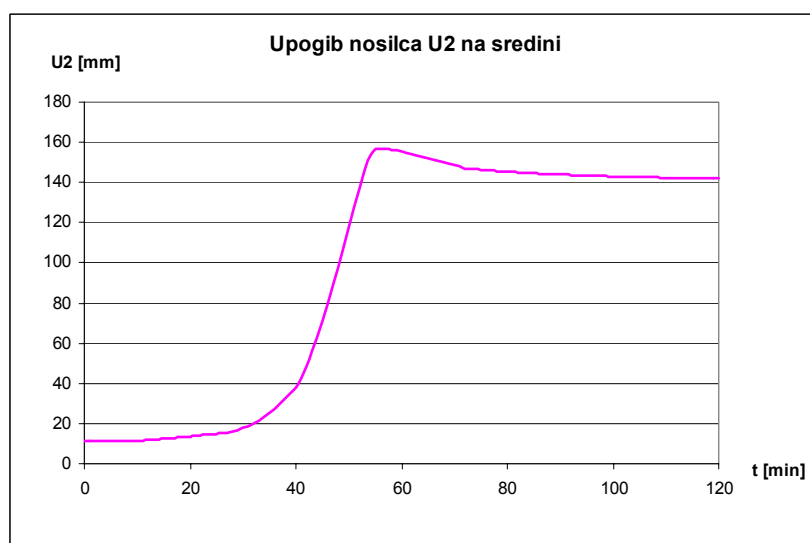
$$F_{Ed,A} = 1,0 \cdot F_G + 0,7 \cdot F_Q = 56,1 + 0,7 \cdot 56,1 = 95,4 \text{ kN}$$



**Slika 48: Prečni pomik na sredini prostoležečega nosilca**

Slika 48 prikazuje prečni pomik prostoležečega nosilca v smeri osi 3 (v smeri močne osi). Opazimo, da se pomik po 55 minutah za malenkost zmanjša, čeprav temperatura v nadaljevanju bistveno upade, kar kaže na dejstvo, da se pojavijo predvsem nepovratne plastične deformacije!

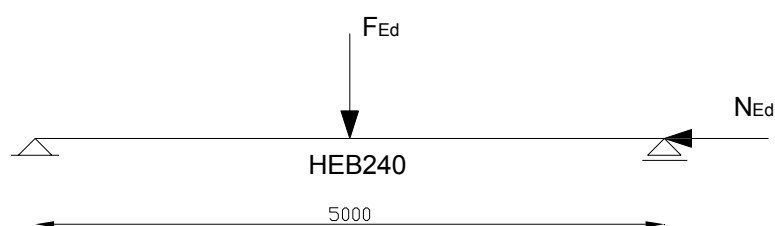
Slika 49 prikazuje upogib nosilca na sredini razpona. Maksimalni upogib znaša približno 156 mm pri času 55 minut in temperaturi 570 °C. Upogibno obremenjeni nosilec je torej sposoben prenesti požarno obtežbo v podanih okoliščinah.



**Slika 49: Upogib na sredini prostoležečega nosilca**

### 4.4.3 Upogibno in tlačno obremenjen nosilec

V zadnjem od treh osnovnih primerov je izvedena še požarna analiza za upogibno in tlačno obremenjen prostoležeči nosilec (slika 50). Najprej je na podlagi znane stalne in spremenljive obtežbe izvedena analiza v mejnem stanju nosilnosti (MSN), kasneje pa še za požarno obtežno kombinacijo.



**Slika 50: Upogibno in tlačno obremenjen nosilec**

$$F_G = F_Q = 35,1 \text{ kN}$$

$$N_G = N_Q = 175,4 \text{ kN}$$

$$e_0^I = L / 200 = 2,5 \text{ cm ... uklon okoli močne osi}$$

$$e_0^{II} = k ( L / 150 ) = 0,5 \cdot 3,33 \text{ cm} = 1,67 \text{ cm ... bočna zvrnitev}$$

#### MSN:

$$F_{Ed} = 1,35 \cdot F_G + 1,5 \cdot F_Q = 1,35 \cdot 35,1 + 1,5 \cdot 35,1 = 100 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 1,35 \cdot N_G + 1,5 \cdot N_Q = 1,35 \cdot 175,4 + 1,5 \cdot 175,4 = 500 \text{ kN}$$

- uklon okoli šibke osi:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} = 0,61 \cdot 106 \cdot 23,5 / 1,0 = 1520 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 500 / ( 6,08 \cdot 93,9 ) = 0,88 \rightarrow \chi^c = 0,61$$

- bočna zvrnitev:

$$M_{Ed} = 100 \cdot 5 / 4 = 125 \text{ kNm} \leq M_{b,Rd} = 0,91 \cdot 247 = 225 \text{ kNm}$$

- nosilnost tlačno in upogibno obremenjenega elementa:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$$\frac{500}{0,61 \cdot 106 \cdot 23,5/1,0} + \frac{0,99 \cdot 12500}{0,91 \cdot 1053 \cdot 23,5/1,0} = 0,88 \leq 1,0$$

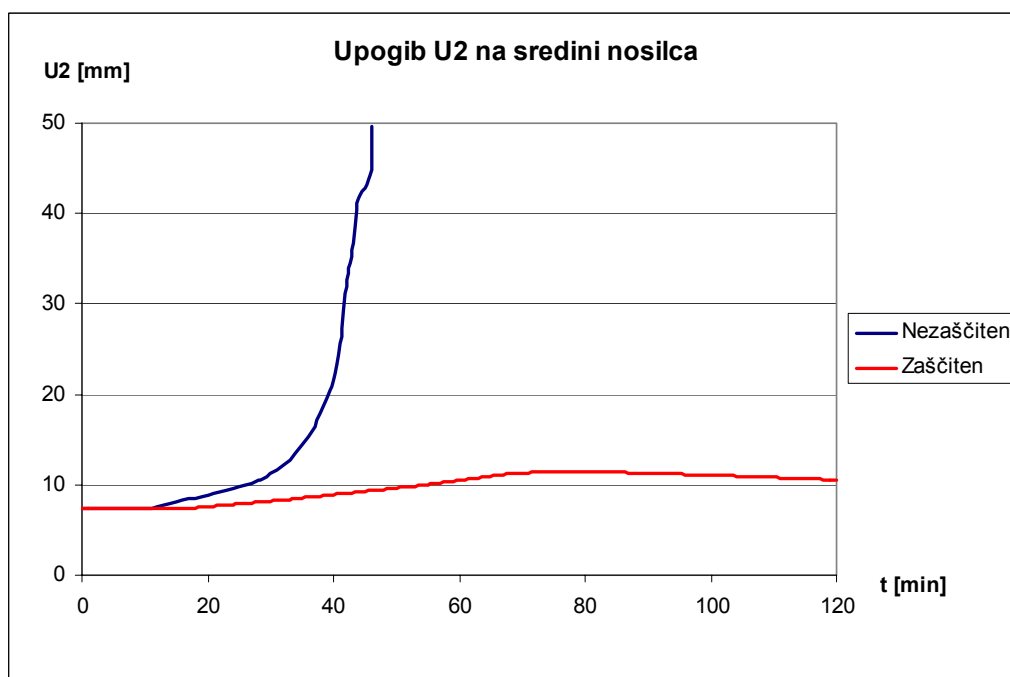
Požarna obtežna kombinacija:

$$F_{Ed,A} = 1,0 \cdot F_G + 0,7 \cdot F_Q = 35,1 + 0,7 \cdot 35,1 = 59,7 \text{ kN}$$

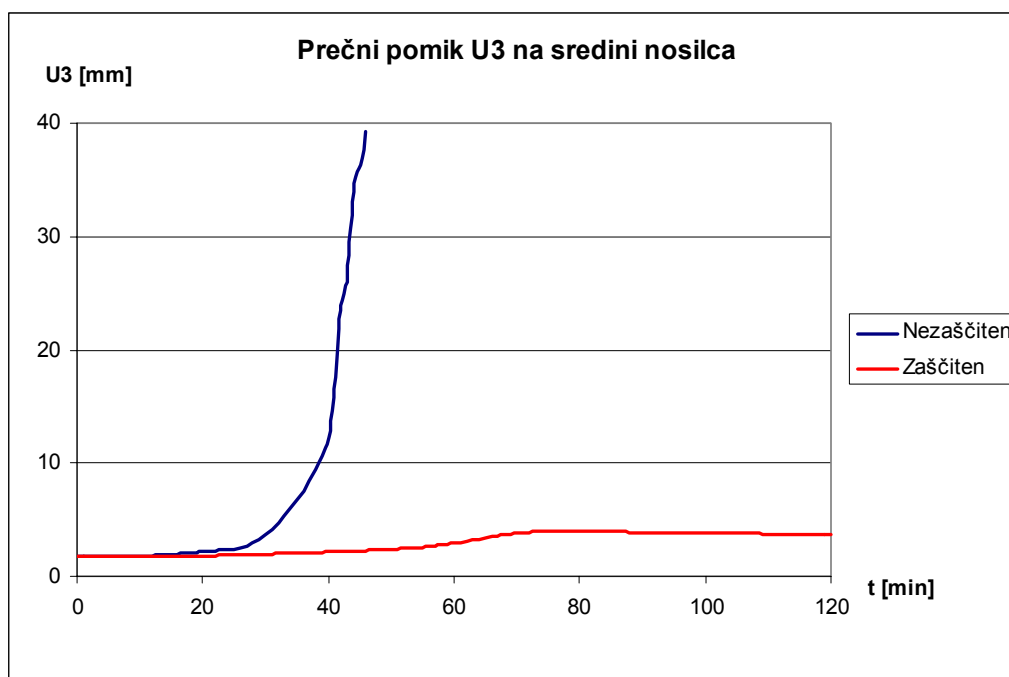
$$N_{Ed,A} = 1,0 \cdot N_G + 0,7 \cdot N_Q = 175,4 + 0,7 \cdot 175,4 = 298,2 \text{ kN}$$

Na spodnjih dveh slikah (sliki 51 in 52) prikazujeta modri krivulji prečni pomik in upogib prostoležečega nezaščitenega nosilca na sredini razpona. Opazimo, da po 43 minutah požara pomiki strmo narastejo, kar pomeni, da nosilec ni sposoben prevzeti podane požarne obtežbe in se ukloni!

Zato je potrebno nosilec v nadaljevanju protipožarno zaščititi, kar pripelje do dejstva, da so prečni pomiki in upogibi precej manjši (rdeči krivulji na slikah 51 in 52). Zaščiten je na enak način kot steber pri 4.4.1, t.j. z 10 mm debelo mavčno ploščo!



**Slika 51: Upogib na sredini nezaščitenega in zaščitenega prostoležečega nosilca**



Slika 52: Prečni pomik na sredini nezaščitenega in zaščitenega prostoležečega nosilca

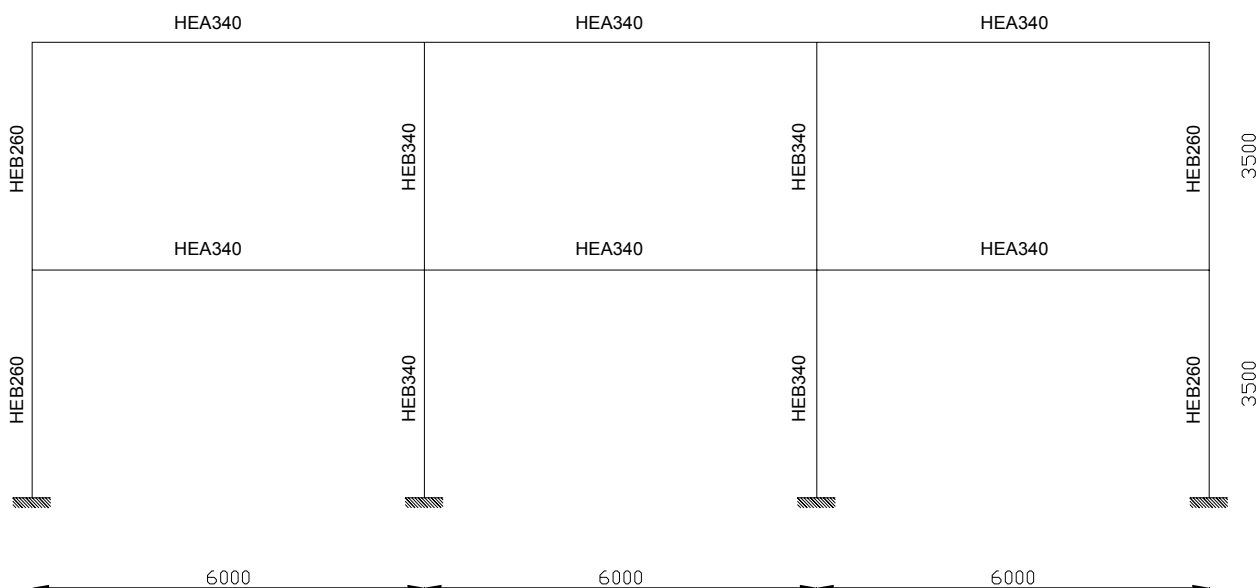
#### 4.5 Požarna analiza pomičnega (okvir 1) in nepomičnega (okvir 2) okvira

Požarna analiza obeh okvirov je zajemala dva različna naravna požara (v trgovini in v bolnišnici) z izbranimi požarnimi sektorji. Pri izhodiščni varianti je predpostavljeno, da so vsi nosilni elementi požarno nezaščiteni! Vsakemu nosilnemu elementu (steber HEB340, steber HEB260, nosilec HEA340) se poda ustrezna temperatura profila v odvisnosti od časa. Pri obeh okvirih je predpostavljeno ravninsko obnašanje.

##### 4.5.1 Pomični okvir (okvir 1)

Pomični okvir je bil analiziran v mejnem stanju nosilnosti (MSN), mejnem stanju uporabnosti (MSU) in potresno! Glede na dobljeno obremenitev so bili izbrani sledeči profili (slika 53):

- notranji stebri: **HEB340**
- zunanji stebri: **HEB260**
- nosilci: **HEA340**

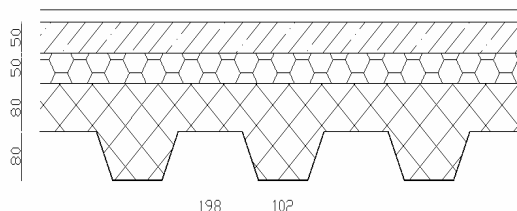


**Slika 53: Profili na pomičnem okviru**

Upoštevana je bila sledeča obtežba:

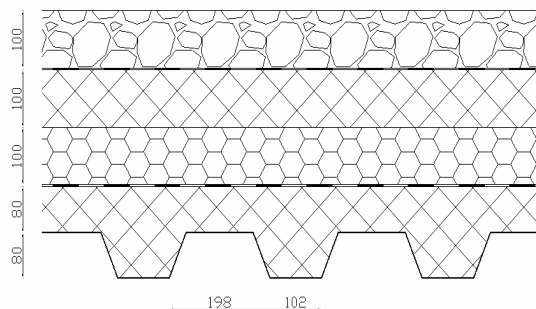
a) lastna in stalna obtežba:

- lastna teža nosilnih elementov
- stalna obtežba v medetaži:  $g = 5,5 \text{ kN/m}^2$  (slika 54)
  - zaključni sloj
  - cem. arm. estrih – 5cm
  - TI – 5cm
  - sovprežna plošča – 16cm
  - pločevina – 1.1 mm ( Multideck 80-V2 )
- stalna obtežba na strehi:  $g_s = 7,9 \text{ kN/m}^2$  (slika 55)



**Slika 54: Medetažna konstrukcija**

- nasutje – 10cm
- HI
- naklonski beton – 10cm
- TI – 10cm
- parna zapora
- sovprežna plošča – 16cm
- pločevina – 1.1mm (Multideck 80-V2)



**Slika 55: Strešna konstrukcija**

b) spremenljiva obtežba:

- koristna obtežba (trgovina):  $q = q_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$
- sneg (cona C):  $q_s = 1,6 \text{ kN/m}^2$
- veter (koncentrirani sili v višini vsake etaže):  $W_1 = 14,8 \text{ kN}$  ;  $W_s = 7,4 \text{ kN}$

c) potres:

- metoda nadomestnih horizontalnih sil:  $F_1 = 48,3 \text{ kN}$  ;  $F_2 = 123,0 \text{ kN}$

Predpostavljeno je, da so okvirji med seboj oddaljeni za 6 metrov, zato je površinska obtežba pomnožena še s to širino, ter tako prevedena na linijsko obtežbo za okvir!

Pri obravnavanem okviru je pri analizi v MSN upoštevana začetna globalna geometrijska nepopolnost  $\Phi = 1/275$ . V skladu z EN1993-1-1 (5.3.2(6)) se lokalne nepopolnosti pri računu notranjih sil po TDR lahko zanemarijo, v kolikor za posamezen element velja enačba:

$$\bar{\lambda} < 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} \quad (5)$$

- steber HEB340:

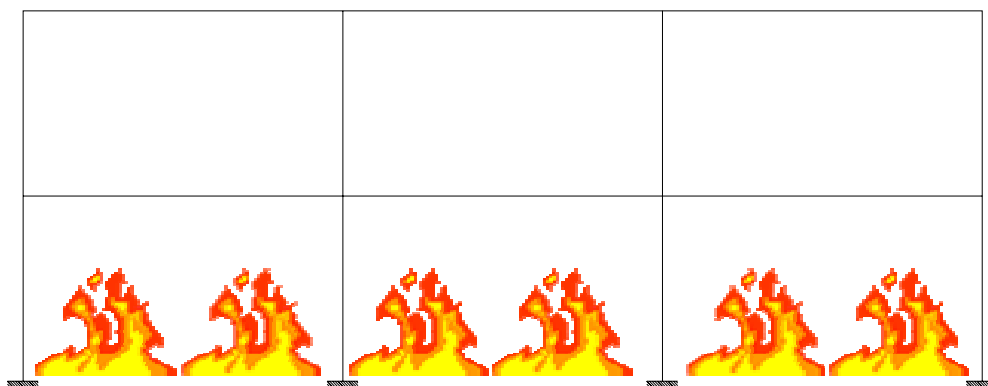
$$\bar{\lambda}_y = \frac{24}{93,9} = 0,26 \leq 0,5 \sqrt{\frac{171 \cdot 23,5}{1030}} = 0,99$$

- steber HEB260:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{31,3}{93,9} = 0,33 \leq 0,5 \sqrt{\frac{118 \cdot 23,5}{463}} = 1,22$$

Pri požarni analizi s programom Abaqus 6.6, so poleg predpisanih globalnih upoštewane še minimalne lokalne (ločne) nepopolnosti (stebri:  $e_0 = L/500$ , nosilci:  $e_0 = L/1000$  v kolikor niso bočno podprti)! Pri požarni analizi je upoštevana TDR, nelinearen odziv jekla S235 pri različnih temperaturah ter geometrijske nepopolnosti!

Za določitev temperatur v posameznih profilih je potrebna analiza s programom Ozone. Določiti je potrebno dimenzije požarnega sektorja, konstrukcijske sklope požarnega sektorja, velikost odprtin, namembnost prostora, gorljivo površino ter aktivne ukrepe za preprečitev požara, ki zmanjšujejo požarno obtežbo oz. jakost požara!

**Požarni sektor: 18m x 10m****Slika 56: Požar v spodnji etaži**

V izbranem požarnem scenariju je predvideno, da požar izbruhne samo v spodnji etaži (slika 56).

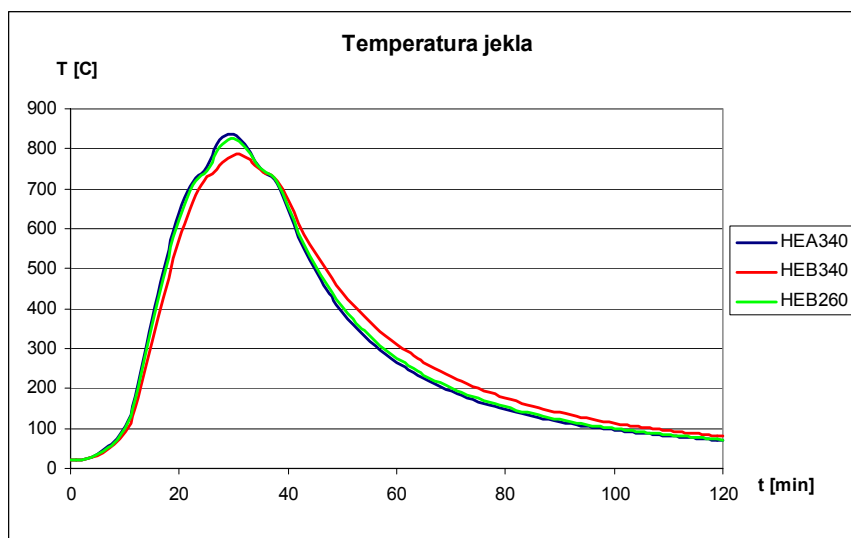
**a) Trgovina: gorljiva površina 145 m<sup>2</sup>**

Aktivni ukrepi:

- avtomatsko zaznavanje požara s toploto
- šprinklerji
- zunanje gasilske enote
- varne dostopne poti
- prisotnost naprav za ročno gašenje požara
- sistem za odvajanje dima

Spodnje krivulje na sliki 57 prikazujejo potek temperature v različnih profilih v odvisnosti od časa za požarni sektor v **trgovini**. Na začetku lahko opazimo nekaj nižje temperature pri profilu HEB340, kar je povsem razumljivo, saj je to najmasivnejši profil med izbranimi za okvir 1.



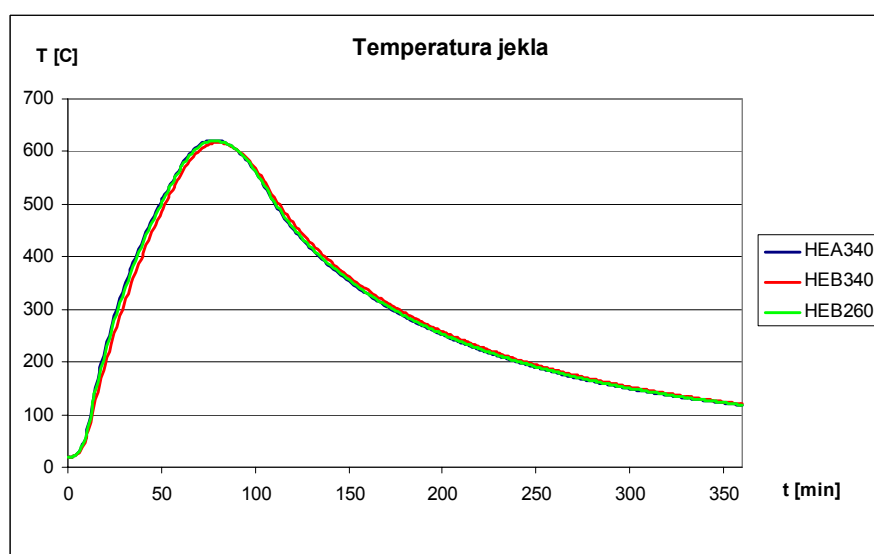


Slika 57: Temperatura različnih profilov v okviru 1 pri požaru v trgovini

**b) Bolnišnica:** gorljiva površina 105 m<sup>2</sup>

Aktivni ukrepi:

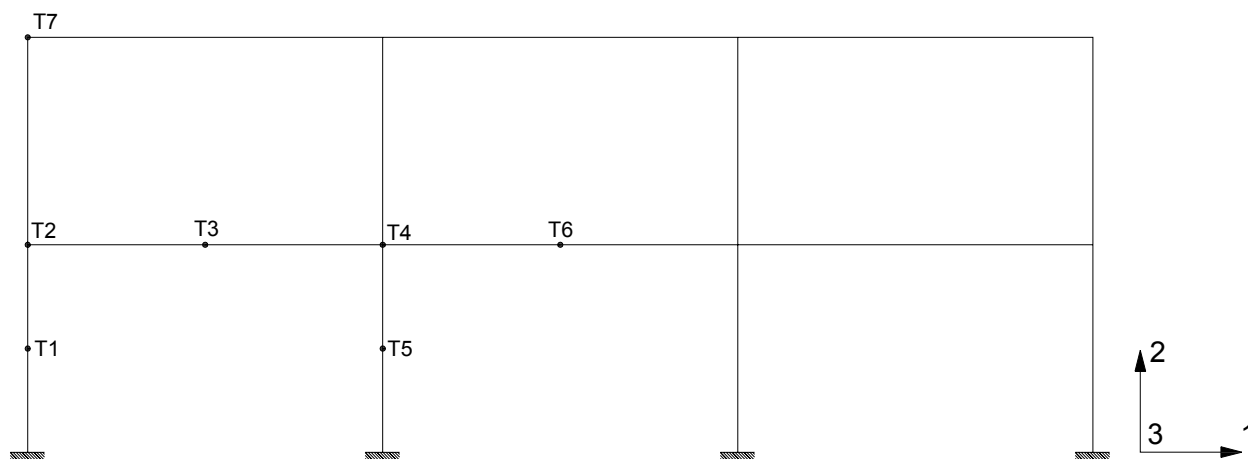
- avtomatsko zaznavanje požara s toploto
- zunanje gasilske enote
- varne dostopne poti
- naprave za ročno gašenje požara
- sistem odvajanja dima



Slika 58: Temperatura različnih profilov v okviru 1 pri požaru v bolnišnici

Zgornje krivulje na sliki 58 prikazuje potek temperature v različnih profilih v odvisnosti od časa za požarni sektor v **bolnišnici**.

Pri požarni analizi pomičnega okvira se opazujejo pomiki karakterističnih točk, ki so označene na sliki 59.



Slika 59: Pozicije opazovanih točk pri okviru 1

Požarna obtežna kombinacija:  $\sum G_{K,j} + \psi_{1,1} Q_{K,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{K,i} + \sum A_{d(t)}$

Požarna obtežna kombinacija za okvir 1:  $(g+g_s) + 0,7q$

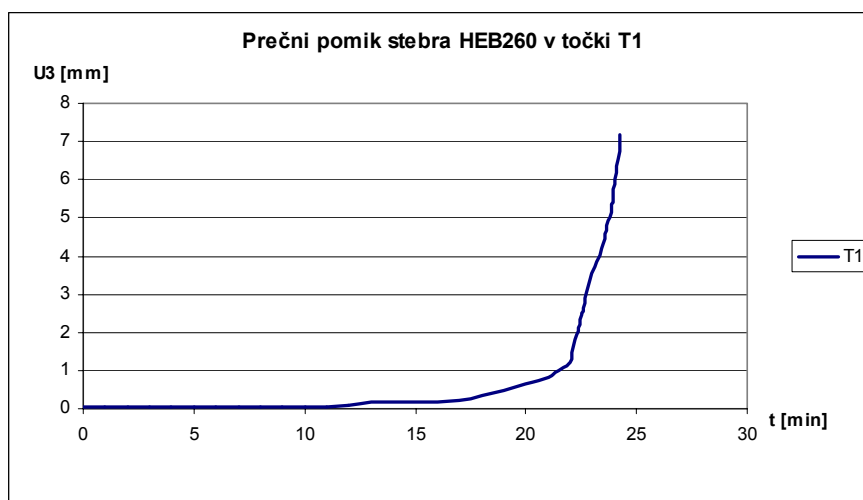
V nadaljevanju so prikazani rezultati požarne analize s programom Abaqus. Prikazani so pomiki v karakterističnih točkah na okviru 1. Predvideno je, da so nosilci bočno podprti! Pomiki so podani glede na osi globalnega koordinatnega sistema označenega na sliki 37!

#### 4.5.1.1 Požarna analiza okvira 1 s programom Abaqus za požar v trgovini

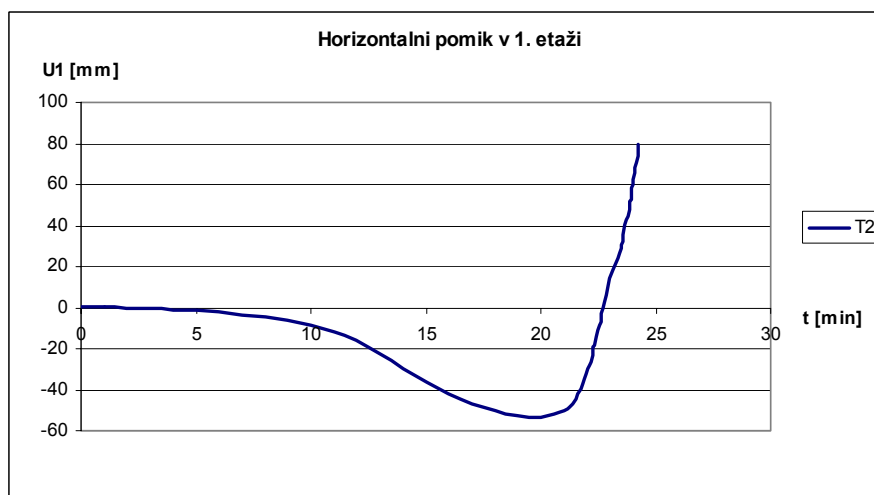
Požarna analiza pri požaru v trgovini je bila izvedena za dve urni požar.

a) **Nezaščiten okvir**: upoštevano je segrevanje elementov iz vseh štirih strani, tudi pri nosilcih

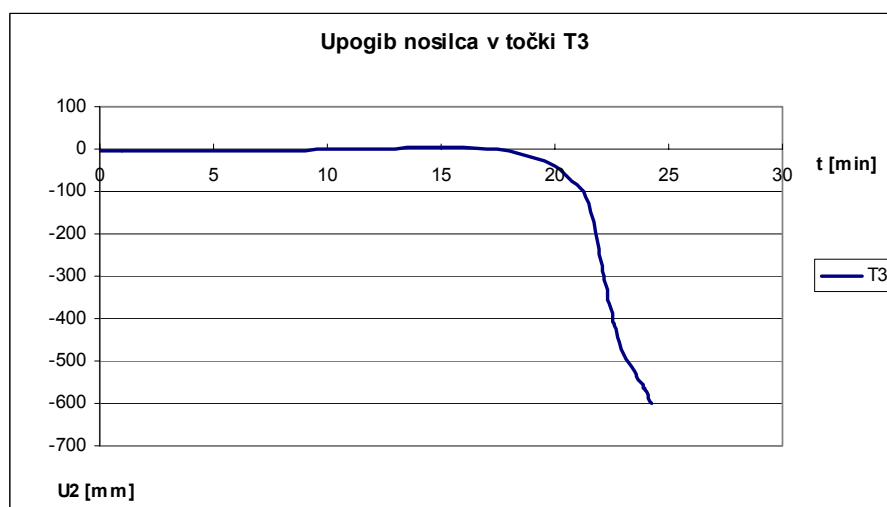
Od slike 60 pa do slike 65 so izrisani pomiki v odvisnosti od časa za protipožarno nezaščiten okvir 1.



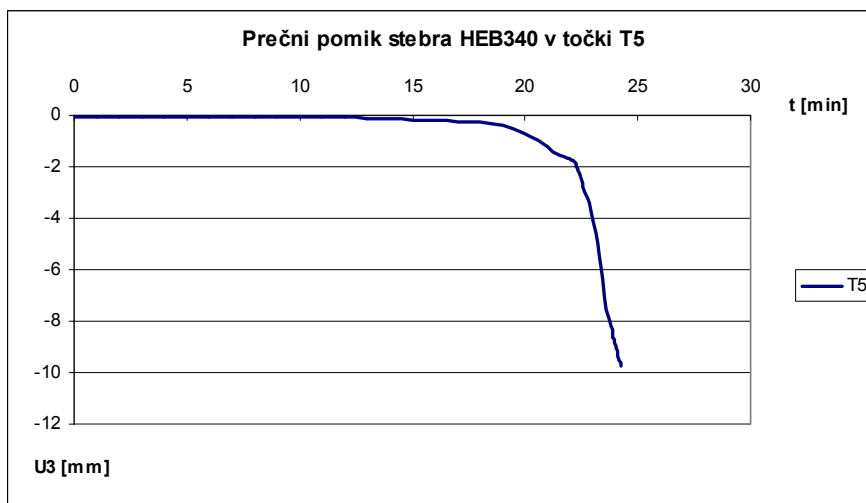
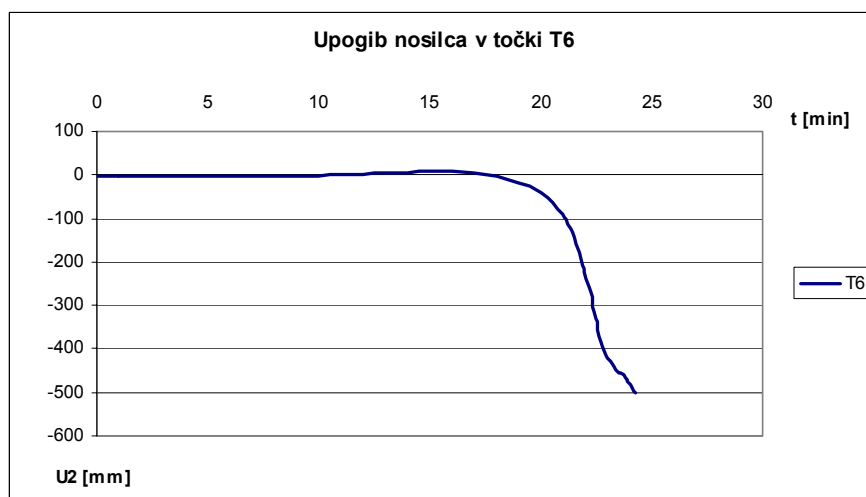
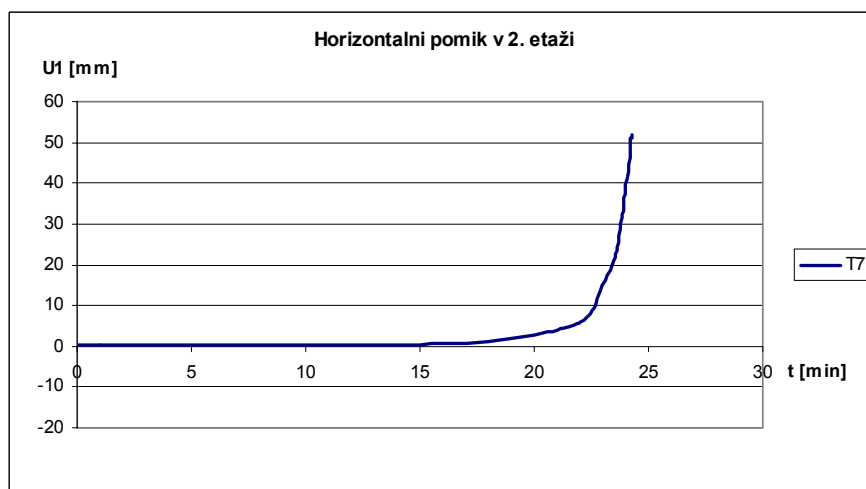
Slika 60: Pomik U3 na mestu T1



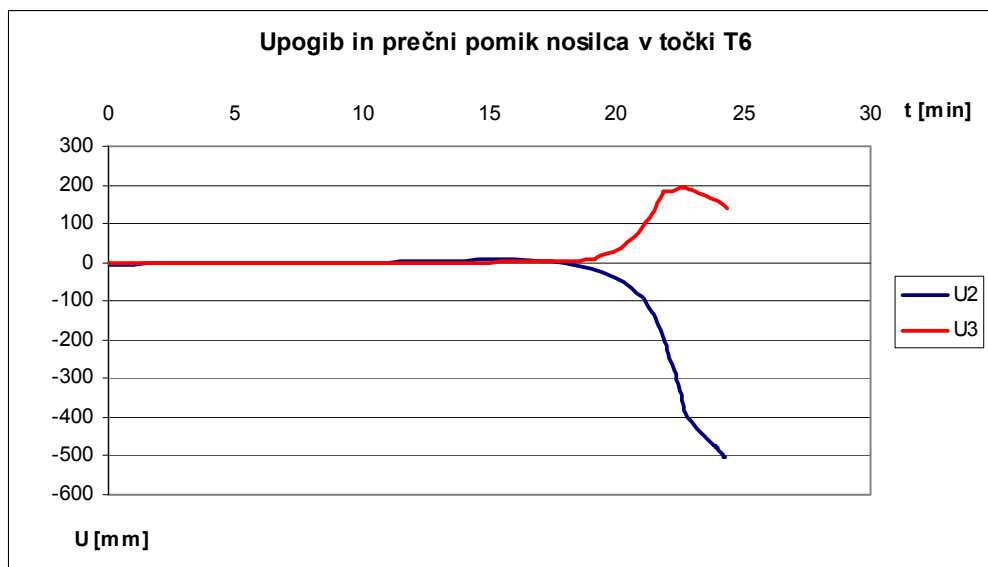
Slika 61: Pomik U1 na mestu T2



Slika 62: Upogib U2 na mestu T3

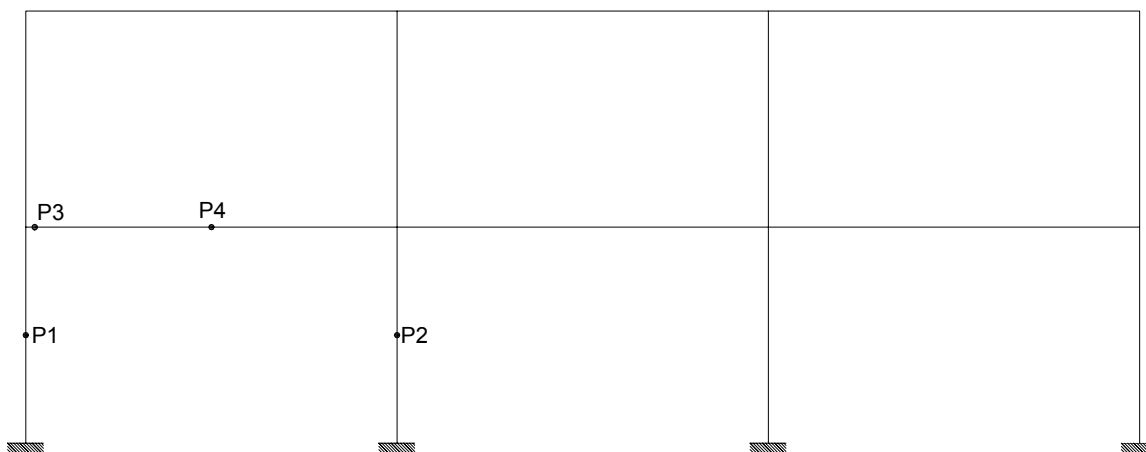
Slika 63: Pomik  $U3$  na mestu T5Slika 64: Upogib  $U2$  na mestu T6Slika 65: Pomik  $U1$  na mestu T7

V primeru, da nosilci niso bočno podprti, so rezultati skoraj identični, le da so poleg omenjenih pomikov prisotni še prečni pomiki v nosilcih! Na sliki 66 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T6, ko nosilci niso bočno podprti.



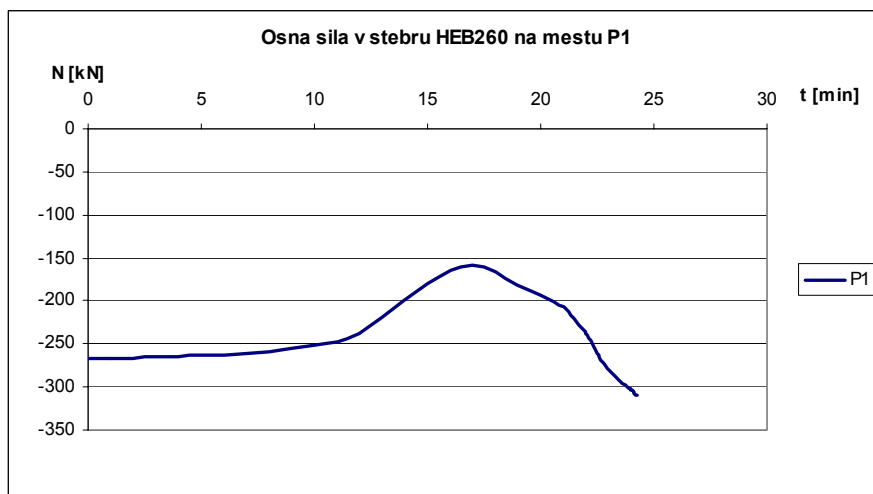
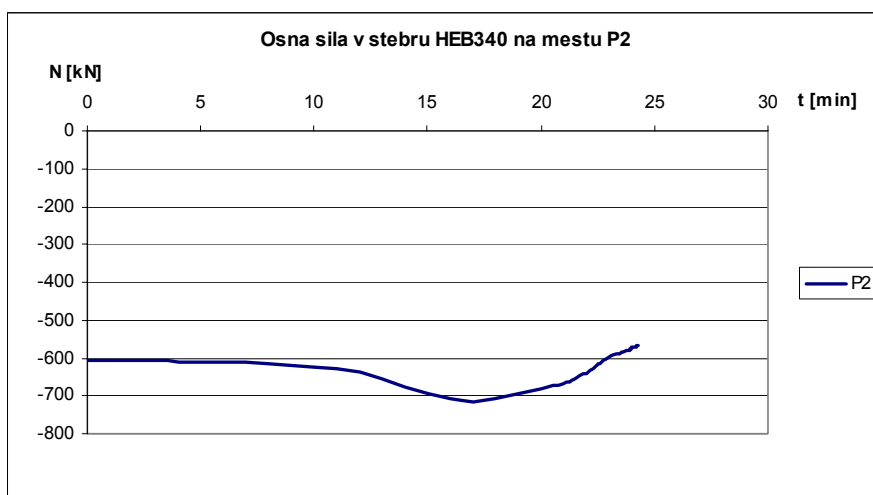
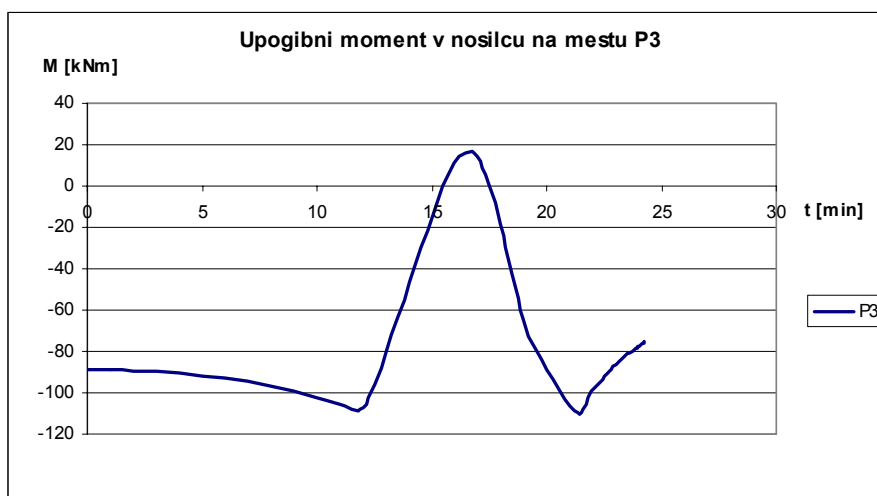
**Slika 66: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti**

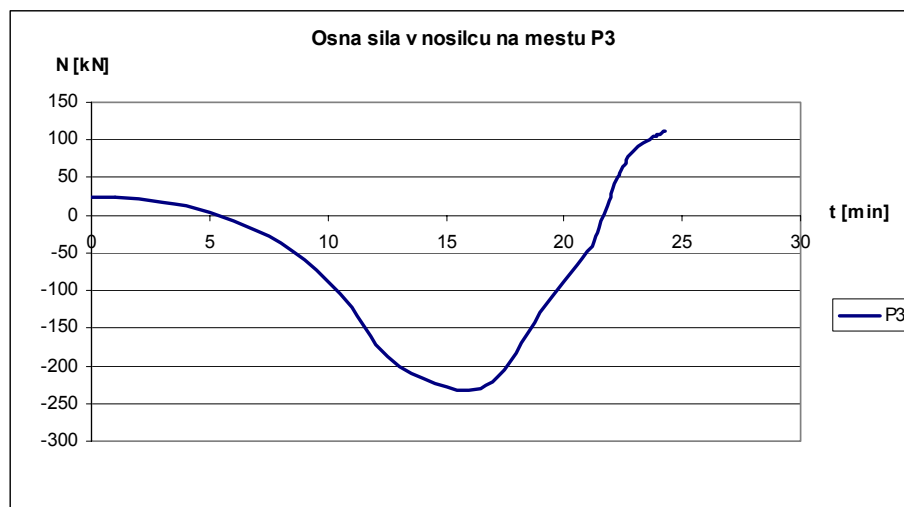
Naslednje slike prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa. Notranje sile so bile preverjene na izbranih mestih, ki so označeni na sliki 67!



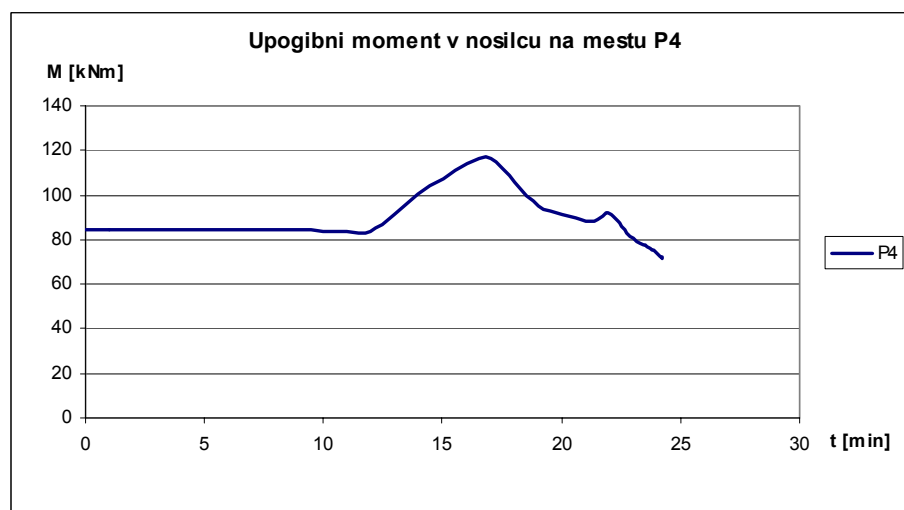
**Slika 67: Pozicije opazovanih notranjih sil v konstrukcijskih elementih**

Od slike 68 pa do slike 72 so prikazani poteki notranjih sil (osne sile in upogibni momenti) v neizoliranih elementih za požar v trgovini.

Slika 68: Osna sila  $N$  na mestu P1Slika 69: Osna sila  $N$  na mestu P2Slika 70: Upogibni moment  $M$  na mestu P3

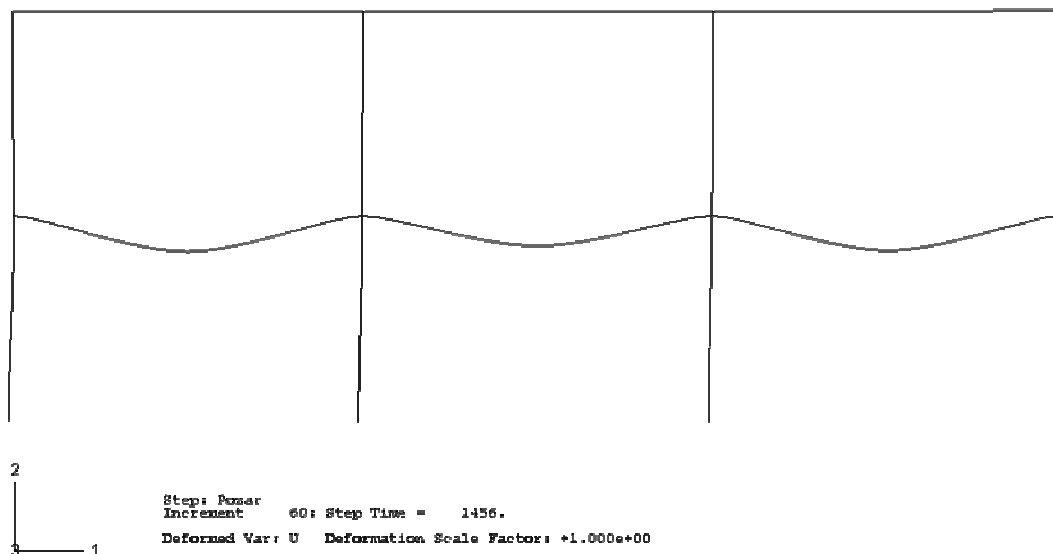


**Slika 71: Osna sila N na mestu P3**



**Slika 72: Upogibni moment M na mestu P4**

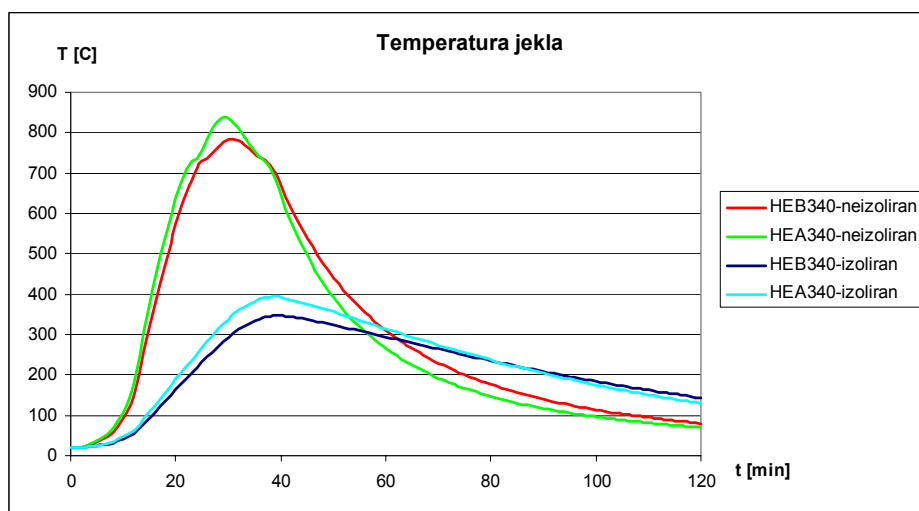
Slika 73 prikazuje deformiran okvir 1 pri času  $t = 24\text{min}$  in 16s. Pri tem času se analiza v Abaqusu 6.6 ustavi, saj je prekoračena nosilnost v srednjem stebru (HEB340) v pritličju. Program ne najde rešitve, ki bi lahko konvergirala, saj je prirastek deformacij v zadnjem inkrementu prevelik in je vrednost togostne matrike enaka 0. Maksimalna dosežena temperatura v nosilnih elementih (HEA340) znaša  $742\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 73: Deformirana oblika neizoliranega pomičnega okvira pri času  $t = 24\text{min } 16\text{s}$

V naslednjem koraku sta izolirana samo stebra HEB340 v spodnji etaži z 10 mm debelo mavčno ploščo v obliki škatlastega profila! Potem okvir prenese požar do časa  $t = 24\text{min}$  in 42s. Pri tem času namreč pride do prekoračitve nosilnosti na prečkah HEA340. Maksimalna dosežena temperatura v nosilnih elementih (HEA340) znaša  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

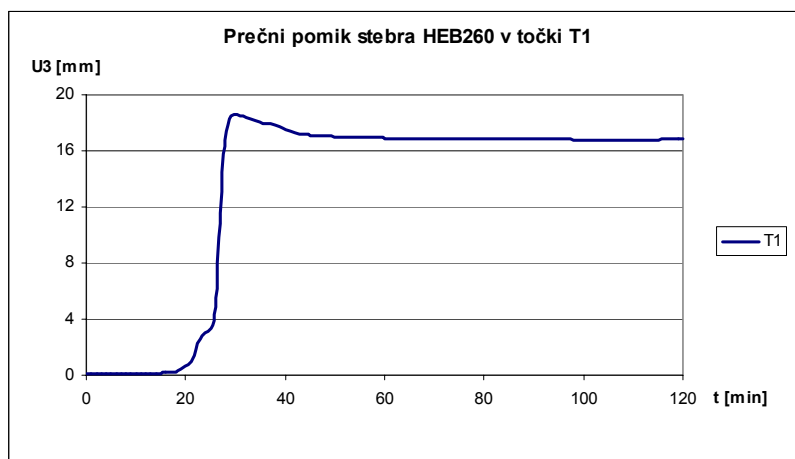
b) **Zaščiten okvir:** v zadnjem koraku sta zaščiteni oba notranja stebra HEB340 v spodnji etaži in prečke HEA340 z 10 mm debelo mavčno ploščo, zunanja stebra pa ostaneta nezaščiteni.



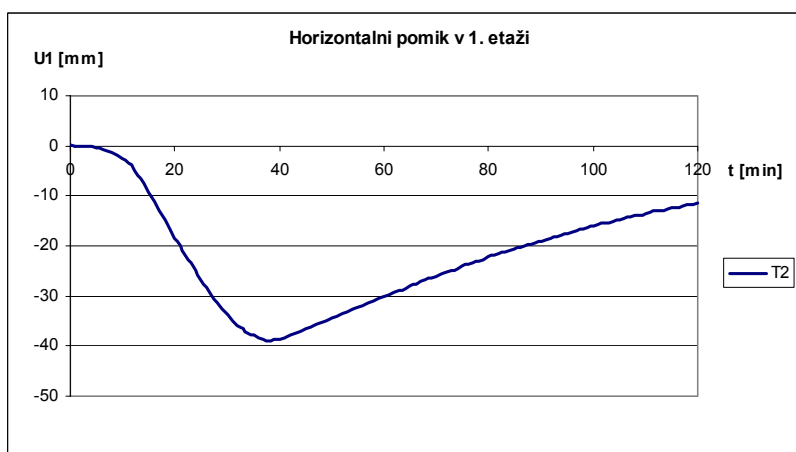
Slika 74: Potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih profilih v trgovini



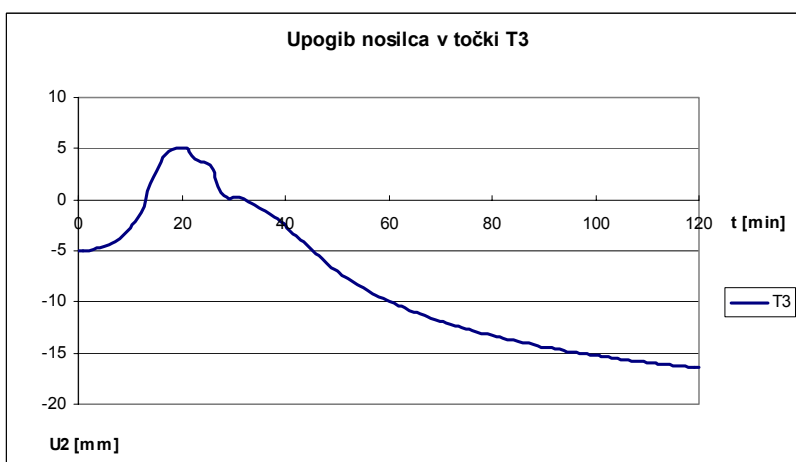
Slika 74 prikazuje potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih nosilnih elementih. Slike od 75 do 80 prikazujejo pomike v karakterističnih točkah pri požarno zaščitenem okviru 1.



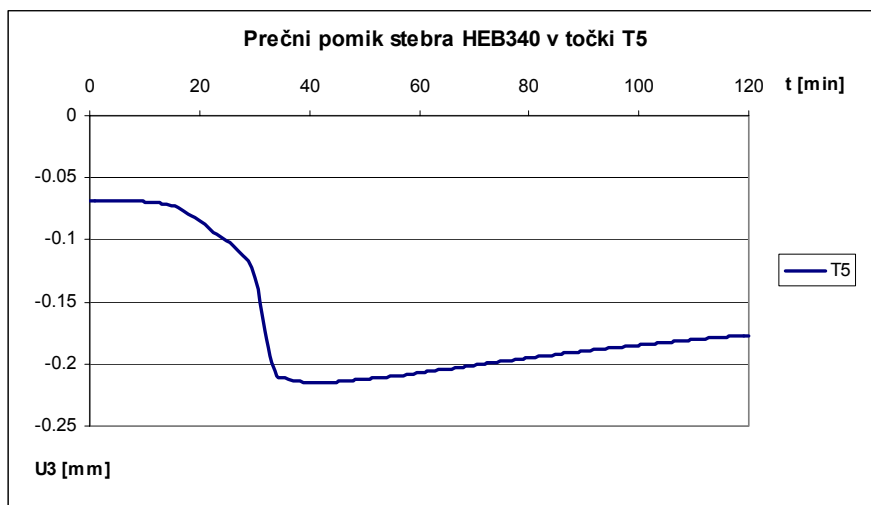
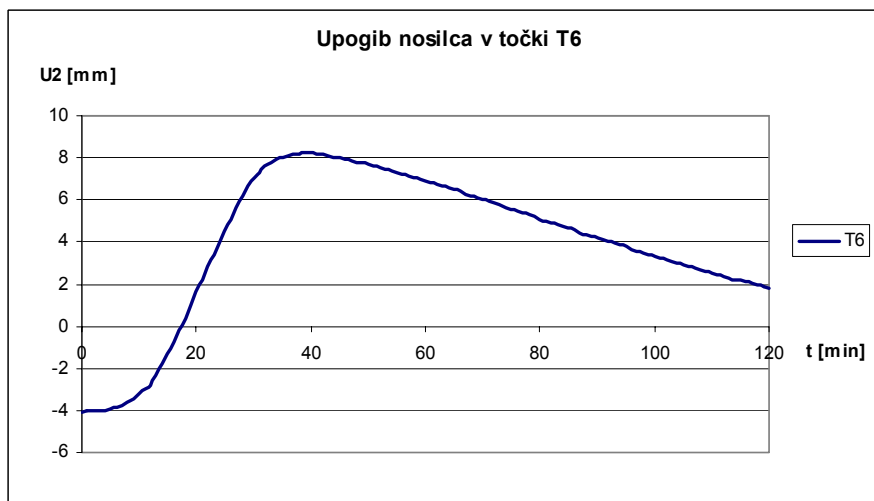
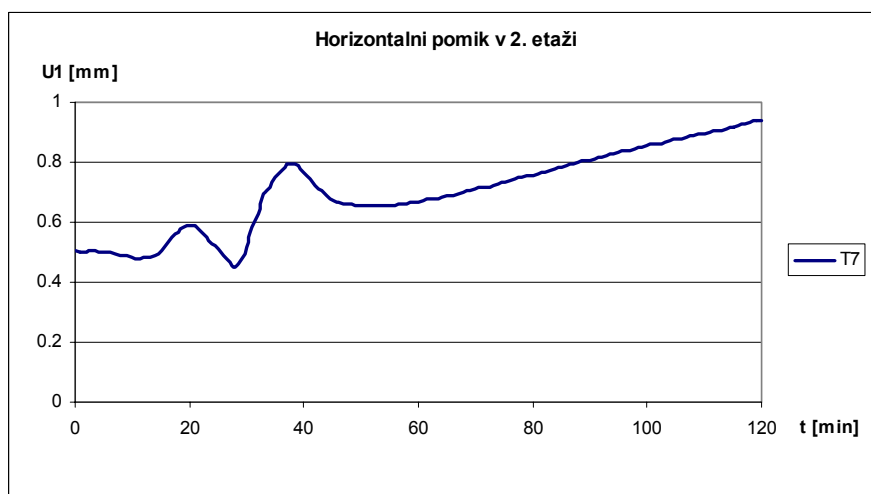
**Slika 75: Pomik U3 na mestu T1**



**Slika 76: Pomik U1 na mestu T2**

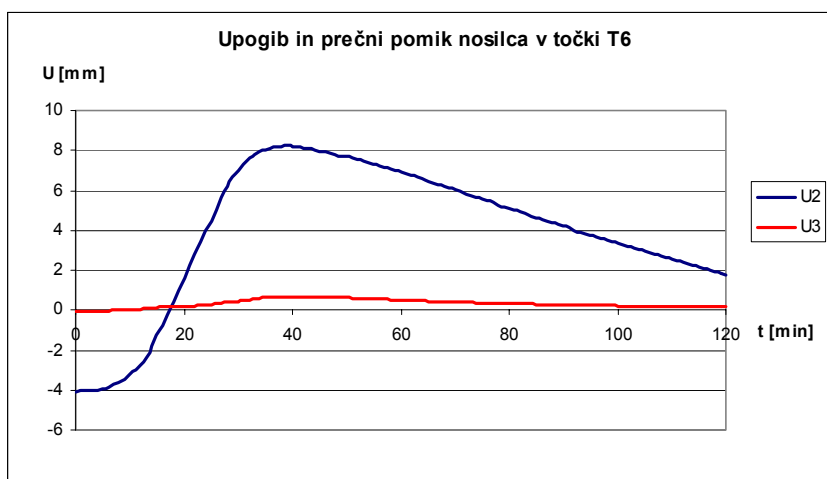


**Slika 77: Upogib U2 na mestu T3**

Slika 78: Pomik  $U3$  na mestu T5Slika 79: Upogib  $U2$  na mestu T6Slika 80: Pomik  $U1$  na mestu T7

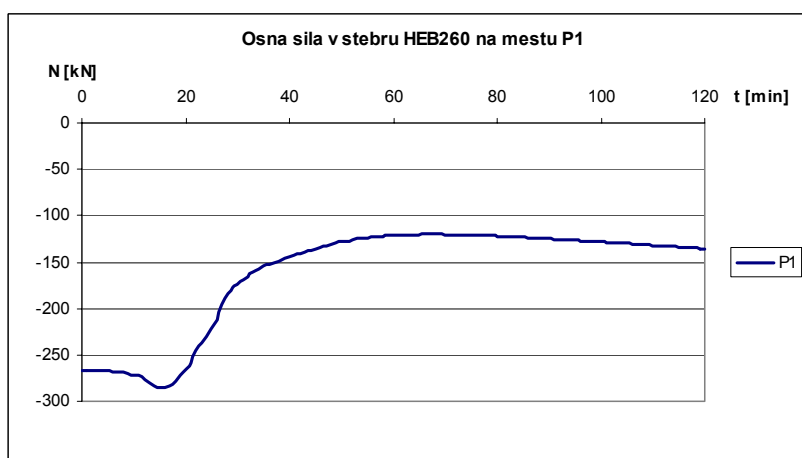
Prečni pomiki v stebrih HEB340 so bistveno manjši, saj so le ti zaščiteni pred požarom in je zato temperatura v njih samih bistveno nižja, kar pomeni da je nosilnost in odpornost teh elementov tudi bistveno večja! Upogibi nosilca v polju jasno prikazujejo, kako se nosilec za določeno vrednost na začetku upogne v smeri obtežbe, nato pa sledi pomik nosilca v nasprotni smeri, saj se le ta zaradi segrevanja stebrov dvigne! V nadaljevanju pa zopet prevlada upogibna obtežba, ki prečko deformira v smeri njenega delovanja!

Na sliki 81 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T6, ko nosilci niso bočno podprti.

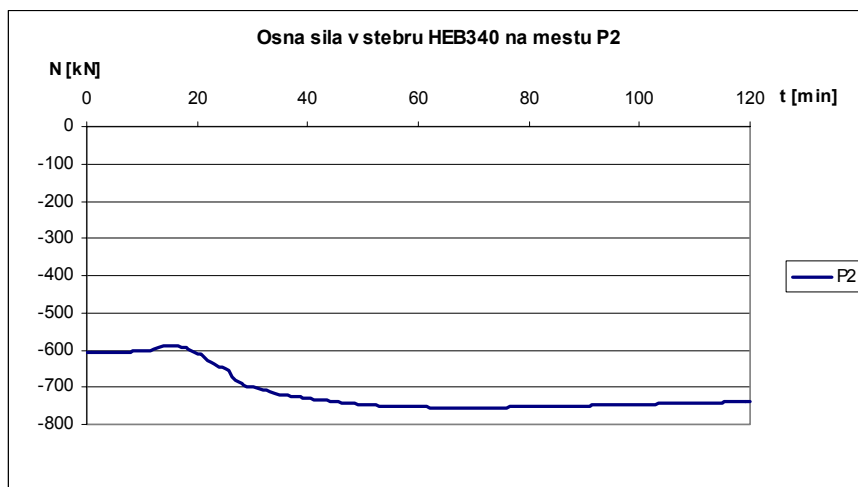
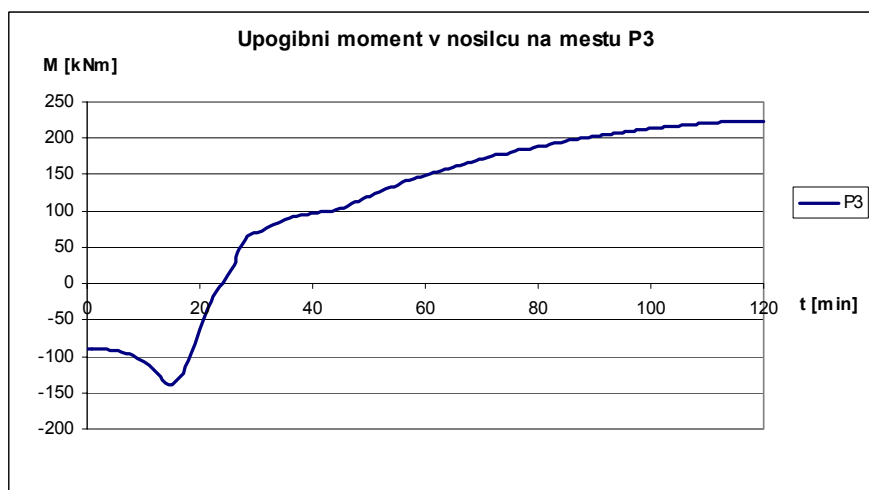
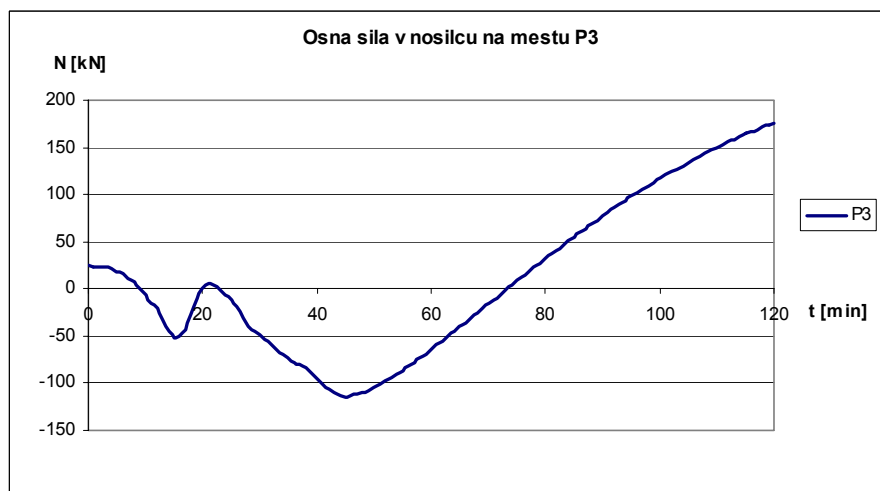


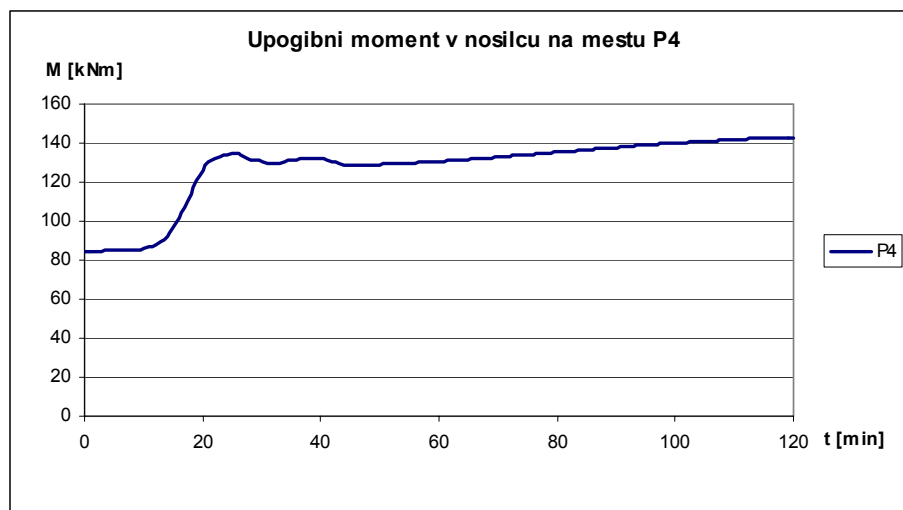
**Slika 81: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti**

V nadaljevanju so prikazane slike od 82 do 86, ki prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa za izoliran okvir 1.



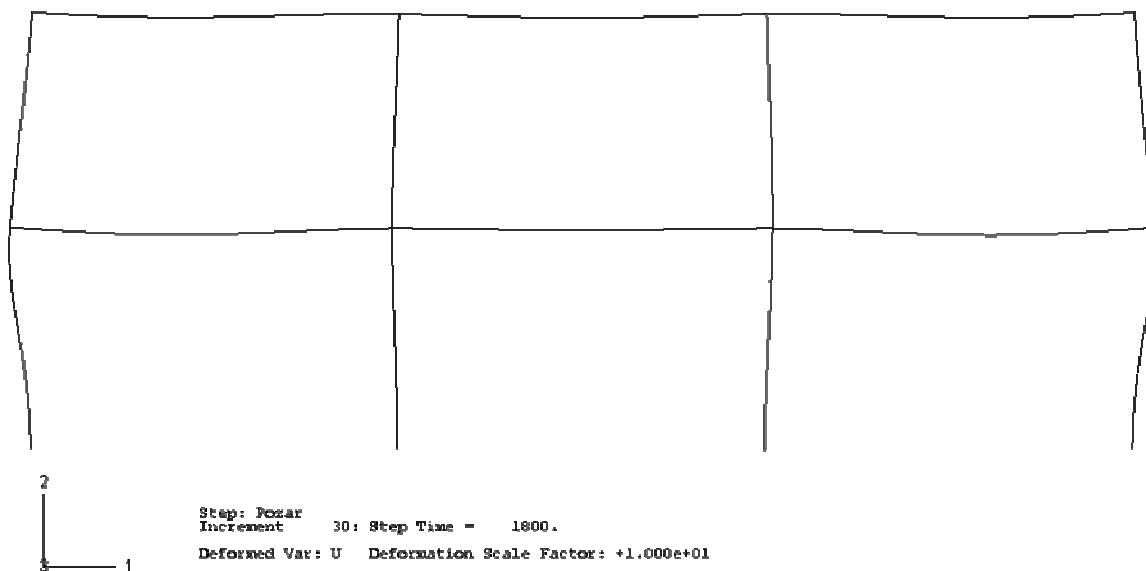
**Slika 82: Osna sila N na mestu P1**

Slika 83: Osna sila  $N$  na mestu P2Slika 84: Upogibni moment  $M$  na mestu P3Slika 85: Osna sila  $N$  na mestu P3



Slika 86: Upogibni moment M na mestu P4

Slika 87 prikazuje deformirano obliko zaščitenega okvira 1 pri požaru v trgovini v času  $t = 30\text{min}$  in maksimalni temperaturi v stebrih (HEB260)  $824\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Deformacije so povečane za faktor 10!

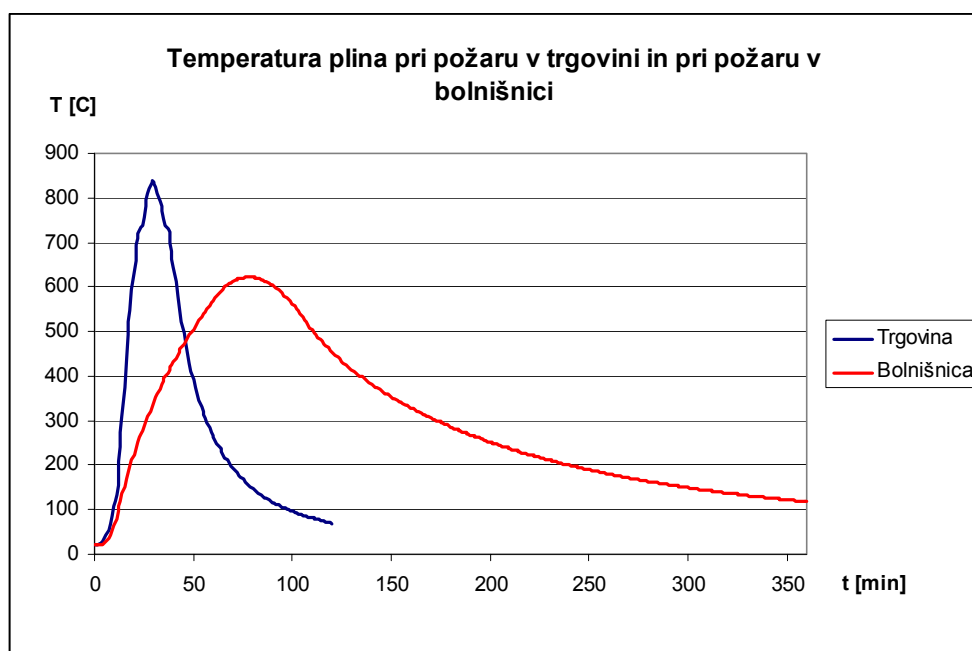


Slika 87: Deformirana oblika izoliranega okvira 1 pri  $t = 30\text{min}$

#### 4.5.1.2 Požarna analiza okvira 1 s programom Abaqus za požar v bolnišnici

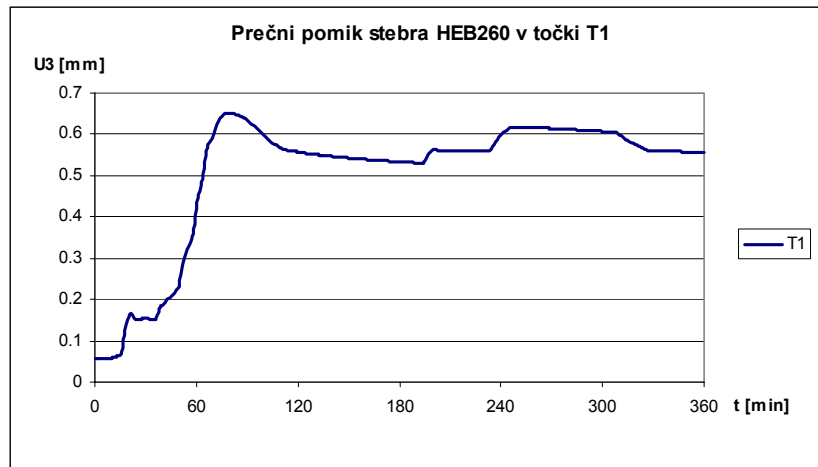
**Nezaščiten okvir:** upoštevano je segrevanje elementov iz vseh štirih strani, tudi pri nosilcih

Ker je predpostavljeno, da bo obravnavani prostor služil za potrebe bolnišnice, so bile temperature dobljene za požarni sektor za omenjeno namembnost bistveno drugačne, kot tiste pri trgovini! Za obravnavani požar v bolnišnici je značilna nižja maksimalna temperatura elementov in daljši požar (slika 88)! Požar v bolnišnici je bil opazovan dokler niso temperature profilov padle na približno 110 °C.

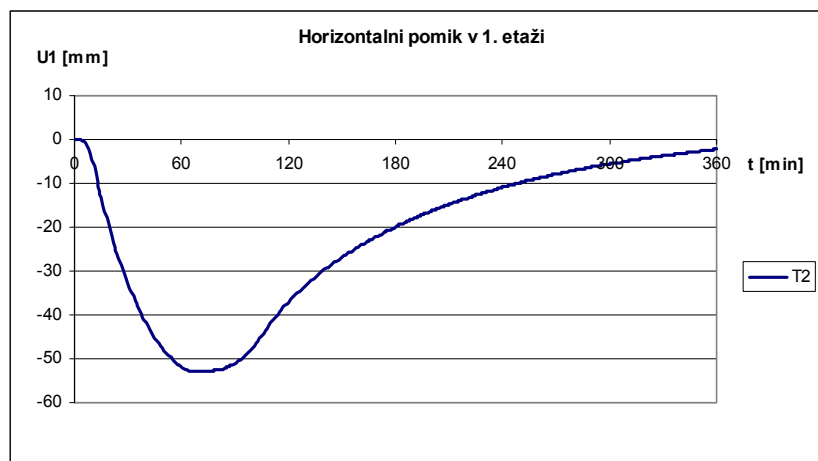


**Slika 88: Primerjava med potekom temperatur pri požaru v trgovini in pri požaru v bolnišnici**

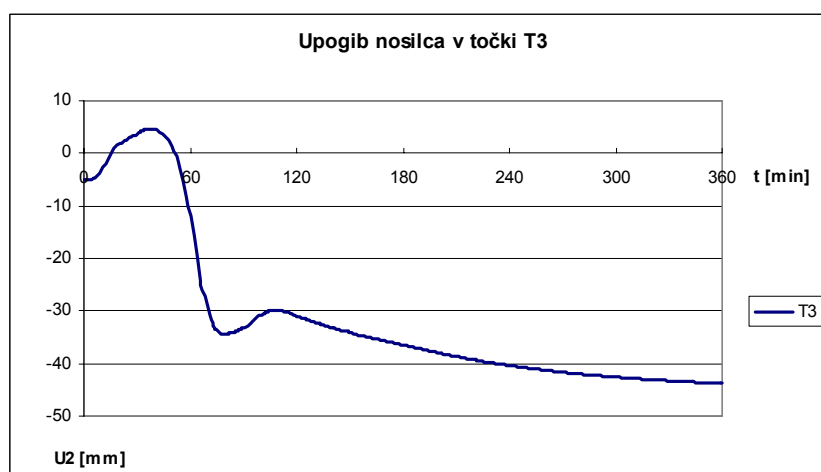
Od slike 89 pa do slike 94 so prikazani pomiki v opazovanih točkah (slika 59) pri požaru v bolnišnici, pri neizoliranih nosilnih elementih.



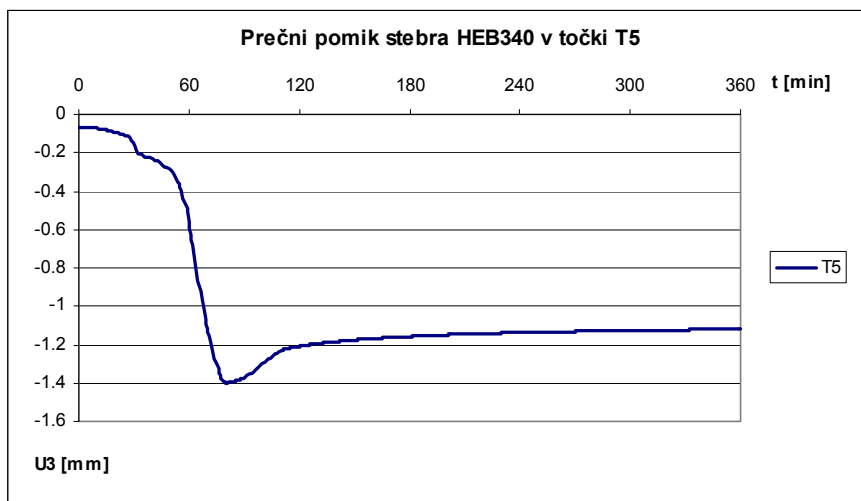
Slika 89: Pomik U3 na mestu T1



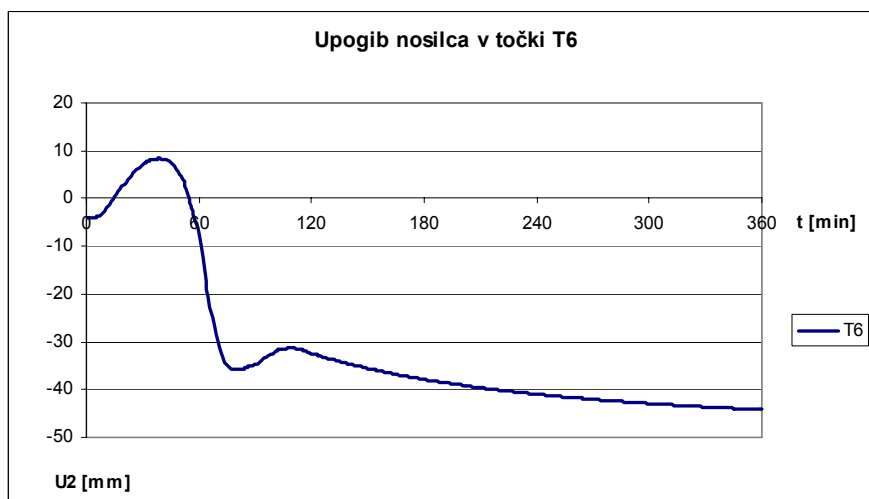
Slika 90: Pomik U1 na mestu T2



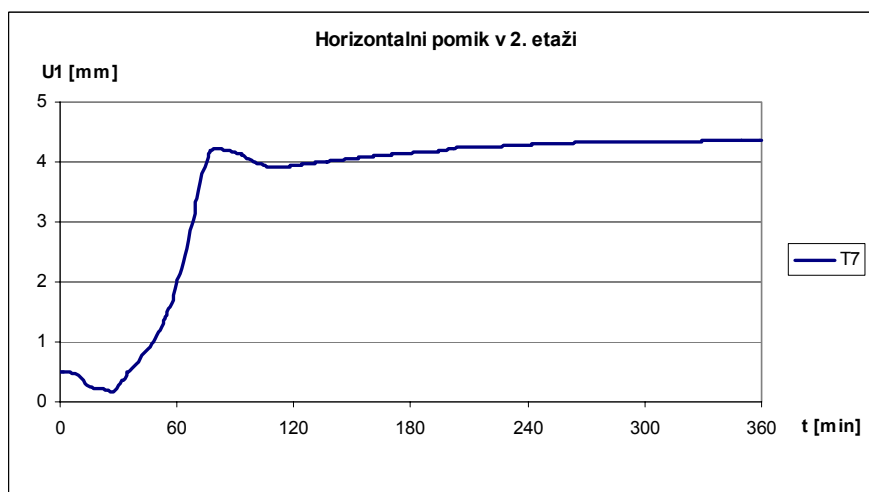
Slika 91: Upogib U2 na mestu T3



Slika 92: Pomik U3 na mestu T5



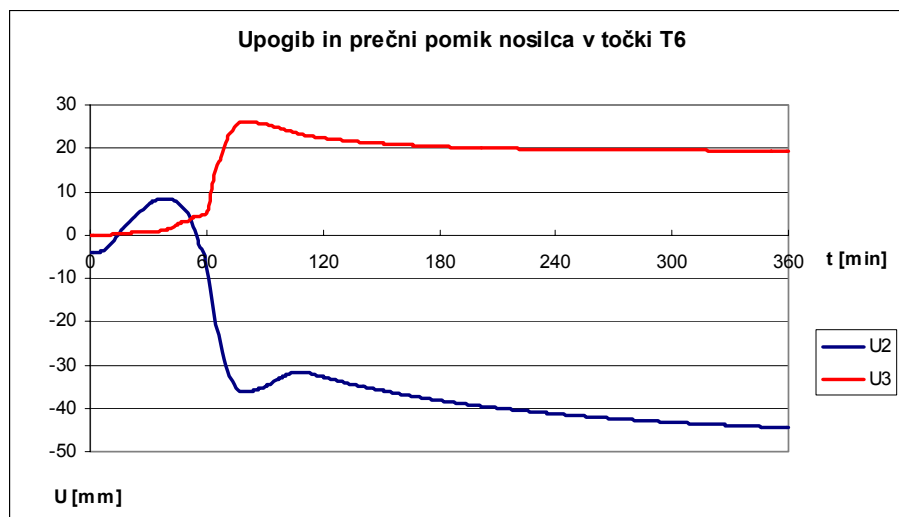
Slika 93: Upogib U2 na mestu T6



Slika 94: Pomik U1 na mestu T7



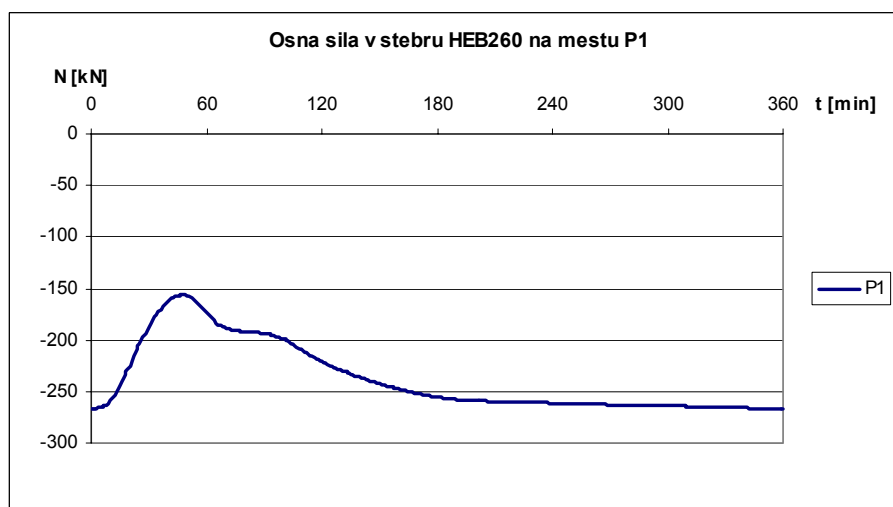
Na sliki 95 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T6, ko nosilci niso bočno podprti.



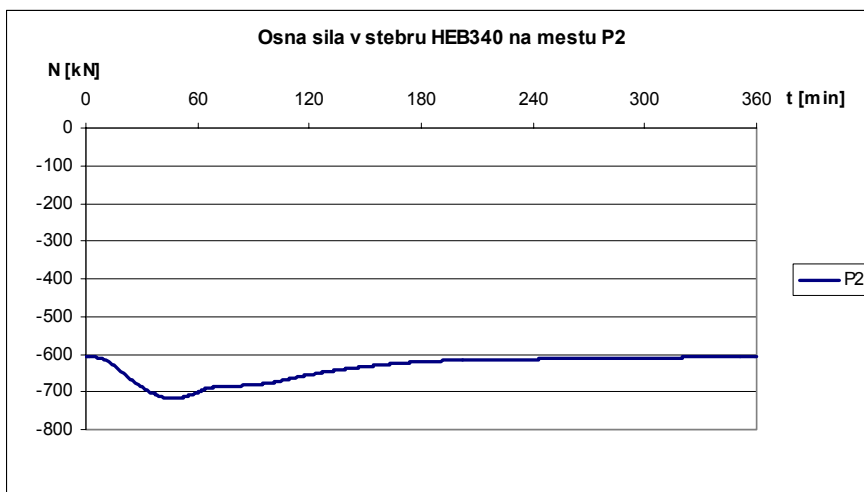
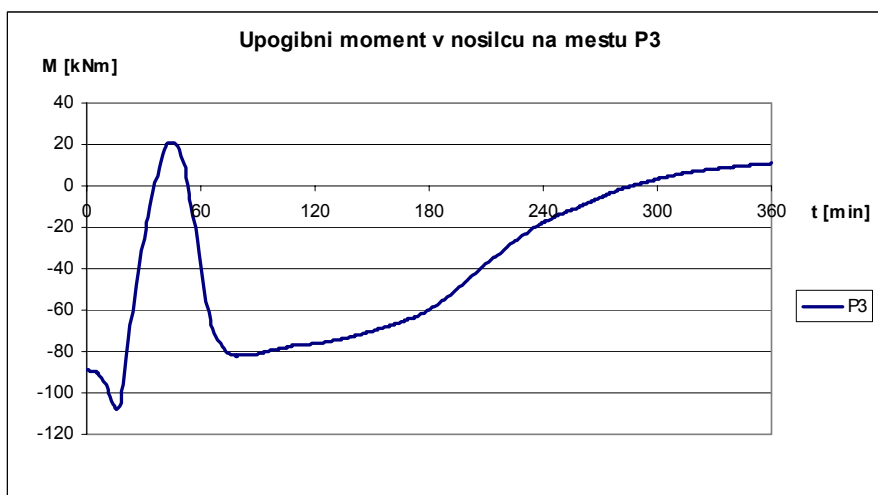
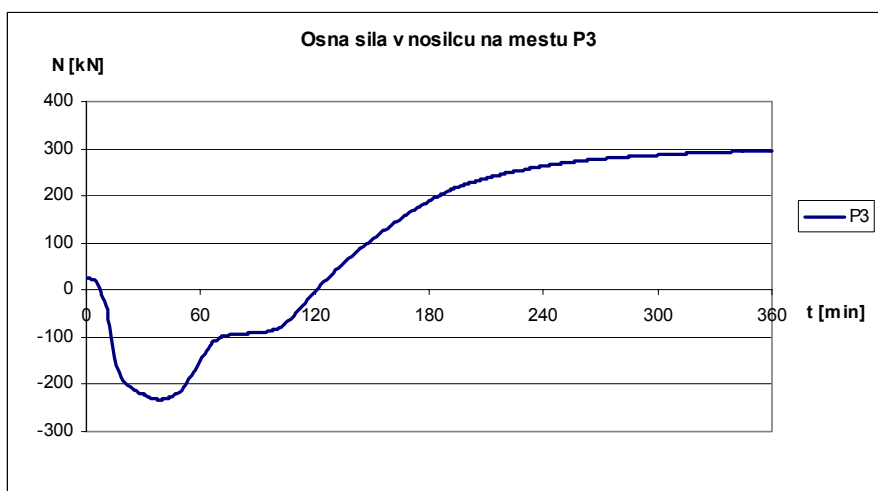
**Slika 95: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T6, ko nosilci niso bočno podprti**

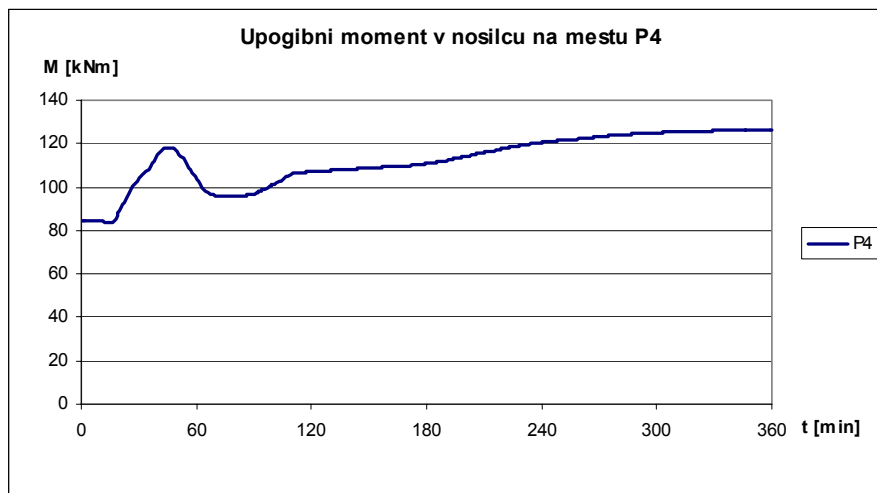
Od slike 96 do slike 100 so prikazani poteki osnih sil in upogibnih momentov v nosilnih elementih na opazovanih pozicijah (slika 67) za okvir 1 v bolnišnici.

Očitno je torej, da v primeru, ko bi bili prostori namenjeni za potrebe bolnišnice, da bi izbrani profili ustrezali za prevzem požarne obtežne kombinacije brez kakršnekoli protipožarne zaščite! Razlog je bistveno nižja maksimalna temperatura v požarnem sektorju pri bolnišnici kot pri trgovini!



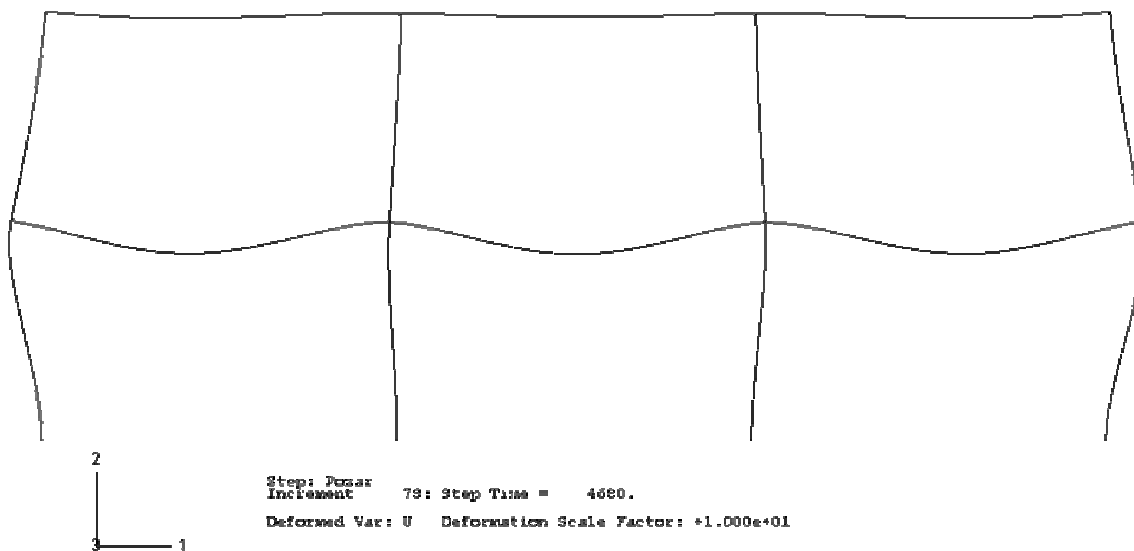
**Slika 96: Osna sila N na mestu P1**

Slika 97: Osna sila  $N$  na mestu P2Slika 98: Upogibni moment  $M$  na mestu P3Slika 99: Osna sila  $N$  na mestu P3



**Slika 100: Upogibni moment M na mestu P4**

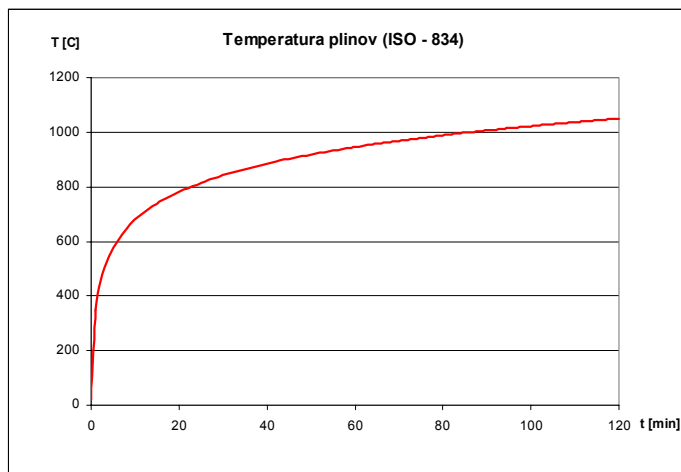
Slika 101 prikazuje deformirano obliko okvira 1 pri požaru v bolnišnici v času  $t = 78\text{min}$  in pri maksimalni temperaturi nosilnih elementov  $621\text{ °C}$ . Deformacije so povečane za faktor 10.



**Slika 101: Deformirana oblika neizoliranega okvira 1 pri požaru v bolnišnici v času  $t = 78\text{min}$**

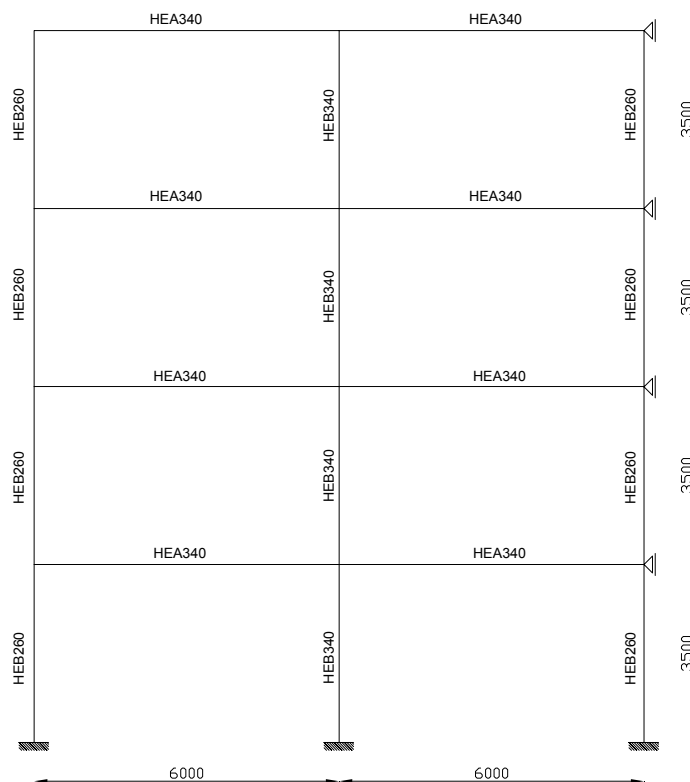
Požarna analiza okvira 1 je bila izvedena tudi za primer, ko se temperatura plinov v požarnem sektorju spreminja v skladu z ISO-834. Nezaščiten okvir lahko prevzame podano obtežbo v primeru požara, dokler temperatura v nosilnih elementih (steber HEB340) ne preseže  $731\text{ °C}$ .

Slika 102 prikazuje potek temperature plinov v požarnem sektorju v odvisnosti od časa, skladno z ISO-834:



Slika 102: Standardna temperaturna krivulja (ISO-834)

#### 4.5.2 Nepomični okvir (okvir 2)



Slika 103: Profili na nepomičnem okviru

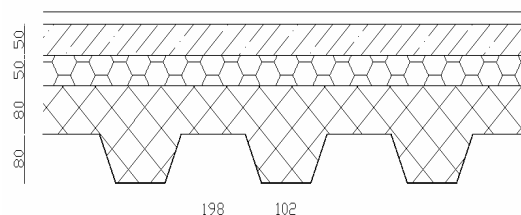
Za okvir 2 je bila narejena analiza v mejnem stanju nosilnosti (MSN) in mejnem stanju uporabnosti (MSU)! Ker okvir 2 predstavlja prizidek obstoječemu objektu in je nanj členkasto priključen (slika 103), je predpostavljeno, da vso horizontalno potresno obtežbo prevzame obstoječi objekt in zato potresna analiza okvira 2 ni potrebna! Glede na dobljeno obremenitev so bili izbrani sledeči profili:

- notranji stebri: **HEB340**
- zunanji stebri: **HEB260**
- nosilci: **HEA340**

Upoštevana je bila sledeča obtežba:

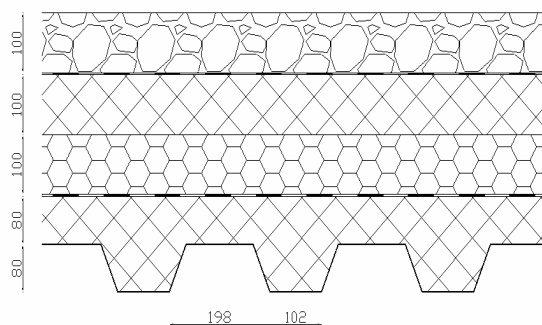
a) lastna in stalna obtežba:

- lastna teža nosilnih elementov
- stalna obtežba v medetaži:  $g = 5,5 \text{ kN/m}^2$  (slika 104)
  - zaključni sloj
  - cem. arm. estrih – 5cm
  - TI – 5cm
  - sovprežna plošča – 16cm
  - pločevina – 1.1 mm ( Multideck 80-V2 )



Slika 104: Medetažna konstrukcija

- stalna obtežba na strehi:  $g_s = 7,9 \text{ kN/m}^2$  (slika 105)
  - nasutje – 10cm
  - HI
  - naklonski beton – 10cm
  - TI – 10cm
  - parna zapora
  - sovprežna plošča – 16cm
  - pločevina – 1.1mm (Multideck 80-V2)



Slika 105: Strešna konstrukcija

b) spremenljiva obtežba:

- koristna obtežba (trgovina):  $q = q_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$
- sneg (cona C):  $q_s = 1,6 \text{ kN/m}^2$
- veter (koncentrirani sili v višini vsake etaže):  $W_1 = 25,6 \text{ kN}$  ;  $W_s = 12,8 \text{ kN}$

Predpostavljeno je, da so okvirji med seboj oddaljeni za 6 metrov, zato je površinska obtežba pomnožena še s to širino, ter tako prevedena na linijsko obtežbo za okvir!

Lokalnih in globalnih geometrijskih nepopolnosti pri analizi v MSN ni potrebno upoštevati.

V skladu z EN1993-1-1 (5.3.2(6)) se lokalne nepopolnosti pri računu notranjih sil po TDR lahko zanemarijo, v kolikor za posamezen element velja enačba (5):

- srednji steber HEB340:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{24}{93,9} = 0,26 \leq 0,5 \sqrt{\frac{171 \cdot 23,5}{2121}} = 0,69$$

- zunanji steber HEB260:

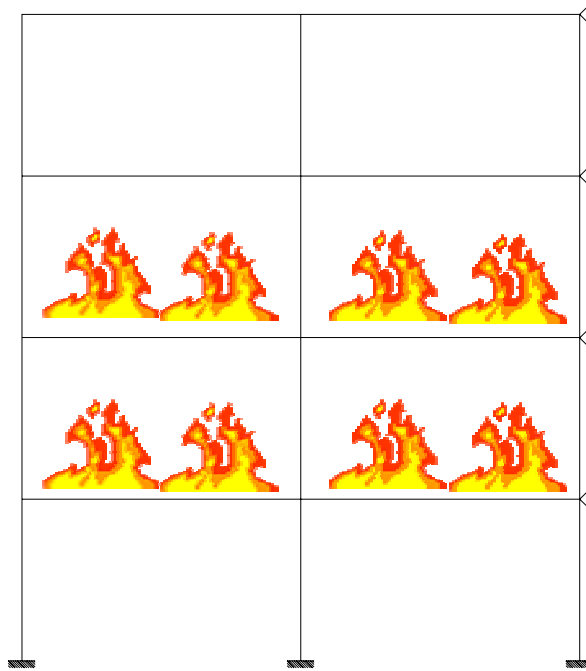
$$\bar{\lambda}_y = \frac{31,3}{93,9} = 0,33 \leq 0,5 \sqrt{\frac{118 \cdot 23,5}{929}} = 0,86$$

Pri požarni analizi s programom Abaqus 6.6, so upoštevane minimalne lokalne nepopolnosti (stebri:  $e_0 = L/500$ , nosilci:  $e_0 = L/1000$  v kolikor niso bočno podprti)! Pri požarni analizi je torej upoštevana TDR, nelinearen odziv jekla S235 pri različnih temperaturah ter lokalne geometrijske nepopolnosti!

Temperatura v posameznih profilih je določena s programom Ozone V2.

**Požarni sektor:** 12m x 10m

V izbranem požarnem scenariju je predvideno, da požar izbruhne v požarnem sektorju, ki zajema 1. in 2. nadstropje hkrati (slika 106).



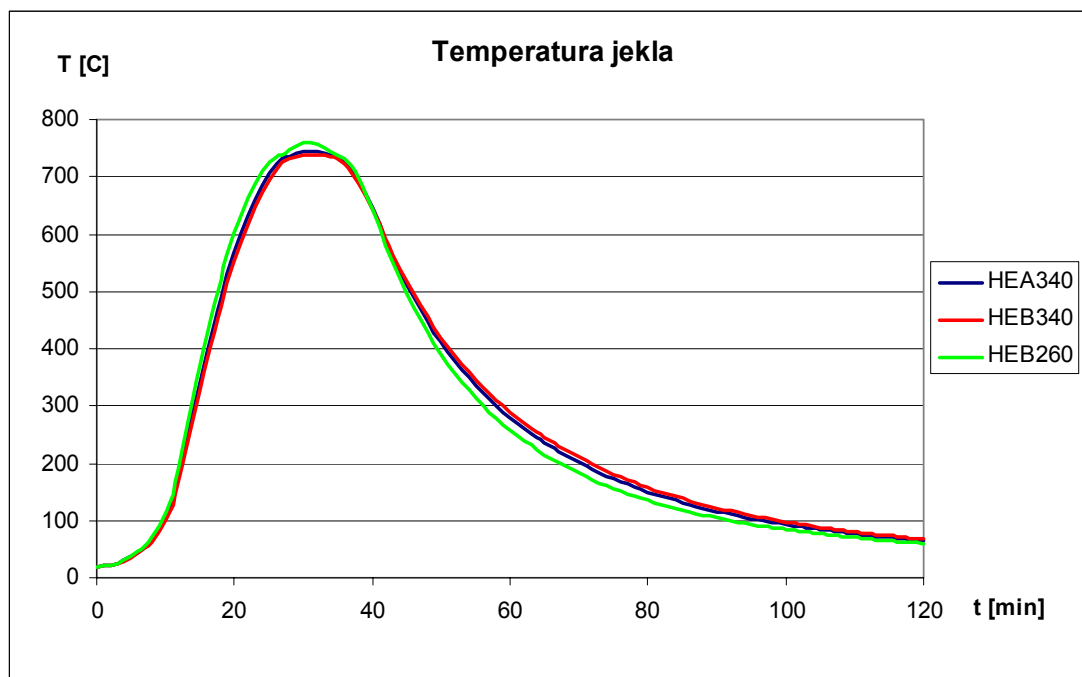
**Slika 106: Požar v 1. in 2. nadstropju hkrati**

**a) Trgovina:** gorljiva površina 120 m<sup>2</sup>

Aktivni ukrepi:

- šprinklerji
- zunanje gasilske enote
- varne dostopne poti
- naprave za gašenje požara
- sistem odvajanja dima

Krivulje na sliki 107 prikazujejo potek temperature v različnih profilih v odvisnosti od časa za požarni sektor v **trgovini** pri okviru 2.



Slika 107: Temperatura različnih profilov v okviru 2 pri požaru v trgovini

**b) Bolnišnica:** gorljiva površina 90 m<sup>2</sup>

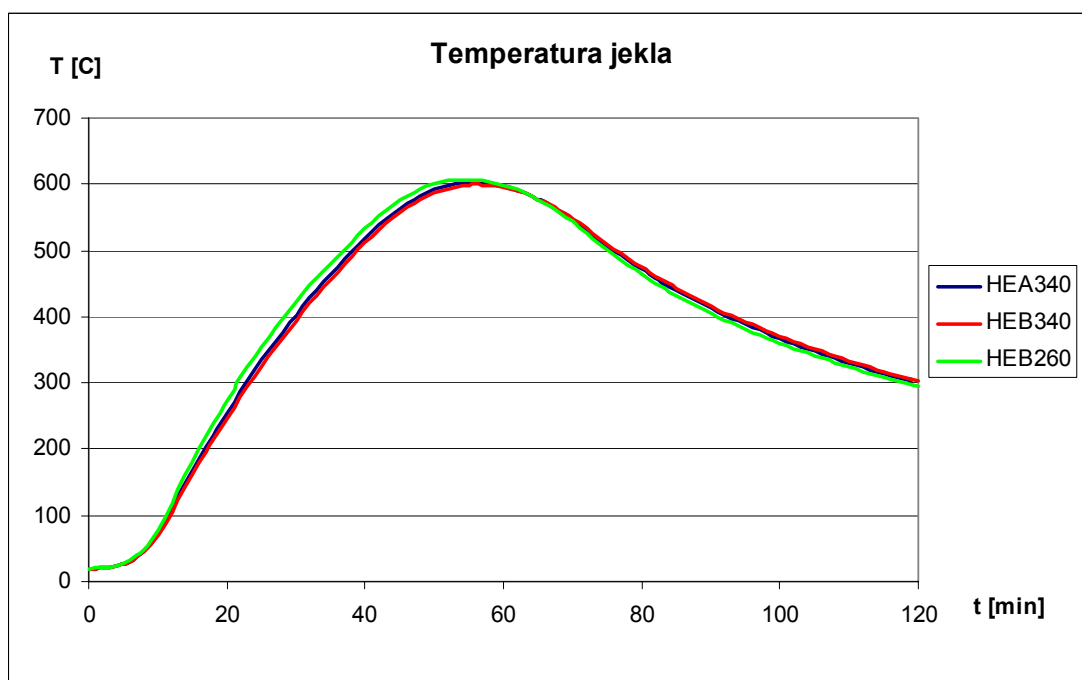
Aktivni ukrepi:

- avtomatsko zaznavanje požara s toploto
- lastne gasilske enote
- varne dostopne poti
- naprave za gašenje požara
- sistem odvajanja dima

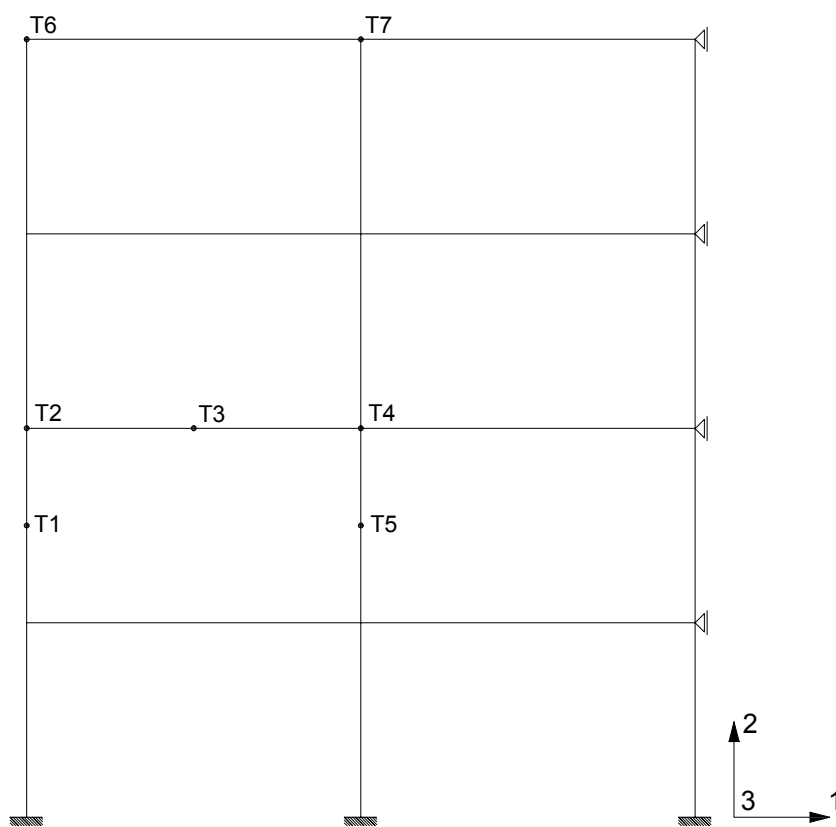
Na sliki 108 so prikazani poteki temperatur v različnih profilih v odvisnosti od časa za požarni sektor v **bolnišnici** pri okviru 2.

Pri požarni analizi nepomičnega okvira se opazujejo pomiki karakterističnih točk, ki so označene na sliki 109.





Slika 108: Temperatura različnih profilov v okviru 2 pri požaru v bolnišnici



Slika 109: Pozicije opazovanih točk pri okviru 1

V nadaljevanju je segrevanje nosilca HEA340 približano bolj realnim razmeram in predpostavki, da se nosilec segreva samo iz treh strani, kajti plošča nad nosilcem preprečuje neposreden kontakt ognja z zgornjo stranjo zgornje pasnice nosilca!

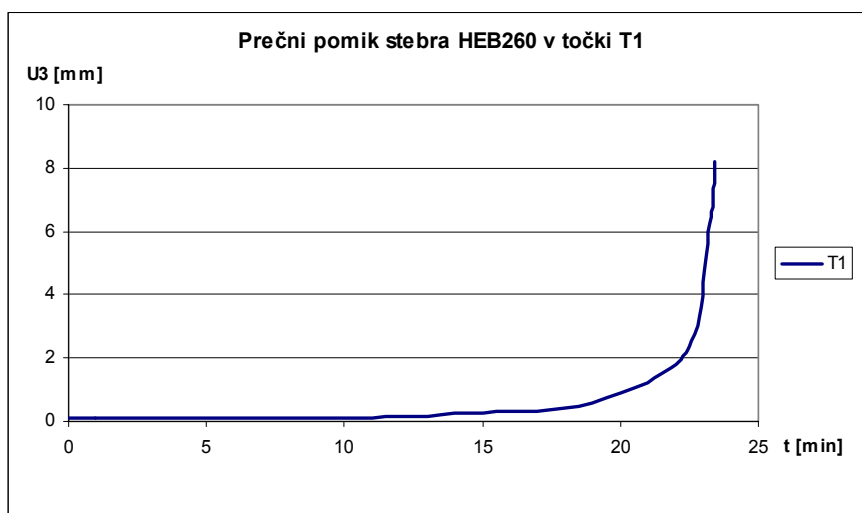
Sledijo rezultati požarne analize s programom Abaqus. Prikazani so pomiki v karakterističnih točkah na okviru 2. Predvideno je, da so nosilci bočno podprti! Pomiki so podani glede na osi globalnega koordinatnega sistema označenega na sliki 109!

#### 4.5.2.1 Požarna analiza okvira 2 s programom Abaqus za požar v trgovini

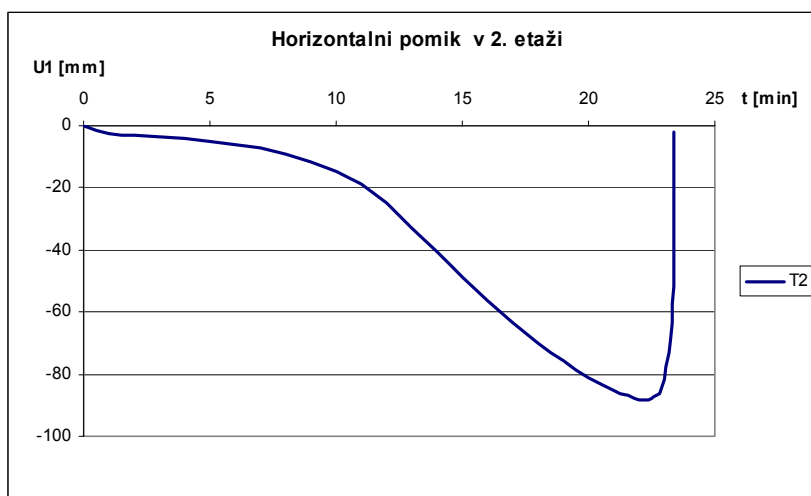
Pri požaru v trgovini se je izvajala analiza za prvih 120 minut požara.

a) **Nezaščiten okvir:** upoštevano je segrevanje stebrov iz vseh štirih strani, medtem ko se nosilci segrevajo samo iz treh strani

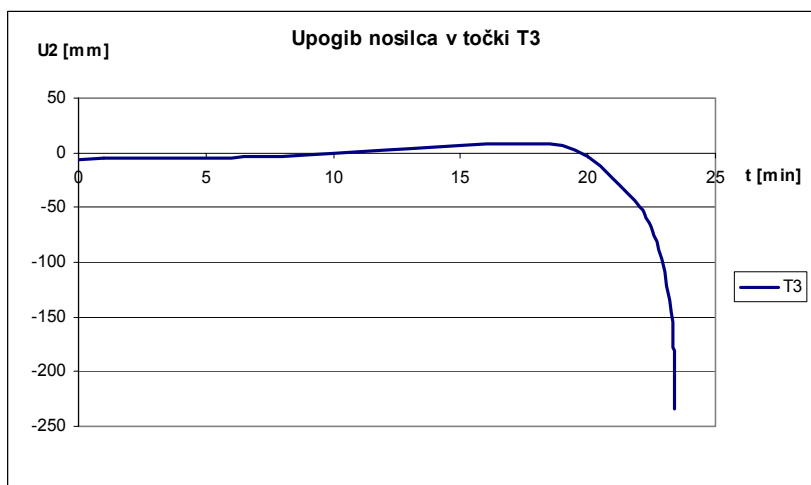
Od slike 110 pa do slike 116 so izrisani pomiki v odvisnosti od časa za protipožarno nezaščiten okvir 2.



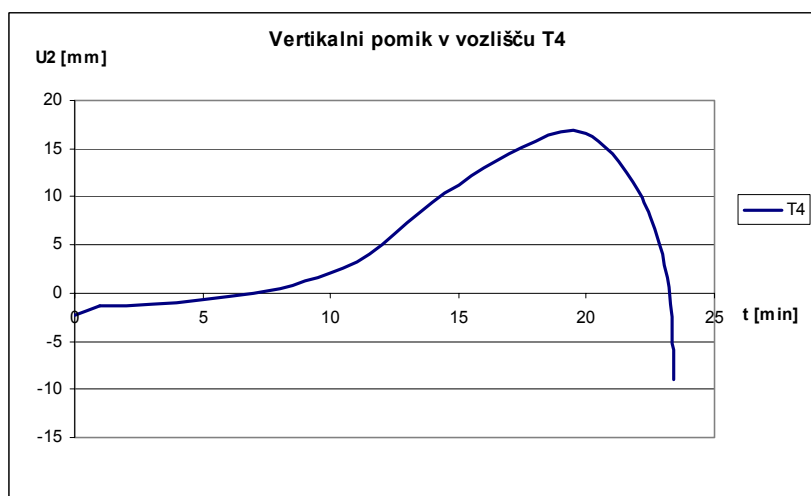
Slika 110: Pomik U3 na mestu T1



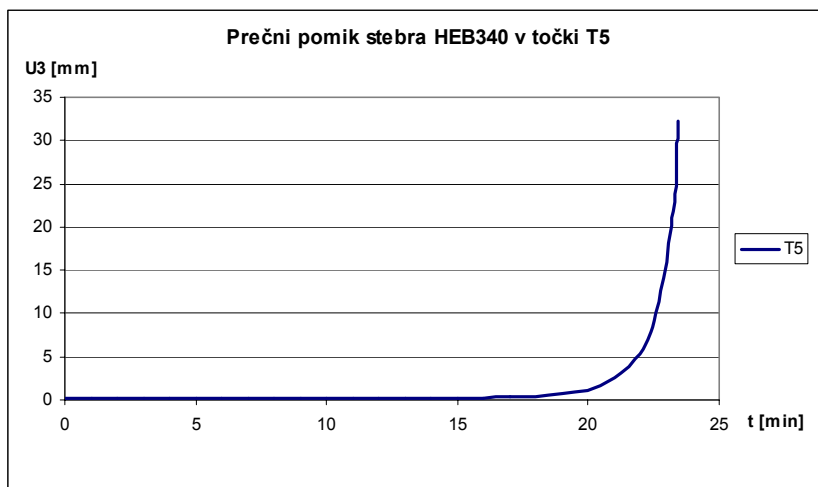
Slika 111: Pomik U1 na mestu T2



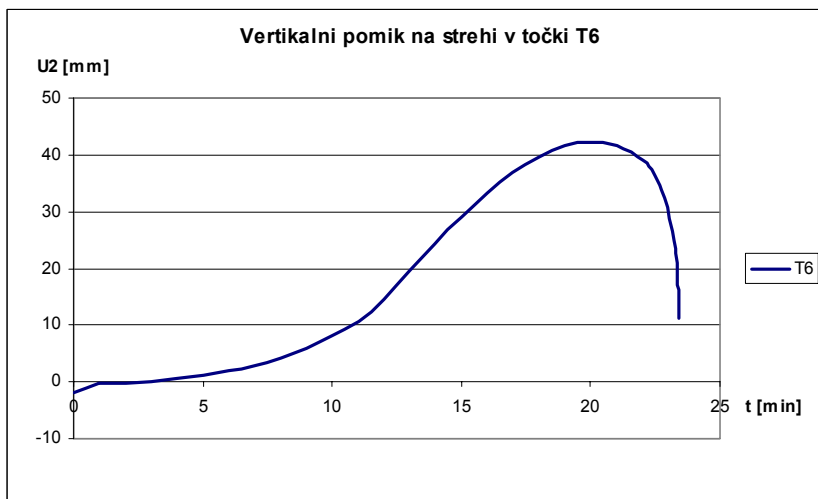
Slika 112: Upogib U2 na mestu T3



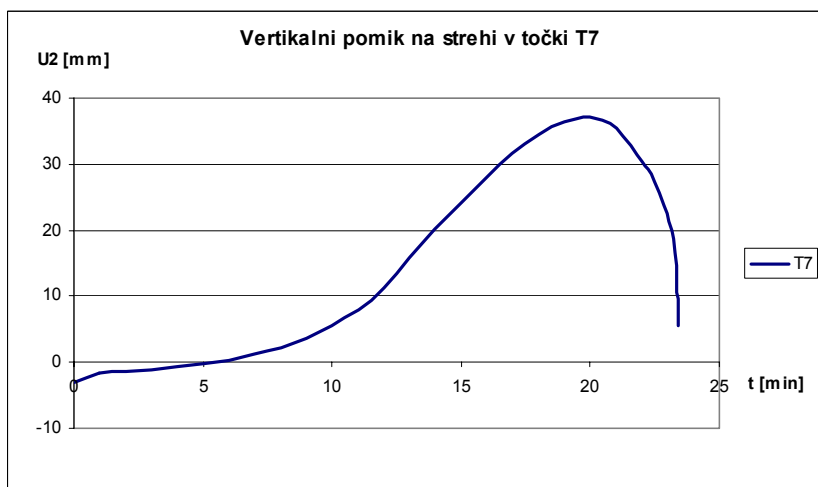
Slika 113: Pomik U2 na mestu T4



Slika 114: Pomik U3 na mestu T5

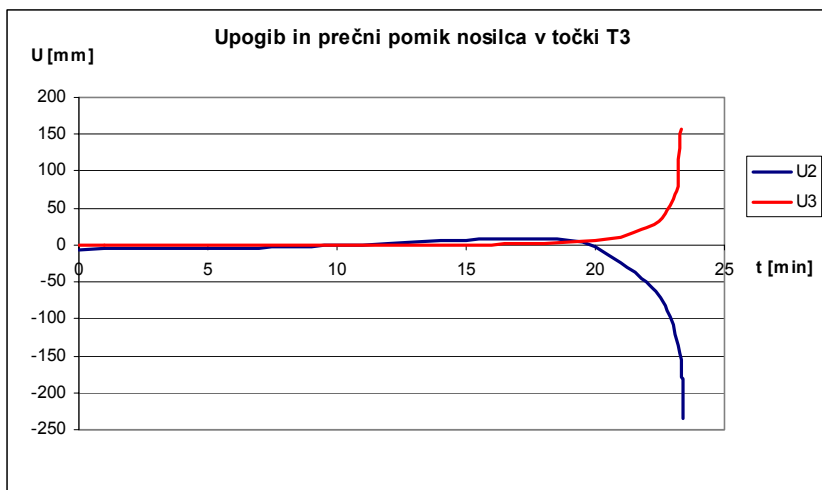


Slika 115: Pomik U2 na mestu T6



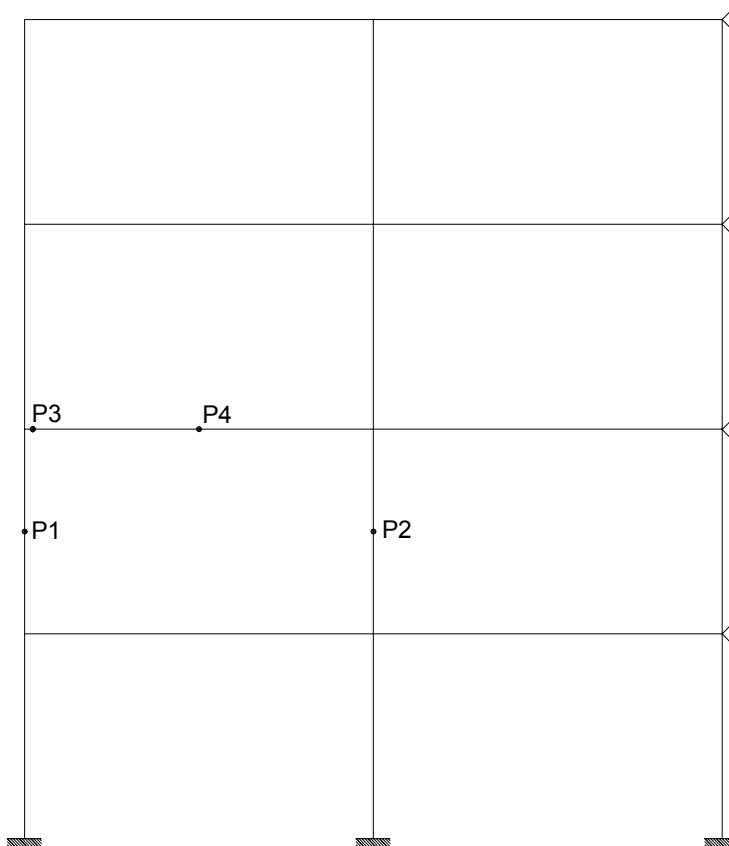
Slika 116: Pomik U2 na mestu T7

Na sliki 117 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T3, ko nosilci niso bočno podprti.



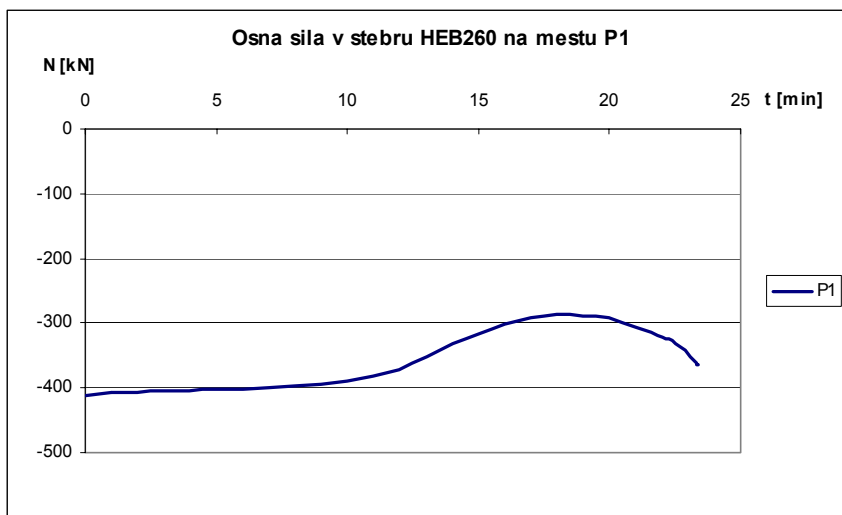
**Slika 117: Pomik  $U_3$  in upogib  $U_2$  na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti**

Notranje sile so bile preverjene na izbranih mestih, ki so označeni na sliki 118!

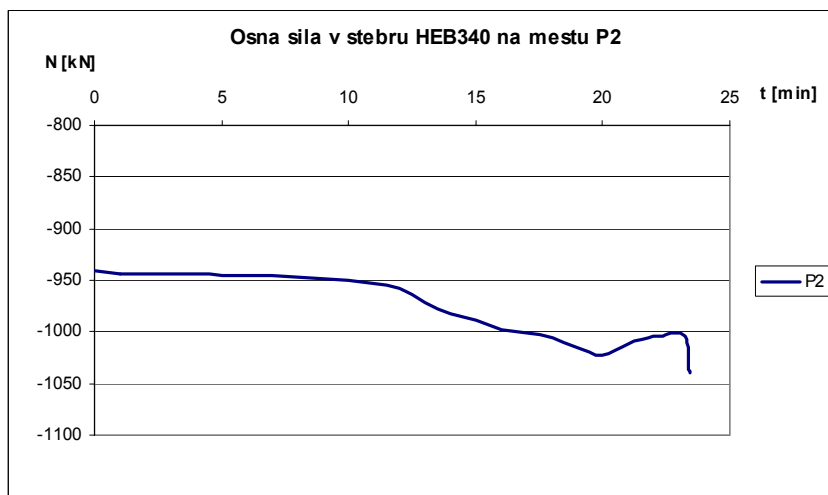


**Slika 118: Pozicije opazovanih notranjih sil v konstrukcijskih elementih**

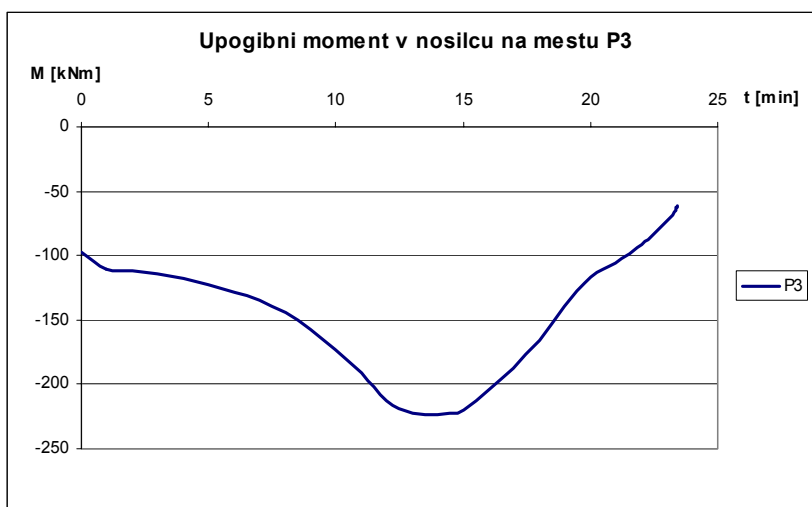
Naslednje slike prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa. Od slike 119 pa do slike 123 so prikazani poteki notranjih sil (osne sile in upogibni momenti) v neizoliranih elementih za požar v trgovini.



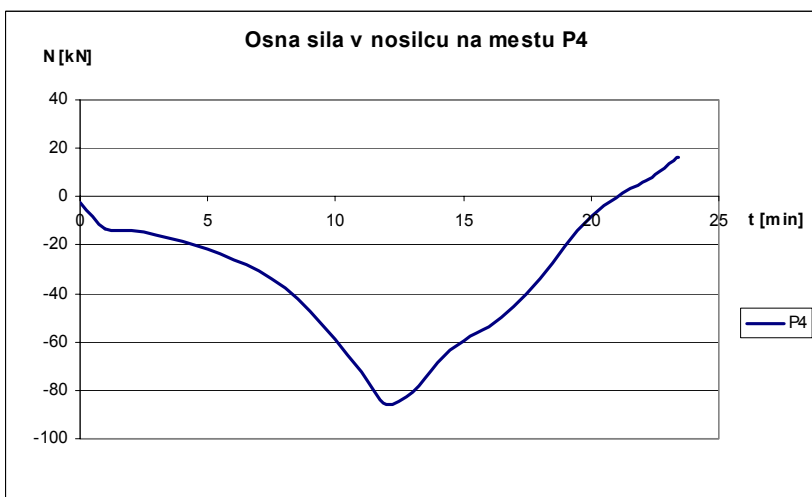
Slika 119: Osna sila  $N$  na mestu P1



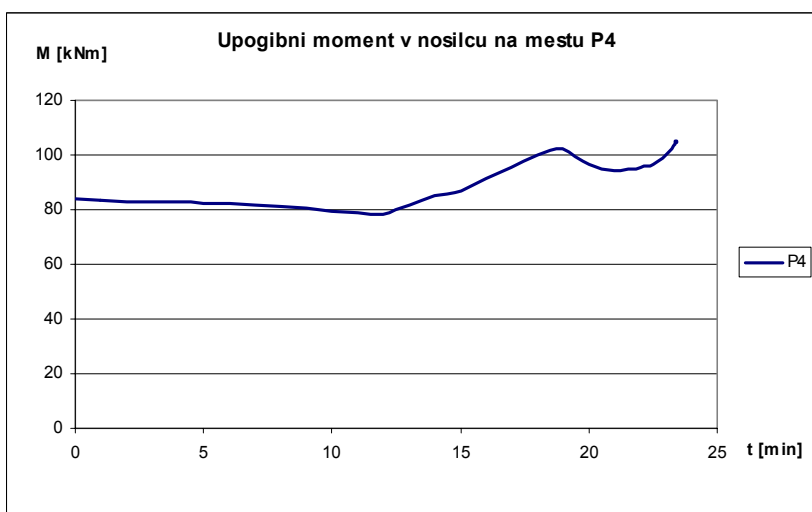
Slika 120: Osna sila  $N$  na mestu P2



Slika 121: Upogibni moment M na mestu P3

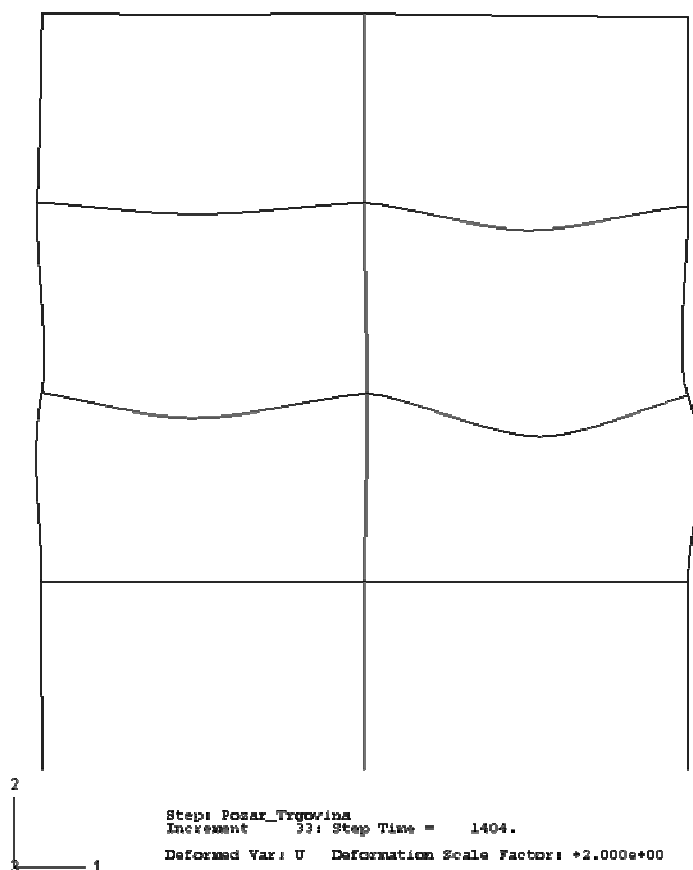


Slika 122: Osna sila N na mestu P4



Slika 123: Upogibni moment M na mestu P4

Slika 124 prikazuje deformiran okvir 2 pri času  $t = 23\text{min}$  in  $24\text{s}$ . Deformacije so povečane za faktor 2! Pri tem času se analiza ustavi, saj je prekoračena nosilnost v desnem stebri (HEB260) v 1. nadstropju. Maksimalna dosežena temperatura v nosilnih elementih (HEB260) znaša  $698\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

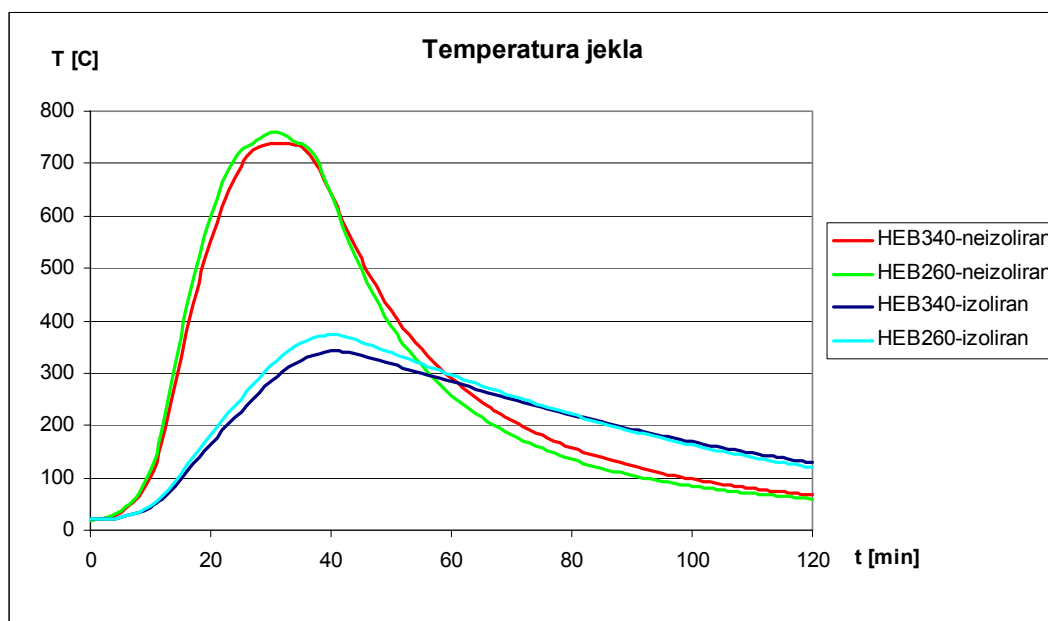


**Slika 124: Deformirana oblika neizoliranega nepomičnega okvira v času  $t = 23\text{min } 24\text{s}$**

V naslednjem koraku so izolirani samo stebri HEB260 z 10 mm debelo mavčno ploščo v obliki škatlastega profila! V tem primeru okvir prenese požarno obtežbo do časa  $t = 24\text{min}$  in  $32\text{s}$ . Pri tem času pride do prekoračitve nosilnosti na notranjem stebri HEB340 v prvem nadstropju. Maksimalna dosežena temperatura v nosilnih elementih (HEA340) znaša  $696\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

b) **Zaščiten okvir:** v naslednjem koraku je predvidena protipožarna zaščita še na stebrih HEB340 z 10mm debelo mavčno ploščo! Nosilci HEA340 ostanejo nezaščiteni in ogrevani iz treh strani!

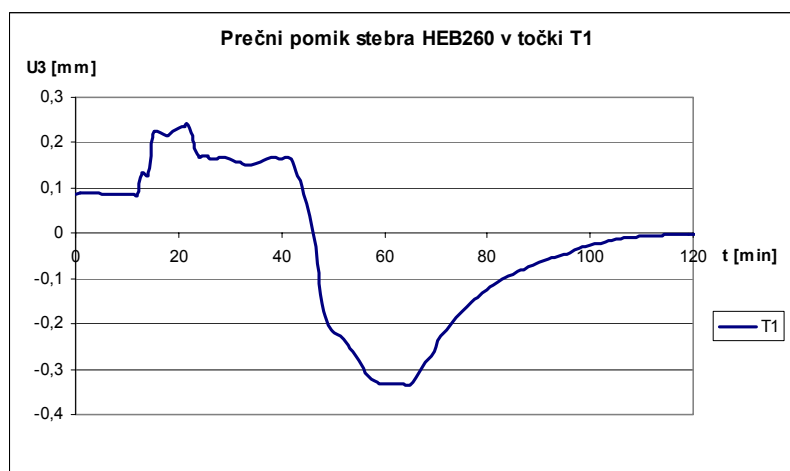




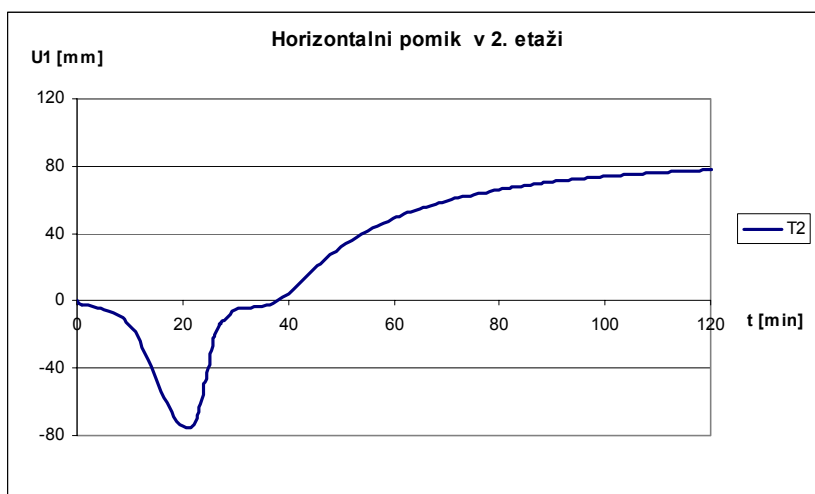
**Slika 125: Potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih profilih v trgovini**

Zgornja slika 125 prikazuje potek temperature v zaščitenih in nezaščitenih stebrih. Omeniti velja še, da je bila maksimalna dosežena temperatura pri nosilcu HEA340 ogrevanem iz štirih strani 769 °C pri nosilcu ogrevanem iz treh strani pa 744 °C!

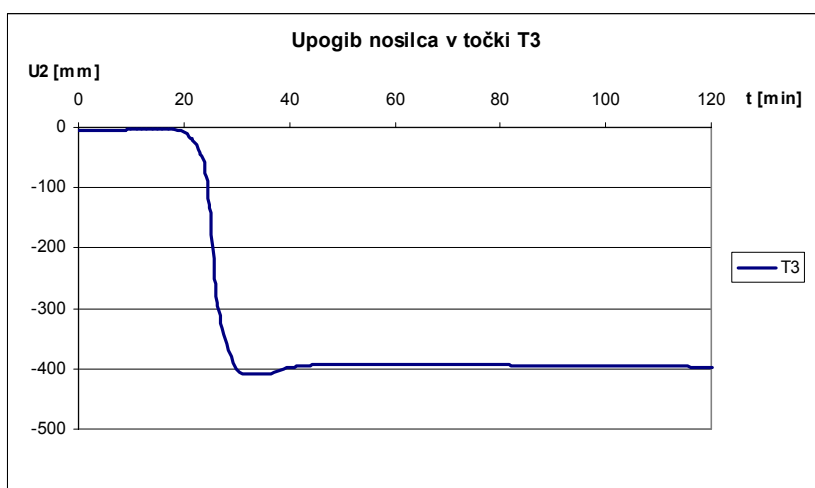
Od slike 126 do slike 132 so prikazani pomiki v karakterističnih točkah pri požarno zaščitenem okviru 2.



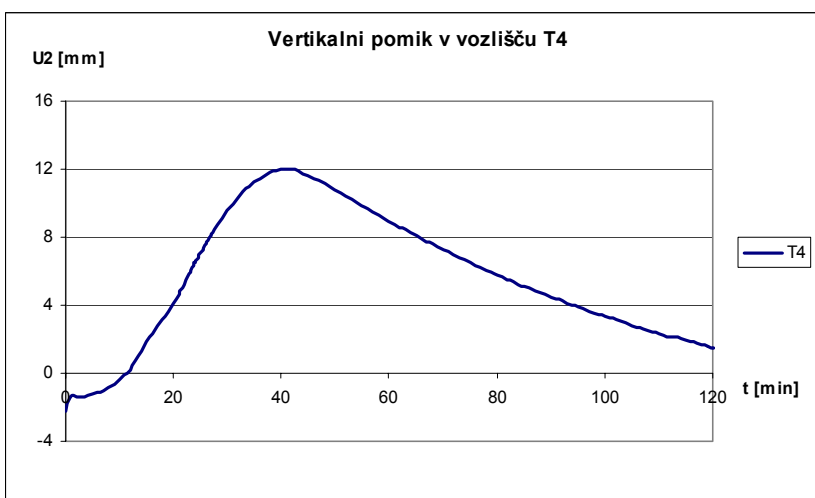
**Slika 126: Pomik U3 na mestu T1**



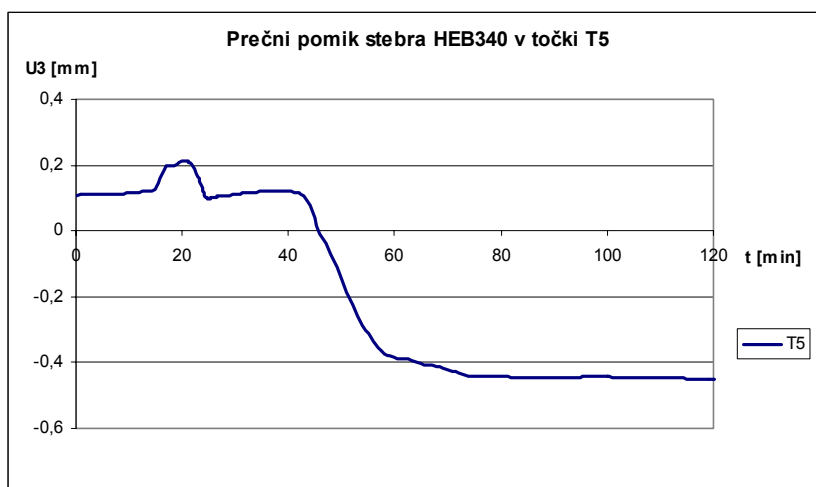
Slika 127: Pomik U1 na mestu T2



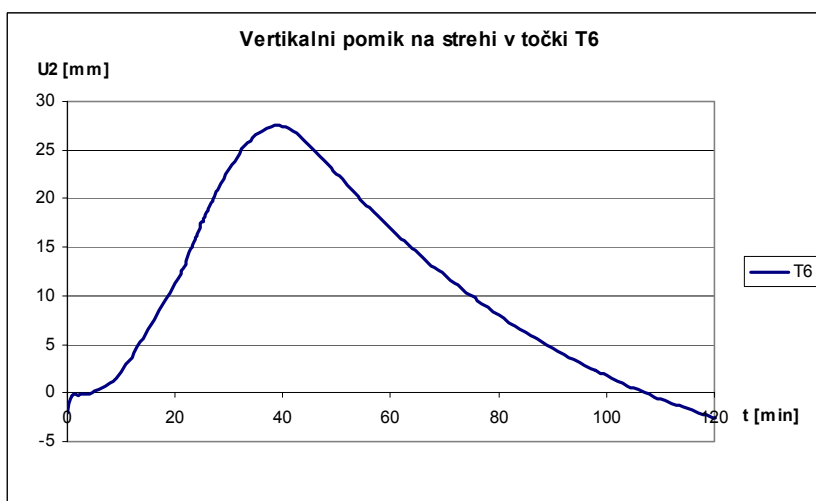
Slika 128: Upogib U2 na mestu T3



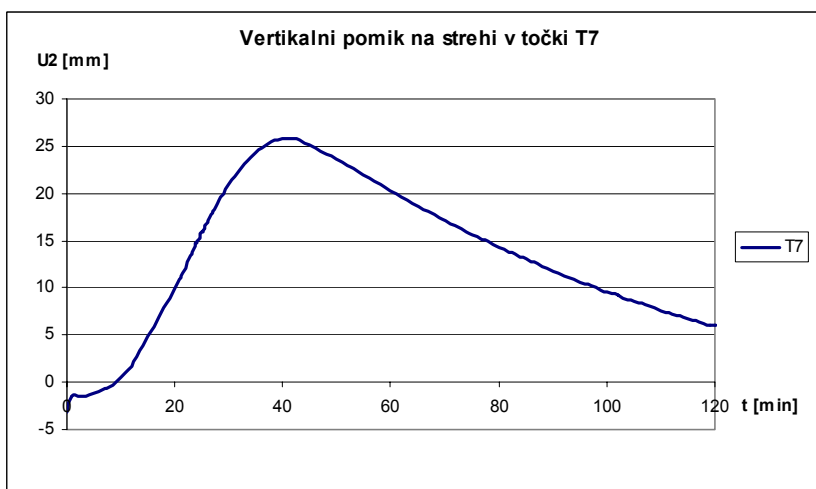
Slika 129: Pomik U2 na mestu T4



Slika 130: Pomik U3 na mestu T5



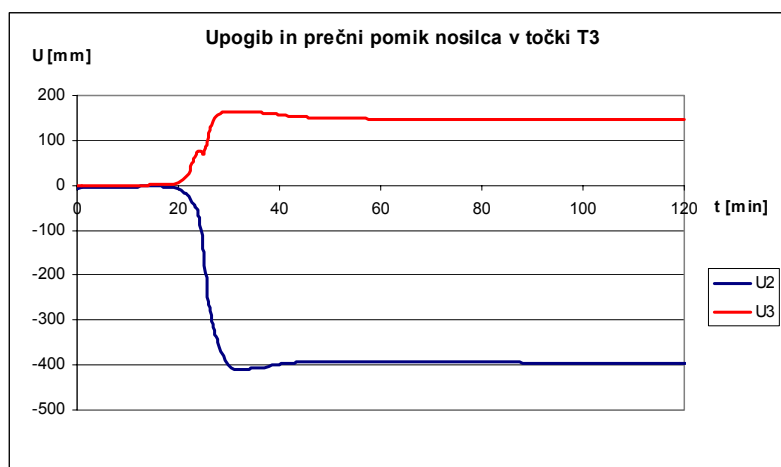
Slika 131: Pomik U2 na mestu T6



Slika 132: Pomik U2 na mestu T7

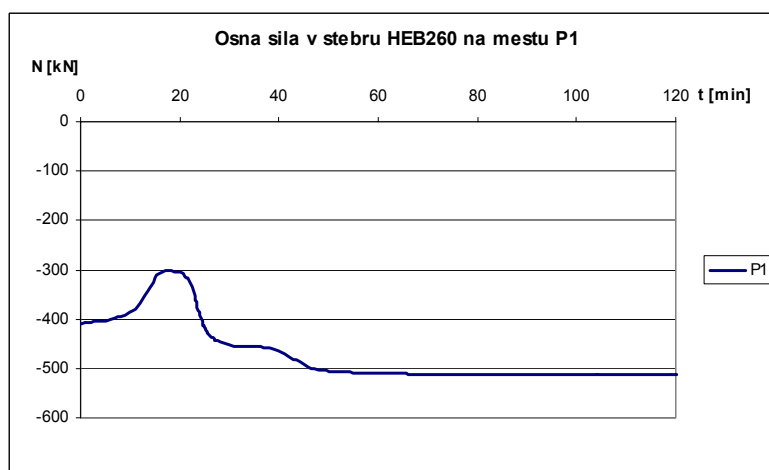
Vidni so bistveno manjši prečni pomiki v stebrih, saj so le ti zaščiteni pred požarom in je zato temperatura v njih samih bistveno nižja, kar pomeni da je nosilnost in odpornost teh elementov tudi bistveno večja! Upogibi nosilca v polju pa znašajo približno 400 mm (nosilci namreč niso izolirani) in tolikšni tudi ostanejo po dveh urah, ko požar ugaša!

Na spodnji sliki 133 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T3, ko nosilci niso bočno podprti.

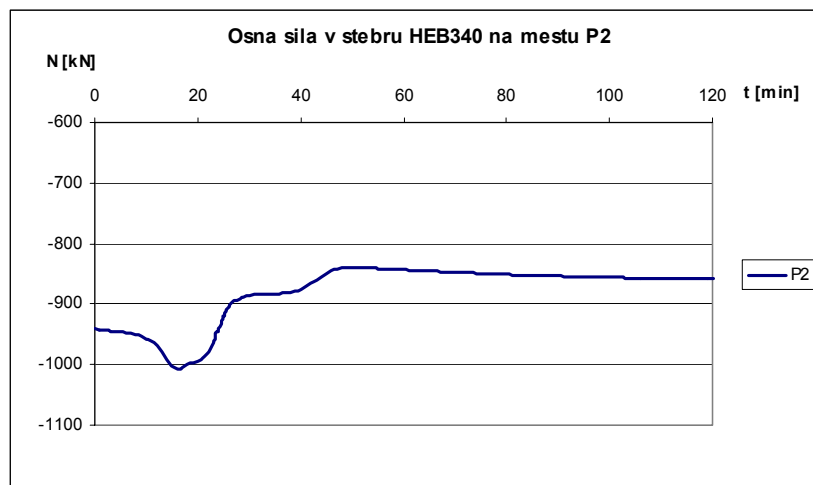


Slika 133: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti

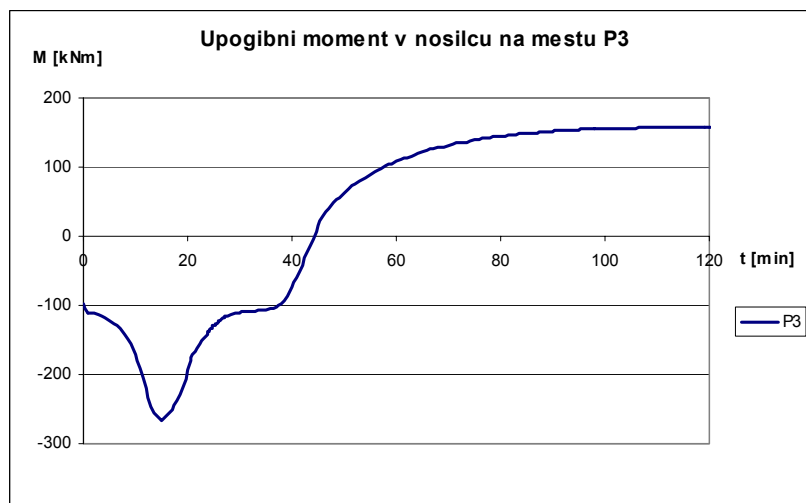
Slike od 134 do 138 prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa pri okviru 2, ko je ta protipožarno zaščiten.



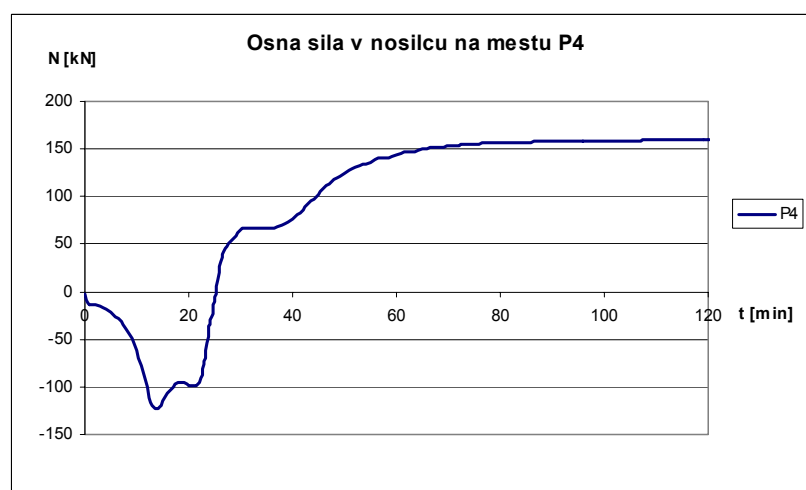
Slika 134: Očna sila N na mestu P1



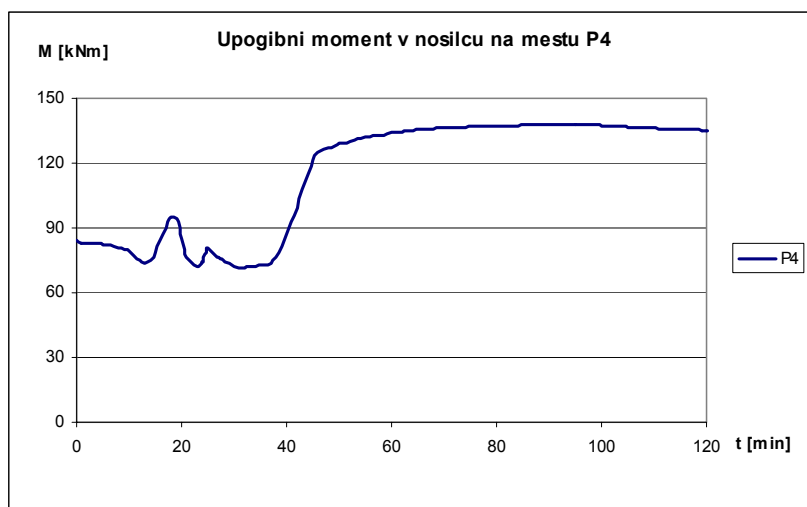
Slika 135: Osna sila  $N$  na mestu P2



Slika 136: Upogibni moment  $M$  na mestu P3

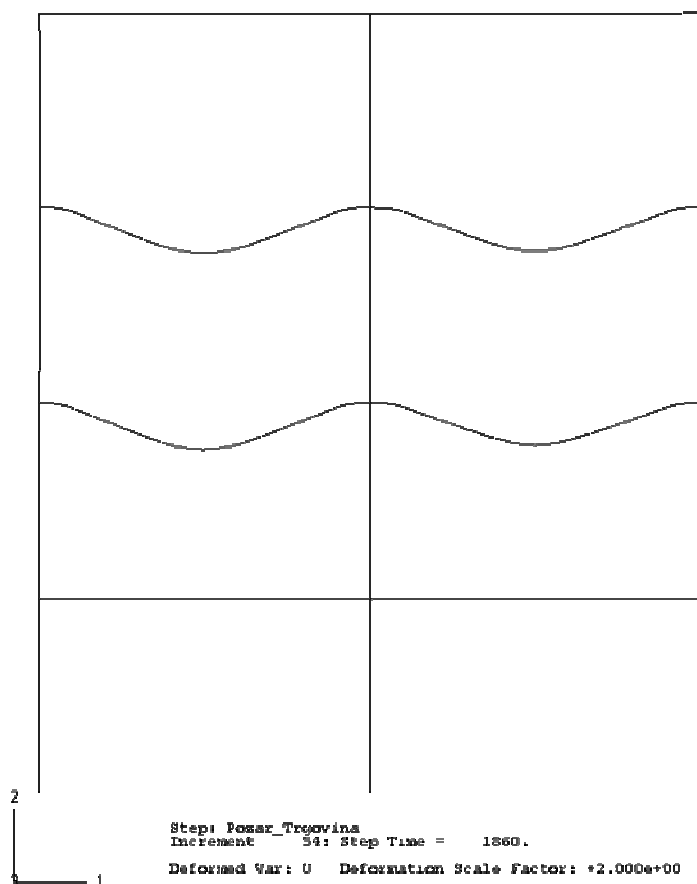


Slika 137: Osna sila  $N$  na mestu P4



Slika 138: Upogibni moment M na mestu P4

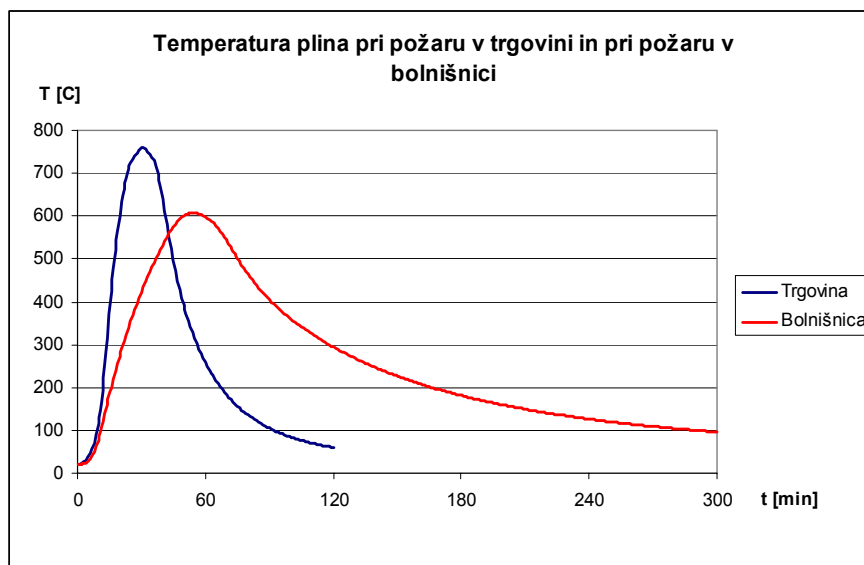
Slika 139 prikazuje deformirano obliko zaščitenega okvira 2 pri požaru v trgovini v času  $t = 31\text{min}$  in maksimalni temperaturi v nosilcih  $744\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Deformacije so povečane za faktor 2!



Slika 139: Deformirana oblika izoliranega okvira 2 v času  $t = 31\text{min}$

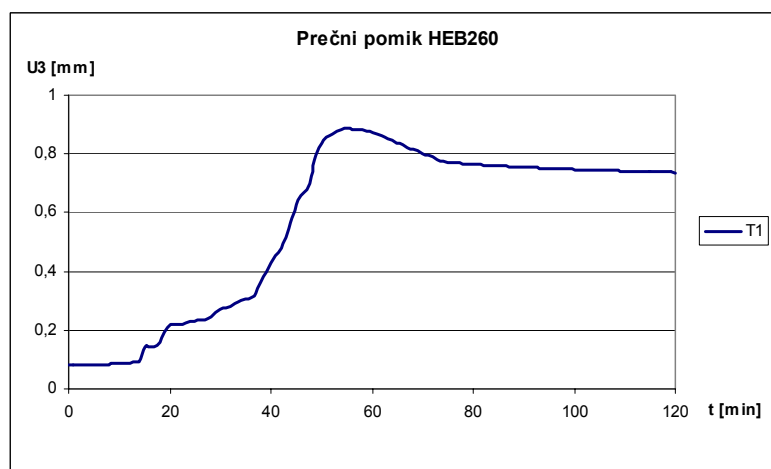
#### 4.5.2.2 Požarna analiza okvira 2 s programom Abaqus za požar v bolnišnici

Požar v bolnišnici je bil opazovan 5 ur, dokler niso temperature v profilih padle nazaj na približno 100 °C. Za slednji požar je značilna nižja maksimalna temperatura in daljši čas izgorevanja (slika 140)!

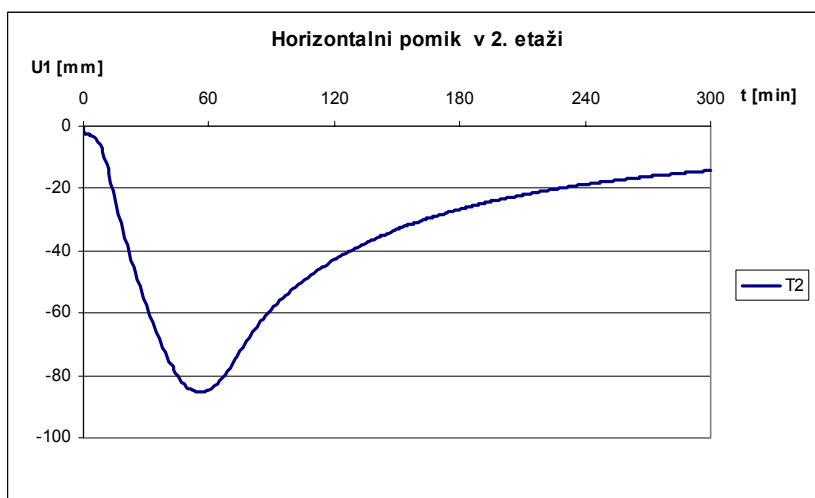


Slika 140: Primerjava med potekom temperatur pri požaru v trgovini in pri požaru v bolnišnici

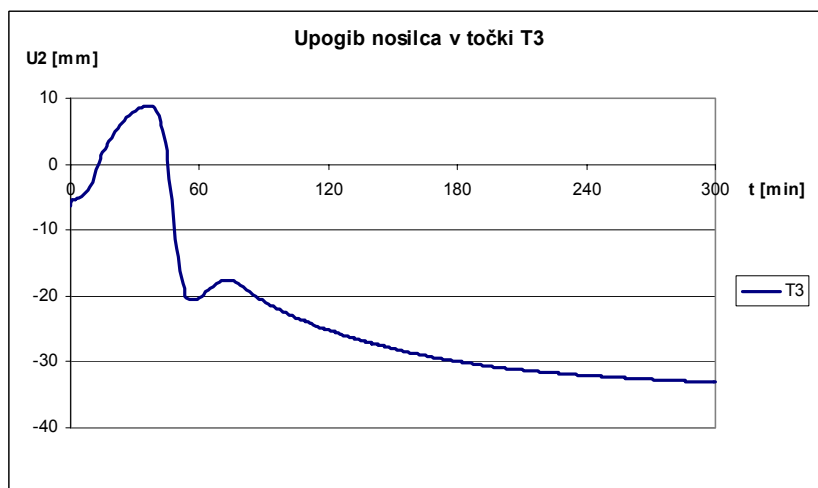
**Nezaščiten okvir:** upoštevano je segrevanje stebrov iz vseh štirih strani, medtem ko se nosilci segrevajo samo iz treh strani



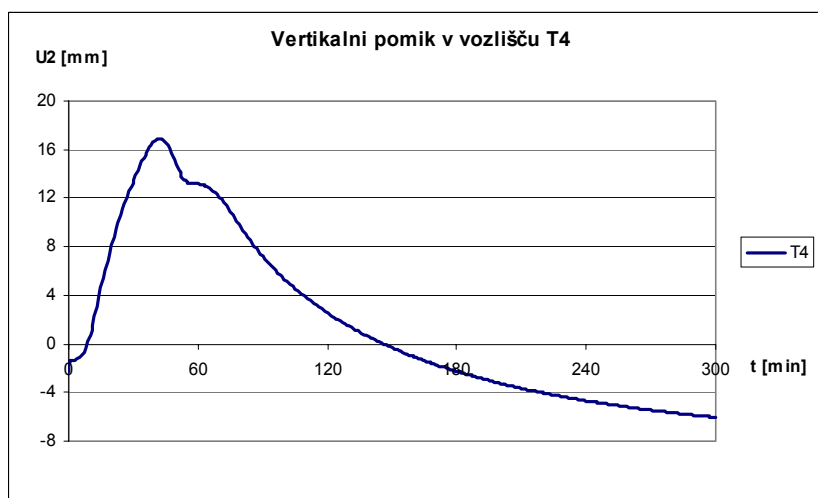
Slika 141: Pomik U3 na mestu T1



Slika 142: Pomik U1 na mestu T2

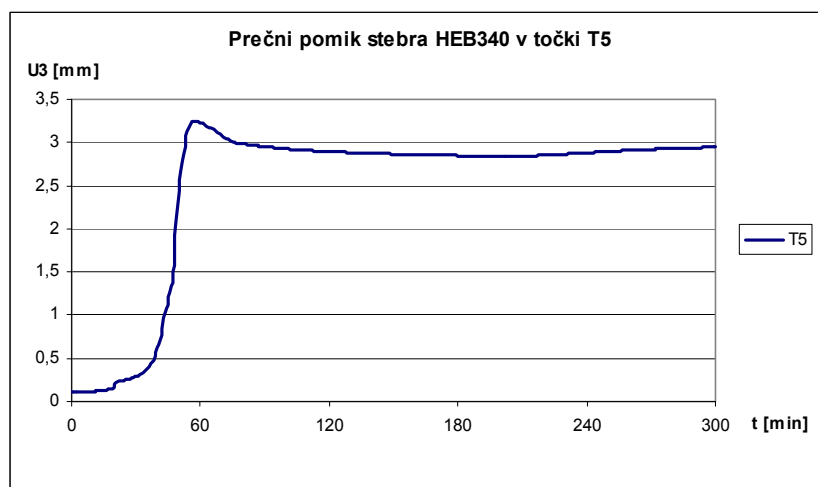


Slika 143: Upogib U2 na mestu T3

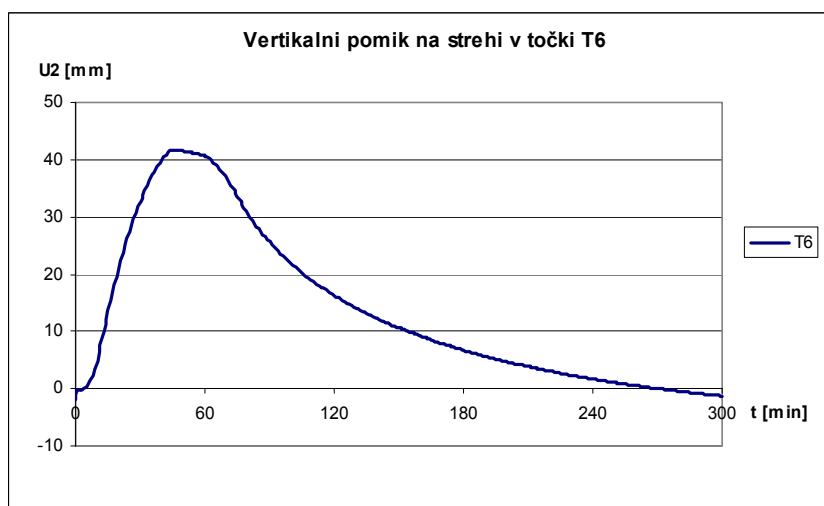


Slika 144: Pomik U2 na mestu T4

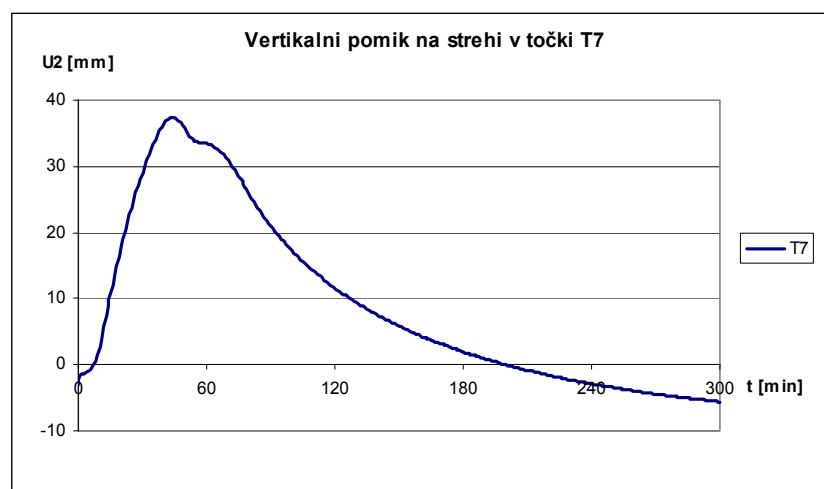




Slika 145: Pomik U3 na mestu T5



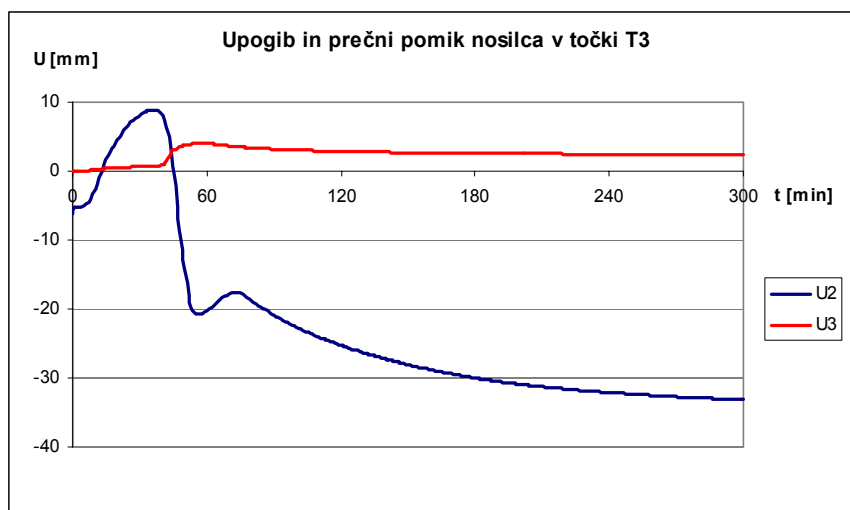
Slika 146: Pomik U2 na mestu T6



Slika 147: Pomik U2 na mestu T7

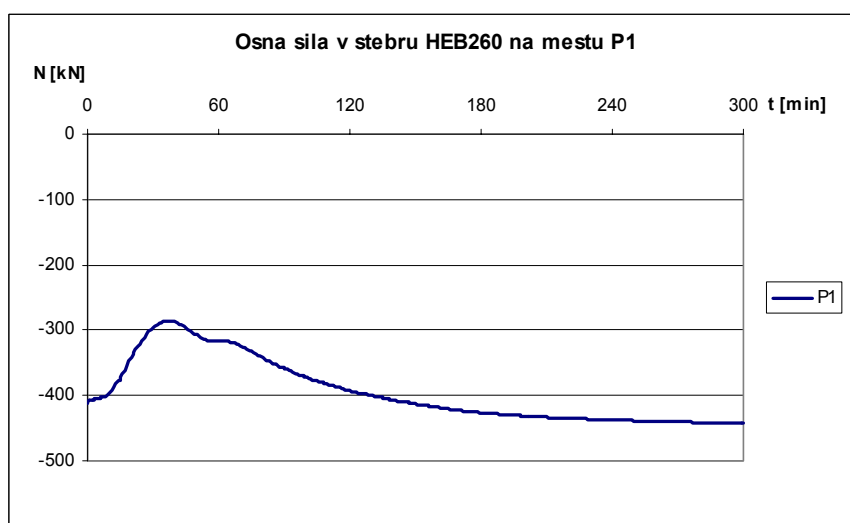
Od slike 141 pa do slike 147 so prikazani pomiki v opazovanih točkah (slika 109) pri požaru v bolnišnici, pri neizoliranih nosilnih elementih.

Na sliki 148 je prikazana primerjava med prečnim pomikom in upogibom v nosilcu v točki T3, ko nosilci niso bočno podprti.

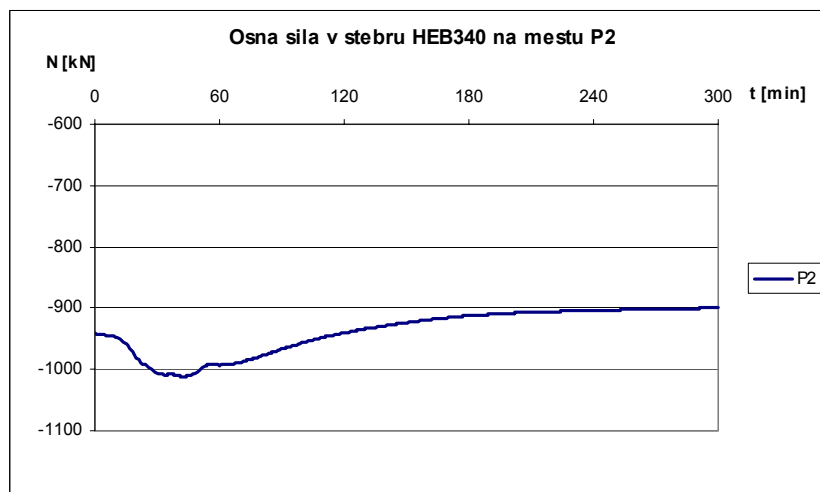


Slika 148: Pomik U3 in upogib U2 na mestu T3, ko nosilci niso bočno podprti

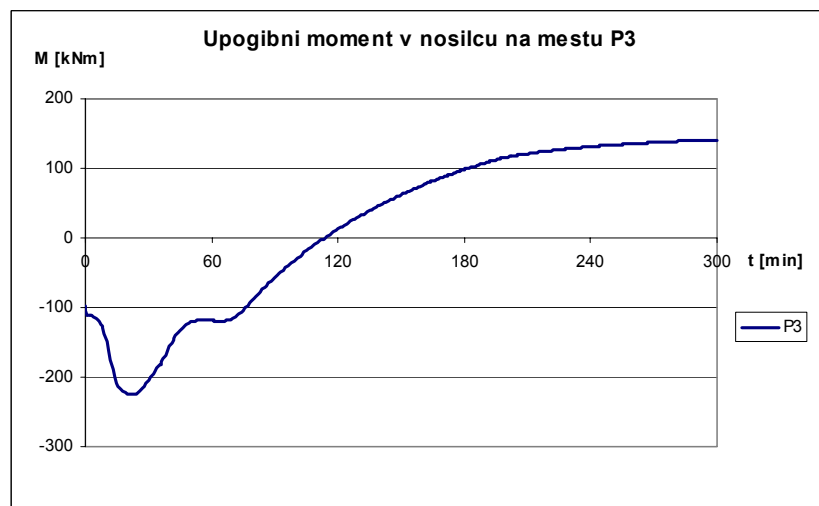
Sledijo slike od 149 do 153, ki prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa za okvir 2 v bolnišnici.



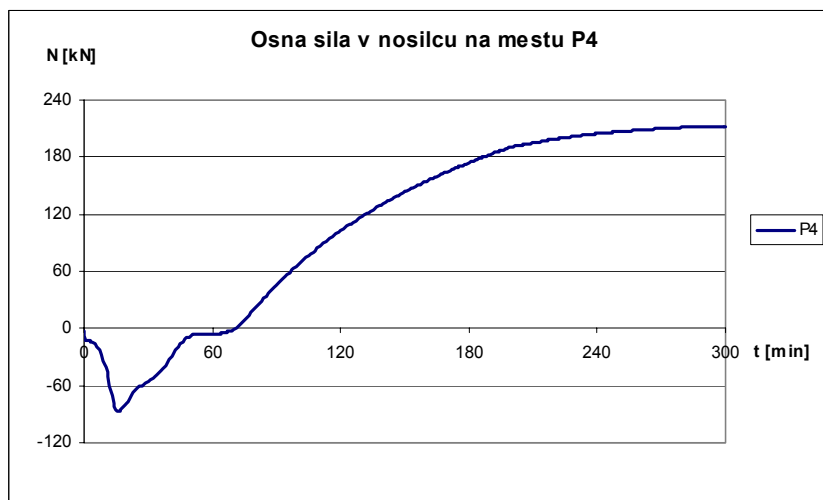
Slika 149: Oсна sila N na mestu P1



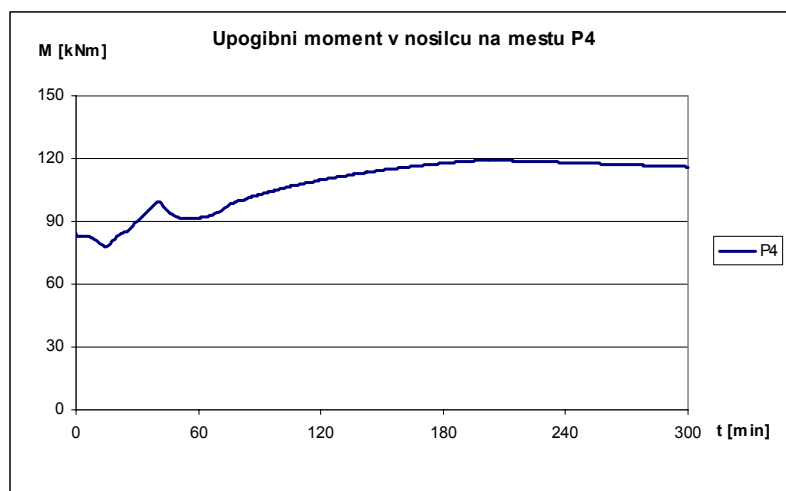
Slika 150: Osna sila  $N$  na mestu P2



Slika 151: Upogibni moment  $M$  na mestu P3

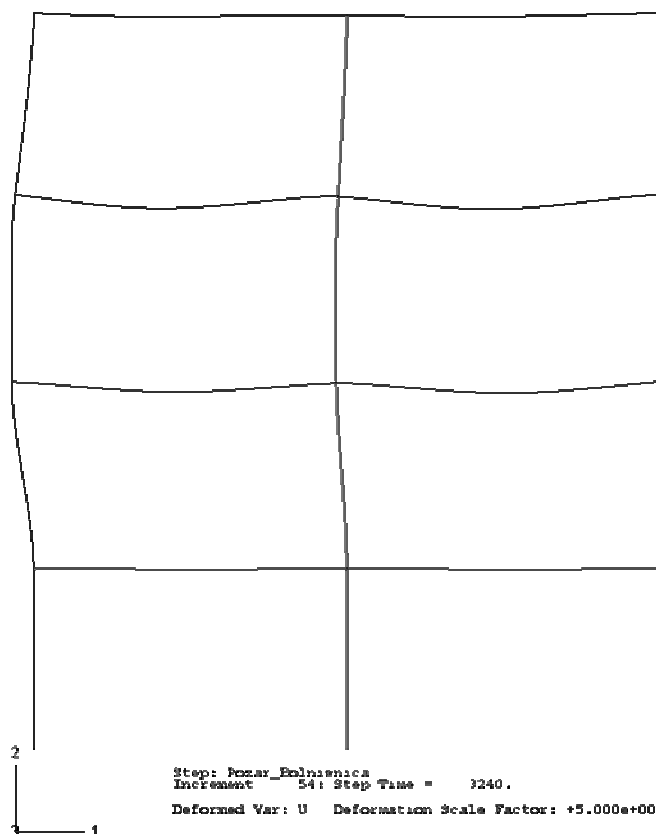


Slika 152: Osna sila  $N$  na mestu P4



Slika 153: Upogibni moment  $M$  na mestu P4

Slika 154 prikazuje deformirano obliko okvira 2 pri požaru v bolnišnici v času  $t = 54$  min in maksimalni temperaturi nosilnih elementov  $610$  °C. Deformacije so povečane za faktor 5!

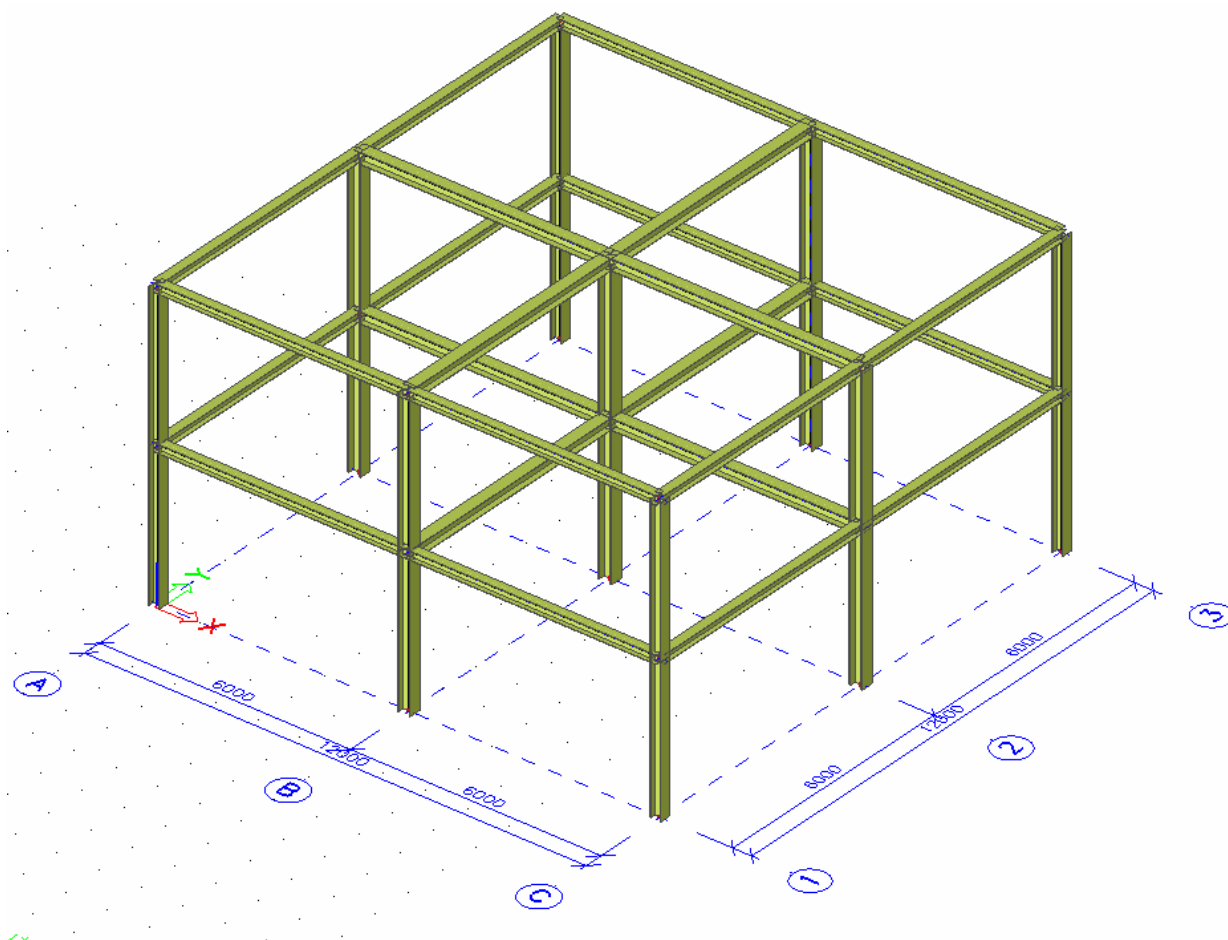


Slika 154: Deformirana oblika neizoliranega okvira 2 pri požaru v bolnišnici v času  $t = 54$  min

Požarna analiza okvira 2 je bila izvedena tudi za primer, ko se temperatura plinov v požarnem sektorju spreminja v skladu z ISO-834. Nezaščiten okvir lahko prevzame podano obtežbo v primeru požara, dokler temperatura v nosilnih elementih (steber HEB260) ne preseže 673 °C.

Različni požari pripeljejo do različnih rezultatov, kar je jasno razvidno iz predhodnjih primerov! Maksimalna dosežena temperatura v nosilnih elementih je ključni podatek, ki nam pove, ali je potrebna dodatna protipožarna zaščita teh elementov! Požar v trgovini pri obeh okvirih zahteva dodatno protipožarno zaščito, medtem ko za požar v bolnišnici ta zaščita ni potrebna, saj je maksimalna temperatura v nosilnih elementih bistveno nižja kot pri požaru v trgovini!

#### 4.6 Požarna analiza prostorskega okvira



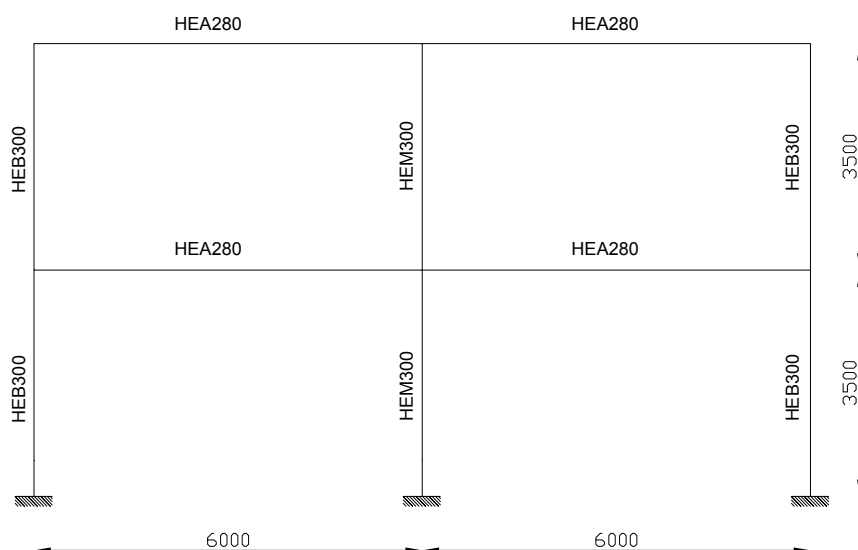
Slika 155: Prostorski okvir

V nadaljevanju je predstavljena požarna analiza prostorskega okvira (slika 155). Obravnavan je naravni požar v trgovini. Izbrani prostorski okvir je simetričen v obeh smereh in zajema dve etaži po 3,5 m. Dolžina in širina objekta sta torej enaki: 12 m (dve polji po 6 m). Stebri so toga vpeti v temelje, spoji prečka-steber so polnonosilni momentni spoji.

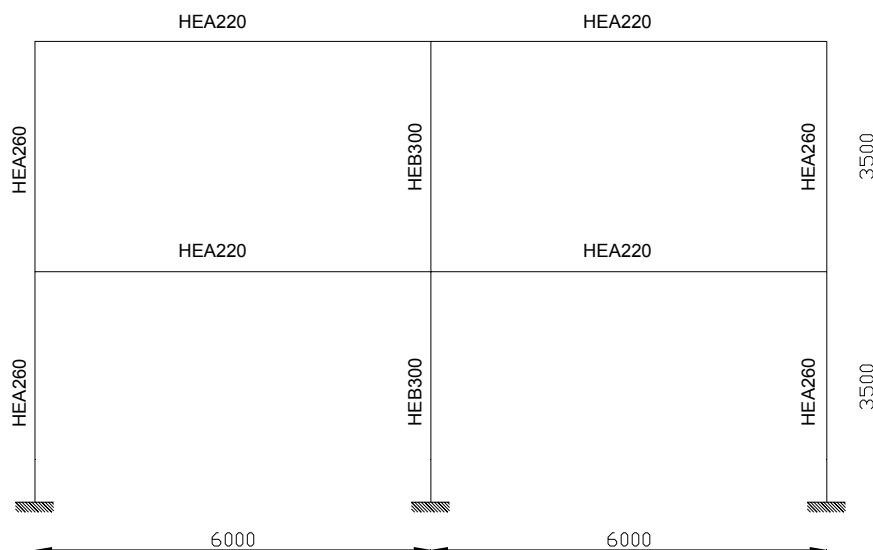
Glede na zasnovo okvira je predpostavljeno, da so zunanji stebri zaščiteni pred požarom z mavčno oblogo, medtem ko je za prečke in notranji steber potrebno preveriti, ali je potrebna dodatna izolacija oziroma zaščita pred požarom! V izhodiščni varianti je torej predpostavljeno, da so zunanji stebri zaščiteni z 10 mm debelo mavčnokartonsko ploščo, da so prečke nezaščitene in ogrevane iz treh strani (zgoraj je plošča) in da je notranji steber nezaščiten in ogrevan iz vseh štirih strani! Vsakemu nosilnemu elementu je podana ustrezna temperatura profila v odvisnosti od časa. Požar je opazovan prvih 120 minut.

Za okvir je bila narejena analiza v mejnem stanju nosilnosti (MSN), mejnem stanju uporabnosti (MSU) in potresna analiza! Izbrani so bili sledeči profili (sliki 156 in 157):

- notranji steber: **HEM300**
- zunanji vmesni stebri: **HEB300**
- zunanji vogalni stebri: **HEA260**
- zunanje prečke: **HEA220**
- notranje prečke: **HEA280**



Slika 156: Izbrani profili v notranjem okviru (os 2)

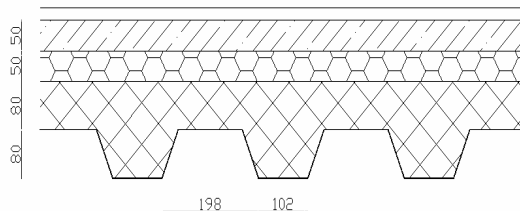


**Slika 157: Izbrani profili v zunanjem okviru (os 1 in 3)**

Upoštevana je bila sledeča obtežba:

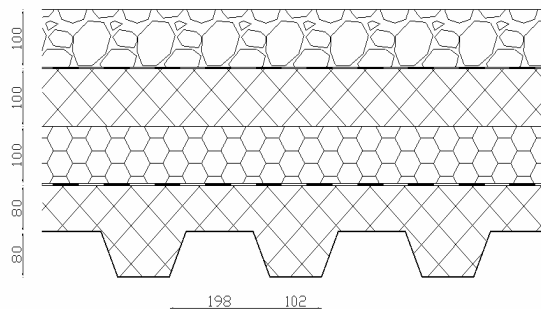
a) lastna in stalna obtežba:

- lastna teža nosilnih elementov
- stalna obtežba v medetaži:  $g = 5,5 \text{ kN/m}^2$  (slika 158)
  - zaključni sloj
  - cem. arm. estrih – 5cm
  - TI – 5cm
  - sovprežna plošča – 16cm
  - pločevina – 1.1 mm ( Multideck 80-V2 )



**Slika 158: Medetažna konstrukcija**

- stalna obtežba na strehi:  $g_s = 7,9 \text{ kN/m}^2$  (slika 159)
  - nasutje – 10cm
  - HI
  - naklonski beton – 10cm
  - TI – 10cm
  - parna zapora
  - sovprežna plošča – 16cm
  - pločevina – 1.1mm (Multideck 80-V2)



**Slika 159: Strešna konstrukcija**

## b) spremenljiva obtežba:

- koristna obtežba (trgovina):  $q = q_k$  (trgovina) = 4,0 kN/m<sup>2</sup>
- sneg (cona C):  $q_s = 1,6$  kN/m<sup>2</sup>
- veter (koncentrirane sile v višini vsake etaže):  
 vmesni steber:  $W_1 = 17,7$  kN ;  $W_S = 8,9$  kN  
 vogalni steber:  $W_1' = 8,9$  kN ;  $W_S' = 4,4$  kN

## c) potres:

- metoda nadomestnih horizontalnih sil (koncentrirane sile v višini vsake etaže):  
 vmesni steber:  $F_1 = 38,3$  kN ;  $F_S = 88,5$  kN  
 vogalni steber:  $F_1' = 19,1$  kN ;  $F_S' = 44,2$  kN

Potrersna analiza je bila izvedena samo v Y smeri glede na globalni koordinatni sistem, saj so bili tako dobljeni merodajni upogibi stebrov okoli šibke osi in merodajni pomiki konstrukcije!

Pri prostorskem okviru je pri analizi v MSN upoštevana začetna globalna geometrijska nepopolnost  $\Phi = 1/260$ . Podobno kot pri predhodnjih dveh ravninskih okvirih se lokalne nepopolnosti pri računu notranjih sil po TDR lahko zanemarijo, ker velja enačba (5):

- steber HEA260:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{31,8}{93,9} = 0,34 \leq 0,5 \sqrt{\frac{86,8 \cdot 23,5}{231}} = 1,49$$

- steber HEB300:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{26,9}{93,9} = 0,29 \leq 0,5 \sqrt{\frac{149 \cdot 23,5}{496}} = 1,33$$

- steber HEM300:

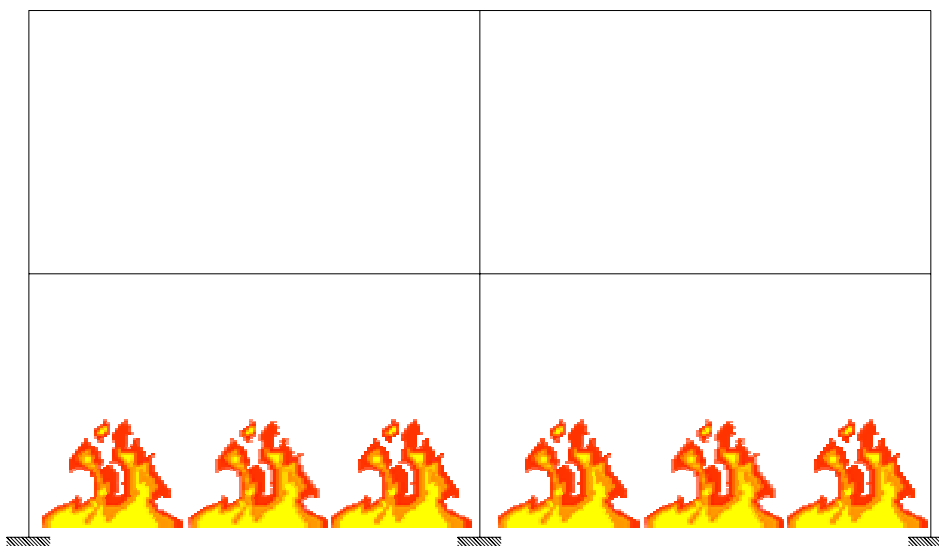
$$\bar{\lambda}_y = \frac{25}{93,9} = 0,27 \leq 0,5 \sqrt{\frac{303 \cdot 23,5}{1037}} = 1,31$$



Pri požarni analizi s programom Abaqus 6.6, so poleg predpisanih globalnih upoštevana še minimalne lokalne (ločne) nepopolnosti (stebri:  $e_0 = L/500$ )! Pri požarni analizi je upoštevana TDR, nelinearen odziv jekla S235 pri različnih temperaturah ter geometrijske nepopolnosti!

Za določitev temperatur v posameznih profilih je potrebna analiza s programom Ozone V2. Določiti je potrebno dimenzije požarnega sektorja, konstrukcijske sklope požarnega sektorja, velikost odprtin, namembnost prostora, gorljivo površino ter aktivne ukrepe za preprečitev požara, ki zmanjšujejo požarno obtežbo oz. jakost požara!

**Požarni sektor:** 12m x 12m



**Slika 160: Požar v spodnji etaži pri prostorskem okviru**

Požarni scenarij predvideva, da požar izbruhne po celotni spodnji etaži (slika 160).

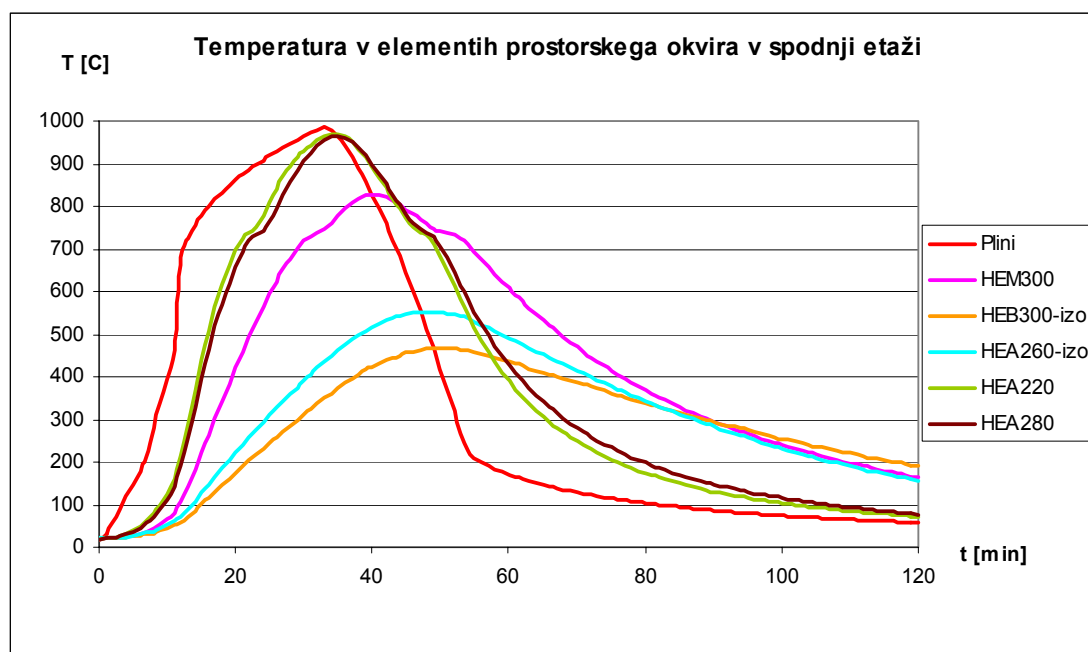
**Trgovina:** gorljiva površina 144 m<sup>2</sup>

Aktivni protipožarni ukrepi:

- avtomatsko zaznavanje požara s toploto
- avtomatsko gašenje z vodo: šprinklerji
- zunanje gasilske enote
- varne dostopne poti

- prisotnost naprav za ročno gašenje požara

Slika 161 prikazuje temperaturo nosilnih elementov prostorskega okvira v spodnji etaži za požarni sektor v **trgovini**. Vsi zunanji stebri (HEB300 in HEA260) so zaščiteni z 10mm debelo mavčno ploščo, vse prečke (HEA220 in HEA280) so nezaščitene in ogrevane iz treh strani, notranji steber HEM300 pa je popolnoma nezaščiten in izpostavljen požaru iz vseh strani! Za primerjavo je poleg podana še temperatura plinov v spodnji etaži v odvisnosti od časa! V kolikor primerjamo potek temperature med prečkami in notranjim stebrom je jasno razvidno, kolikšen vpliv ima kompaktnost prereza na maksimalno doseženo temperaturo v profilu!

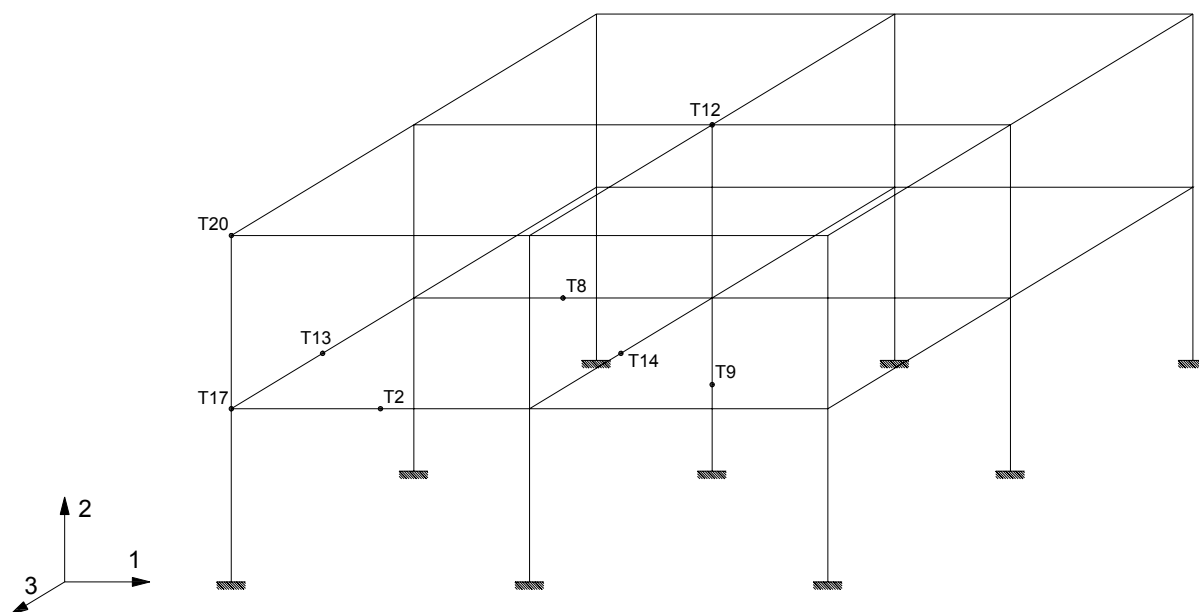


**Slika 161: Potek temperature v nosilnih elementih prostorskega okvira zaradi požara**

V nadaljevanju so prikazani rezultati požarne analize s programom Abaqus. Prikazani so pomiki v karakterističnih točkah na prostorskem okviru. Predvideno je, da so nosilci bočno podprti! Pomiki so podani glede na osi globalnega koordinatnega sistema označenega na spodnji sliki 162!

Požarna obtežna kombinacija za prostorski okvir:  $(g+g_s) + 0,7q$

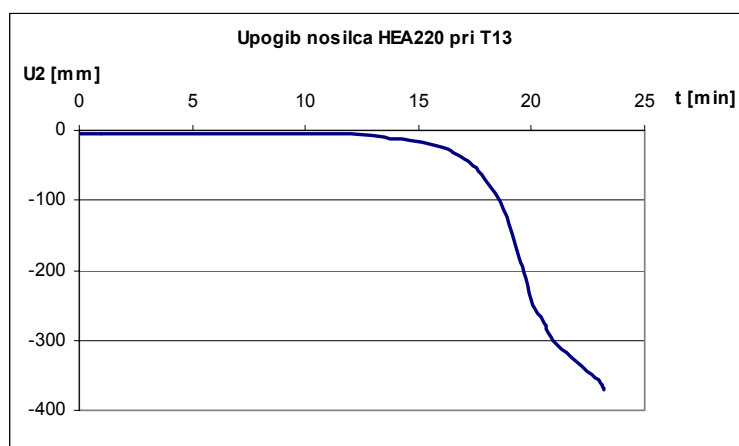
Slika 162 prikazuje pozicije točk pri prostorskem okviru, kjer so bili zabeleženi pomiki.



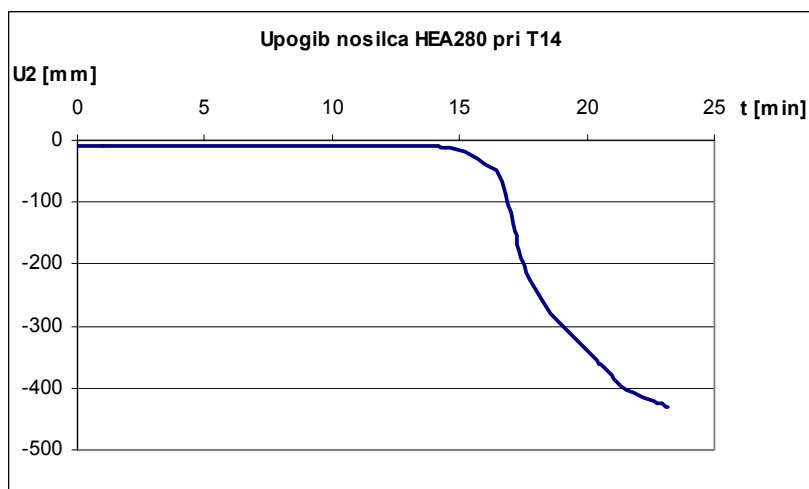
**Slika 162: Pozicije karakterističnih točk na prostorskem okviru**

a) **Nezaščiten okvir:** srednji stebel je nezaščiten, prečke so nezaščitene in ogrevane iz treh strani, zunanji stebri so zaščiteni

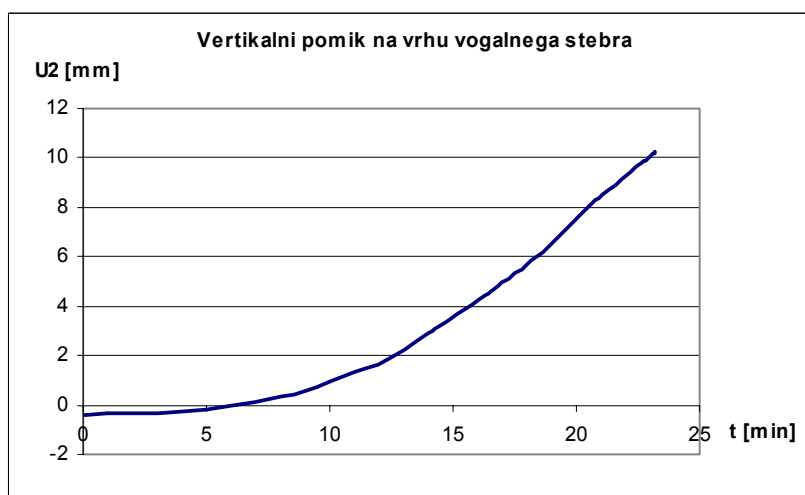
Na slikah od 163 do 169 so prikazani pomiki na nosilnih elementih prostorskega okvira v primeru požara, kjer nosilci in notranji stebel niso izolirani.



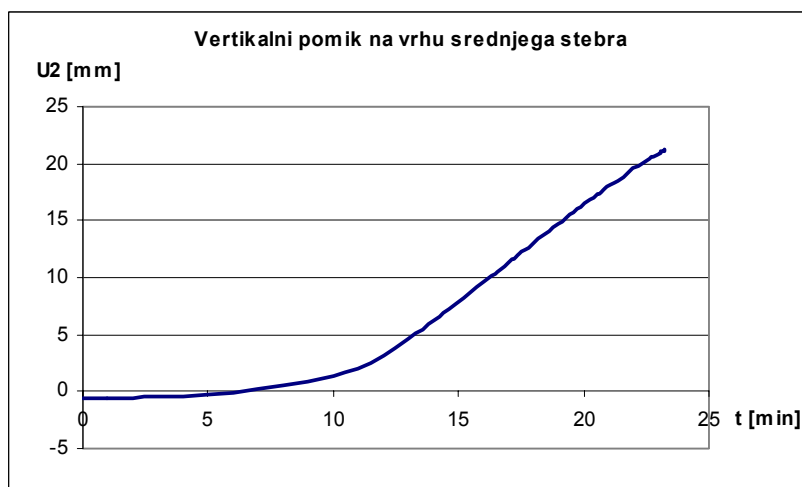
**Slika 163: Upogib U2 na mestu T13**



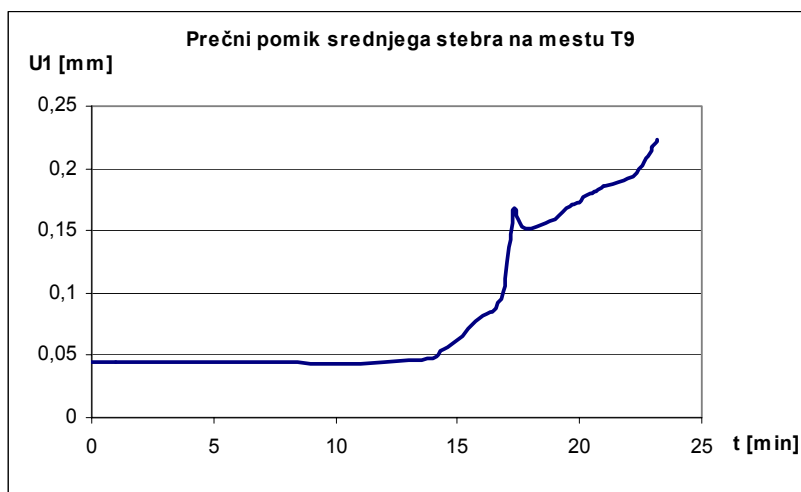
Slika 164: Upogib U2 na mestu T14



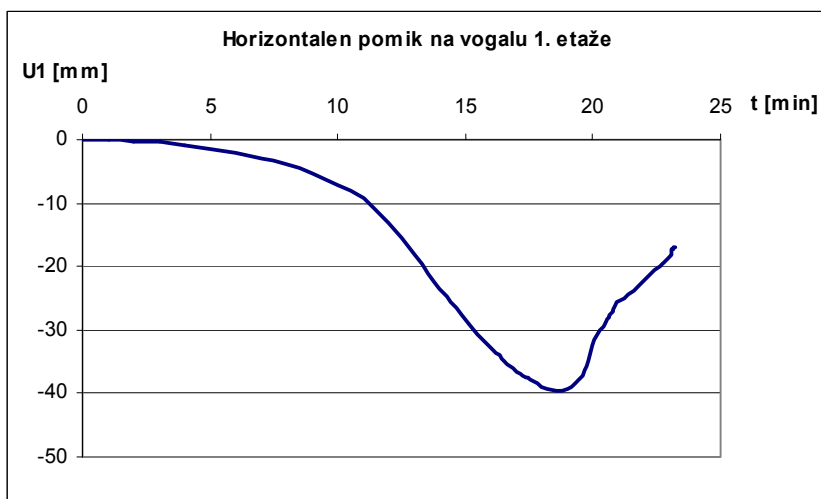
Slika 165: Vertikalni pomik U2 na mestu T20



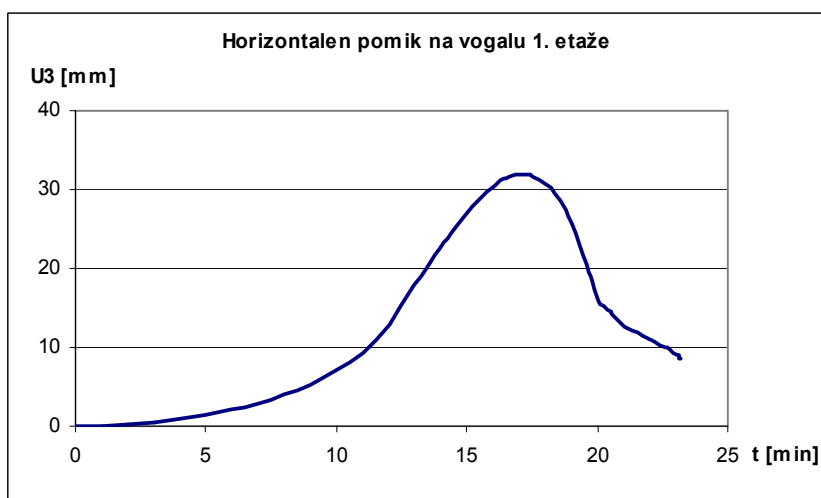
Slika 166: Vertikalni pomik U2 na mestu T12



Slika 167: Prečni pomik U1 na mestu T9

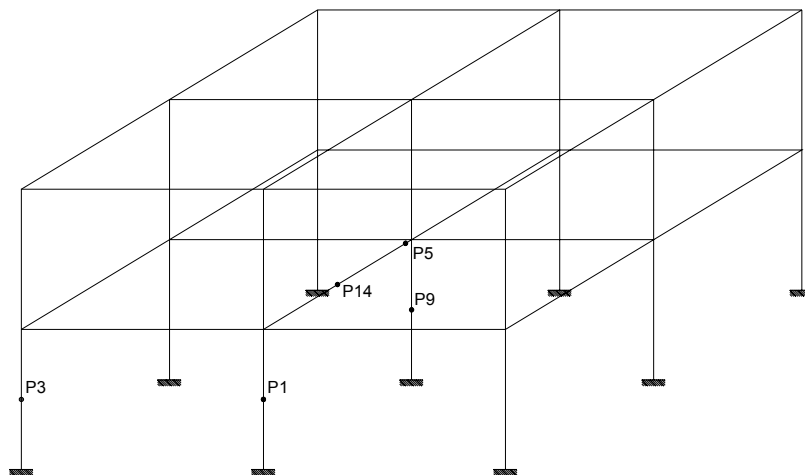


Slika 168: Horizontalni pomik U1 na mestu T17

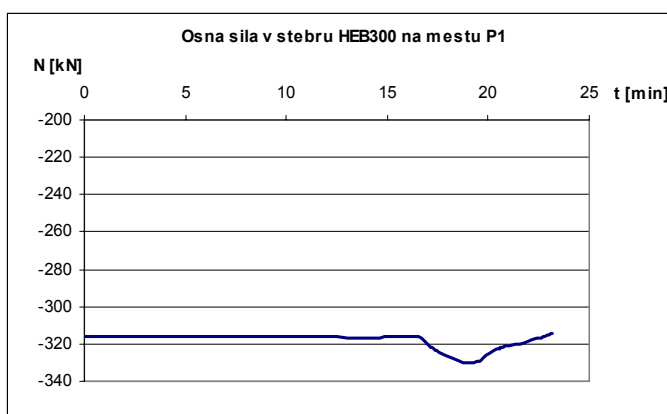


Slika 169: Horizontalni pomik U3 na mestu T17

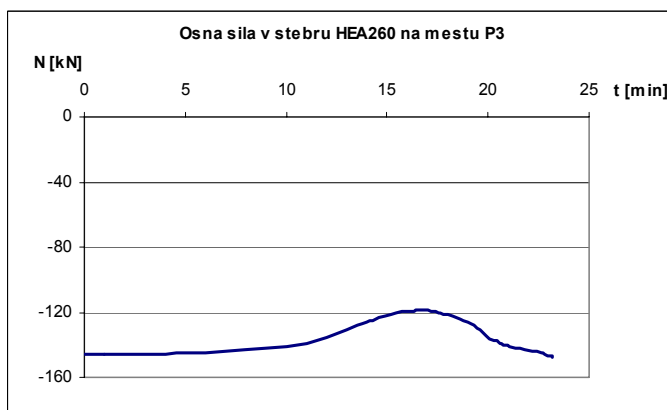
Naslednje krivulje (slike od 171 do 176) prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa. Notranje sile so bile preverjene na mestih, ki so označeni na sliki 170!



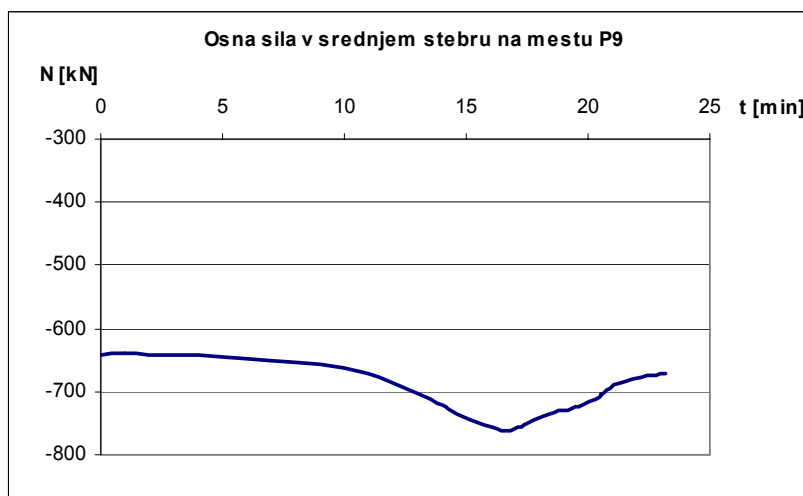
Slika 170: Pozicije opazovanih notranjih sil v prostorskem okviru



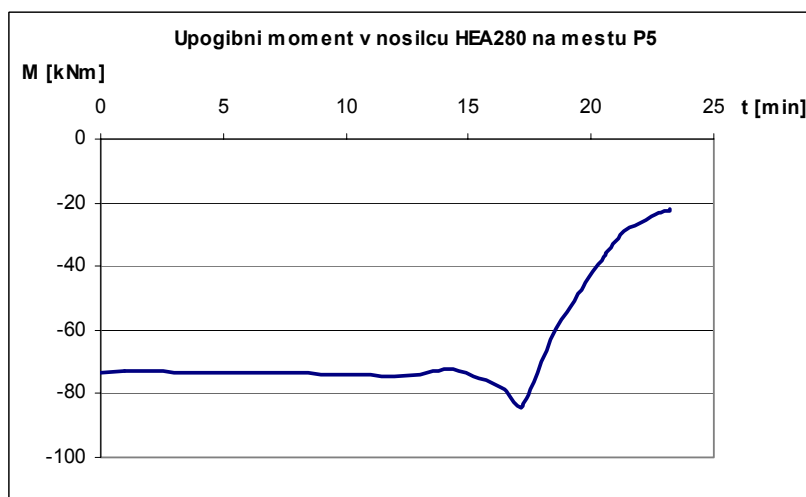
Slika 171: Osna sila N na mestu P1



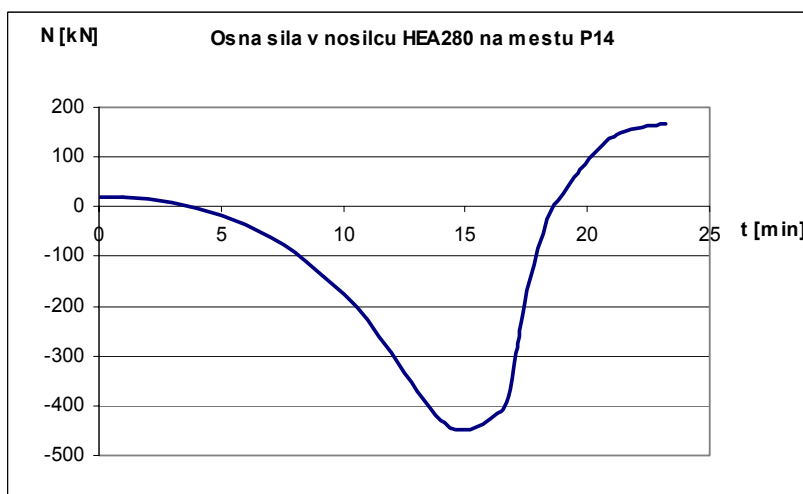
Slika 172: Osna sila N na mestu P3



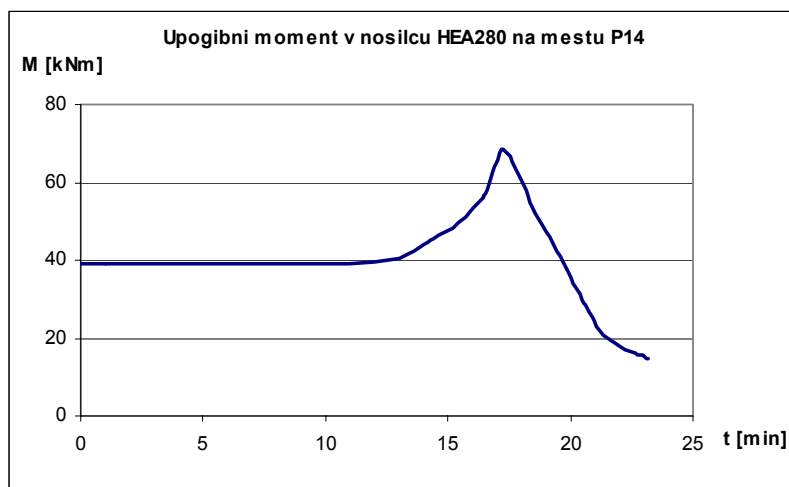
Slika 173: Osna sila N na mestu P9



Slika 174: Upogibni moment M na mestu P5

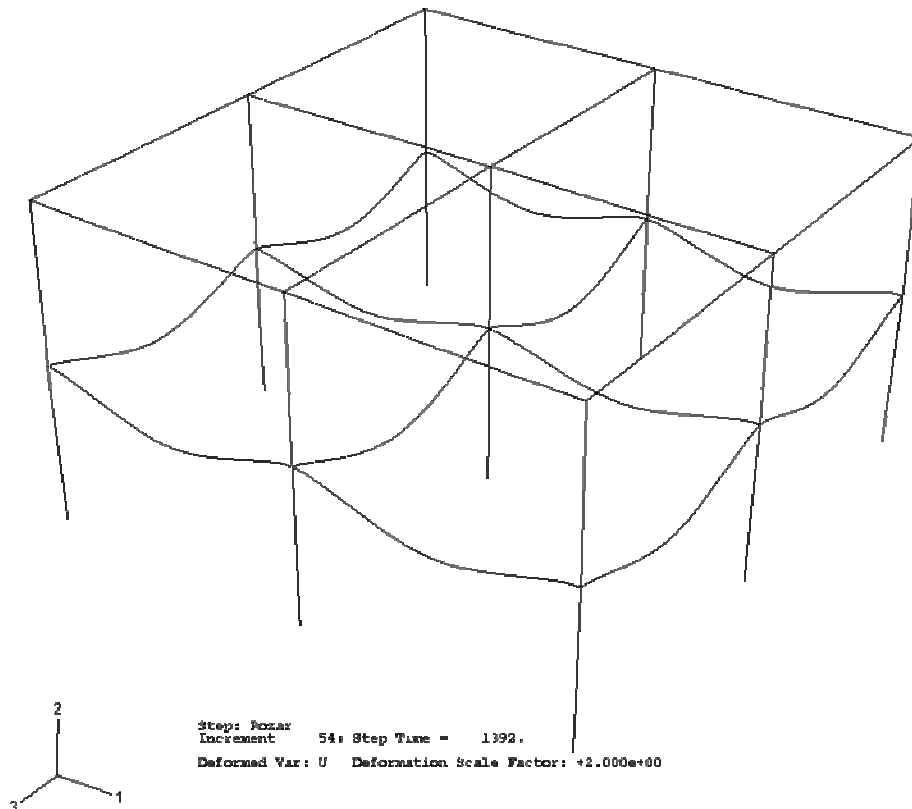


Slika 175: Osna sila N na mestu P14



Slika 176: Upogibni moment M na mestu P14

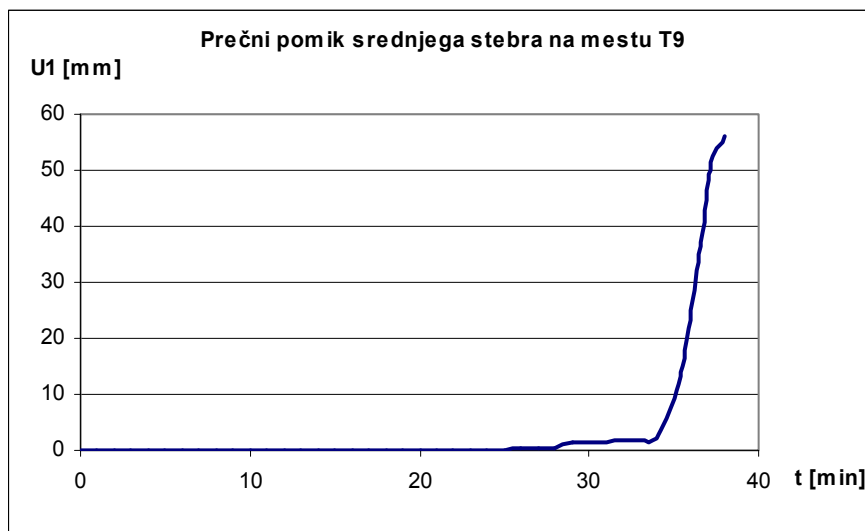
Analiza se v Abaqusu ustavi pri  $t = 23\text{min } 12\text{s}$ , ker prečke niso sposobne prevzeti podane obremenitve pri pripadajoči temperaturi ( $755\text{ }^\circ\text{C}$ )! Slika 177 prikazuje deformiran prostorski okvir tik preden se analiza ustavi. Deformacije so povečane za faktor 2!



Slika 177: Deformiran prostorski okvir v času  $t = 23\text{min } 12\text{s}$

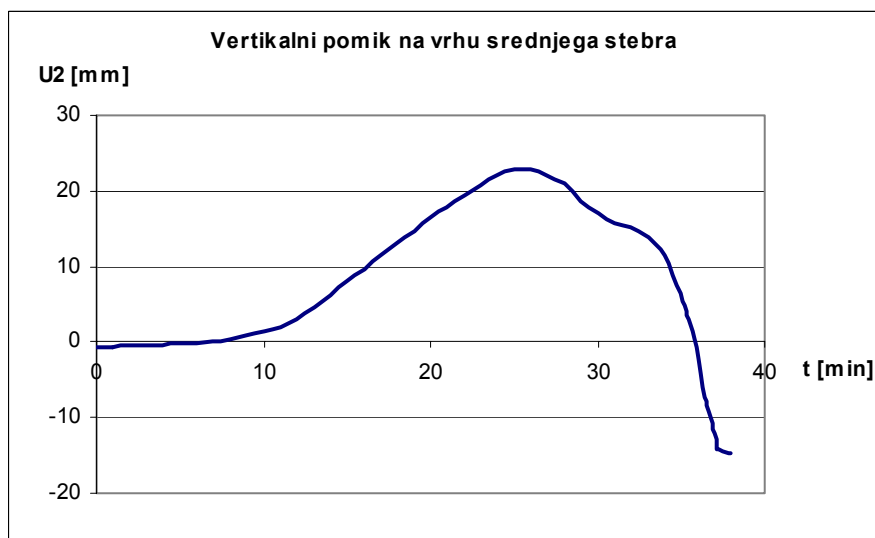


V naslednjem koraku se zaščitijo vse prečke z 10mm debelo mavčno ploščo! Steber HEM300 ostane nezaščiten! V tem primeru se analiza izvede do  $t = 37\text{min } 9\text{s}$ , potem pa steber odpove oziroma pri temperaturi  $810\text{ }^\circ\text{C}$  ni sposoben prevzeti podane obtežbe! Naraščanje prečnega pomika  $U_1$  v točki T9 pri stebru srednjem HEM300 nazorno prikazuje spodnja slika 178:



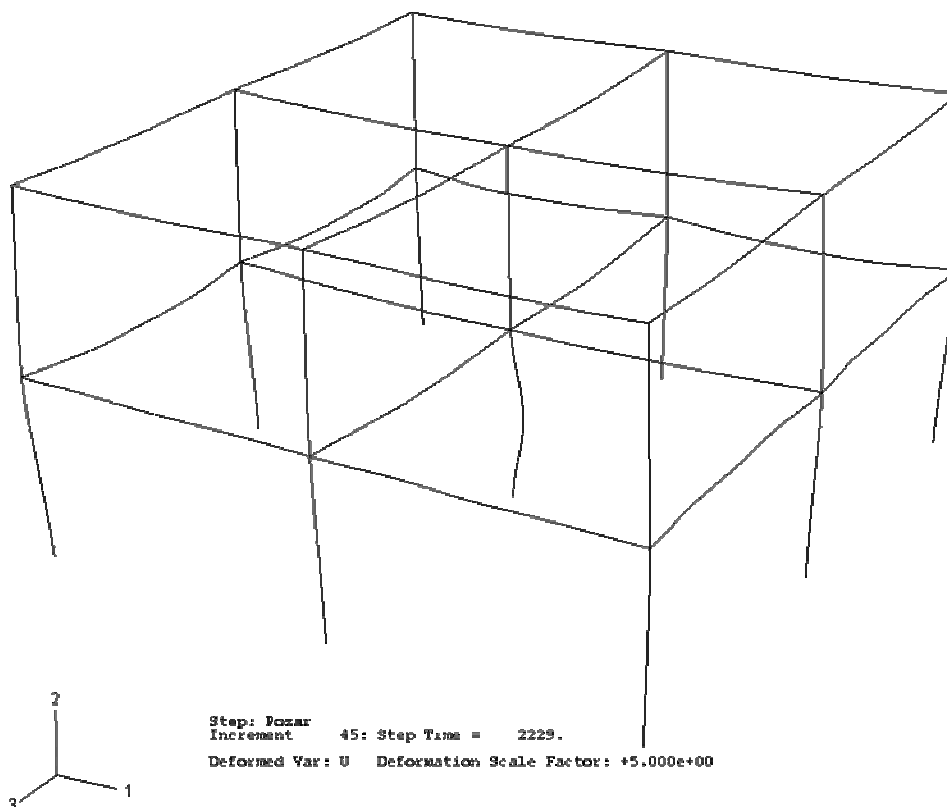
**Slika 178: Pomik točke T9 na srednjem stebru v prečni smeri U1**

Opazimo lahko, da začne prečni pomik  $U_1$  naraščati po 25 minutah požara, kar pripelje do dejstva, da se steber začne uklanjati in se zato tudi vrh srednjega stebra začne pomikati navzdol, kar je razvidno iz slike 179!



**Slika 179: Pomik U2 na vrhu srednjega stebra**

Deformirano obliko prostorskega okvira preden pride do uklona v srednjem stebru prikazuje slika 180. Deformacije so povečane za faktor 5!

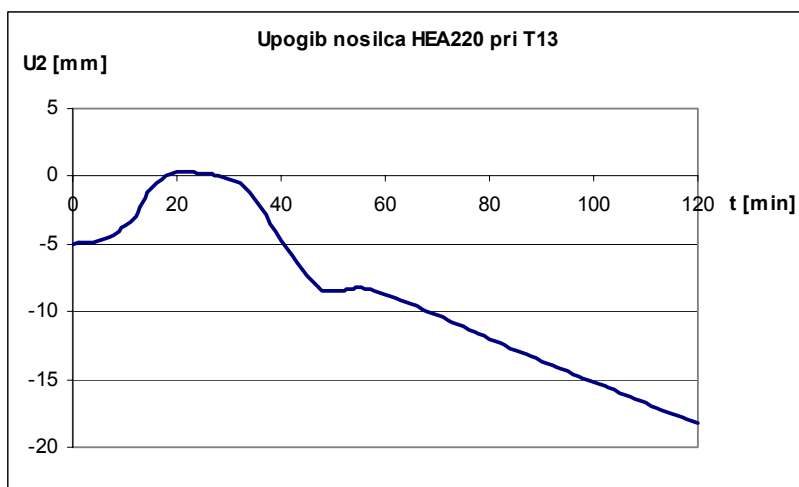


**Slika 180: Deformiran prostorski okvir pri izoliranih nosilcih v času  $t = 37\text{min } 9\text{s}$**

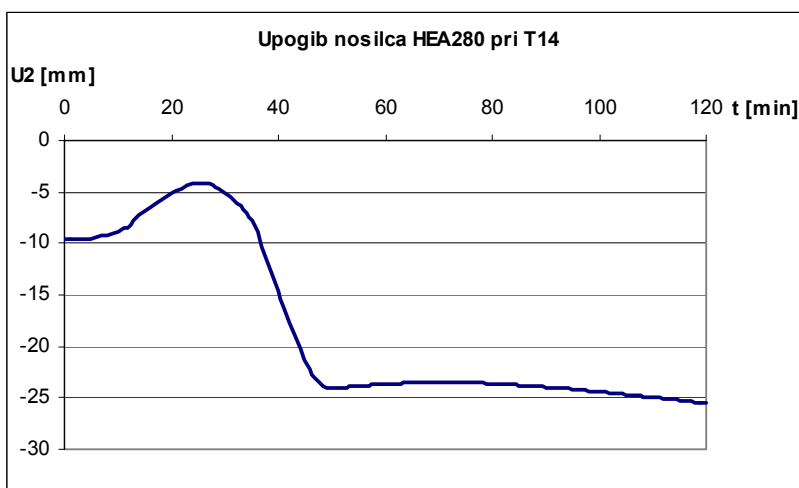
Sledi še zadnji korak, kjer se izolira še notranji steber HEM300 in se izvede kontrola ustreznosti izbranih elementov za podan naravni požar!

b) **Zaščiten okvir:** srednji steber je zaščiten z 10mm debelo mavčno ploščo, nosilci so zaščiteni in ogrevani iz treh strani, zunanji stebri so zaščiteni

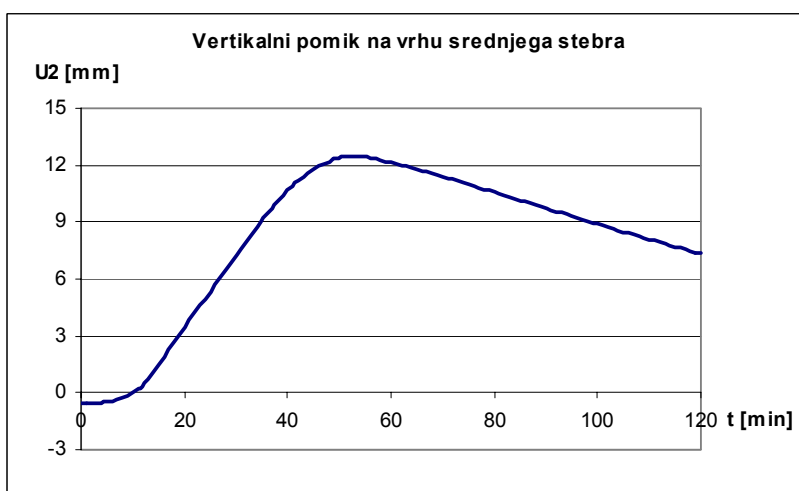
Na slikah od 181 do 187 so prikazani pomiki na nosilnih elementih prostorskega okvira v primeru požara, kjer so vsi nosilni elementi protipožarno zaščiteni.



**Slika 181: Upogib U2 na mestu T13**



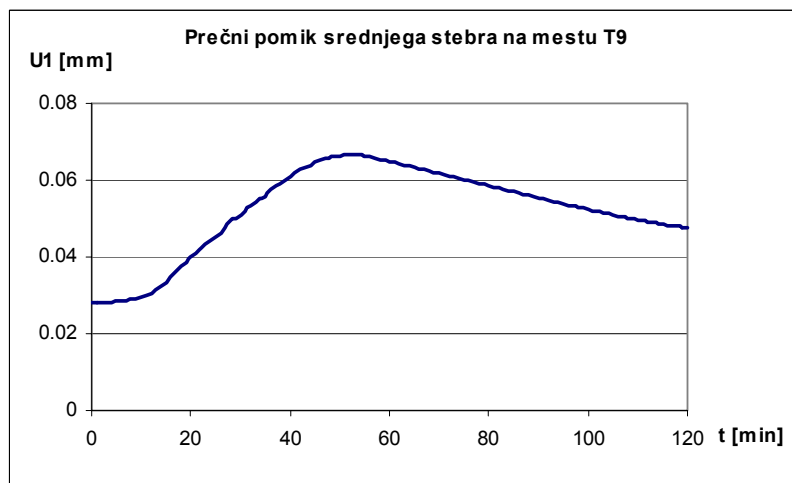
**Slika 182: Upogib U2 na mestu T14**



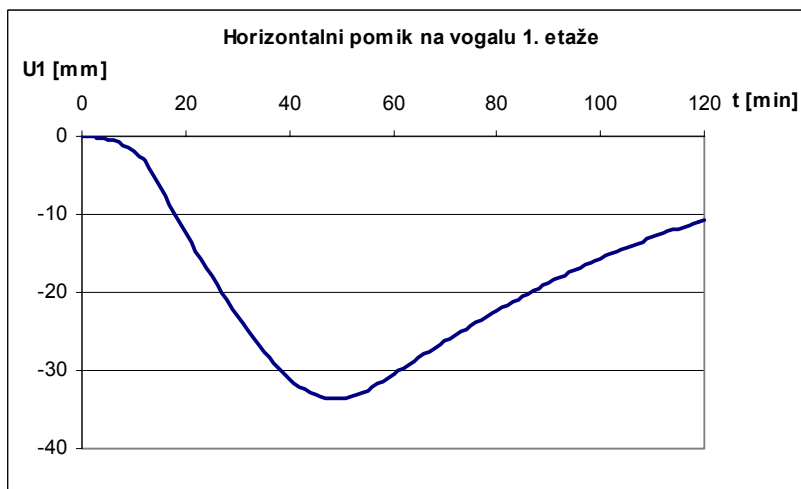
**Slika 183: Vertikalni pomik U2 na mestu T12**



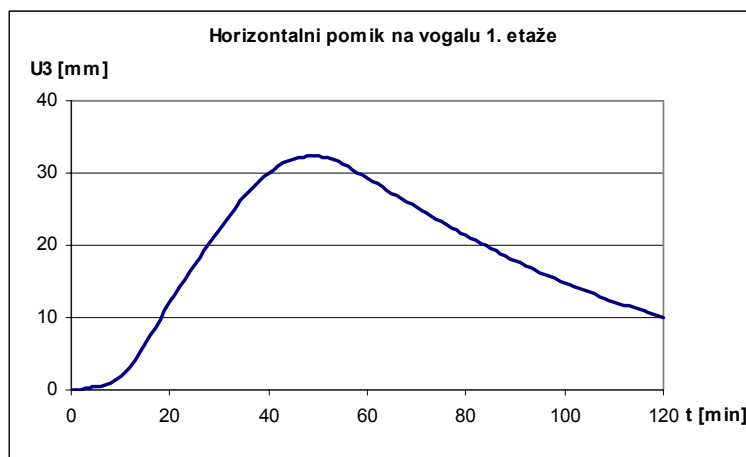
Slika 184: Vertikalni pomik U2 na mestu T20



Slika 185: Prečni pomik U1 na mestu T9

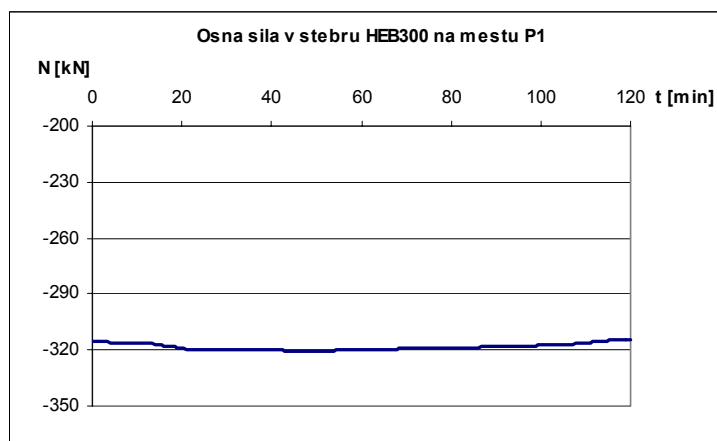


Slika 186: Horizontalni pomik U1 na mestu T17

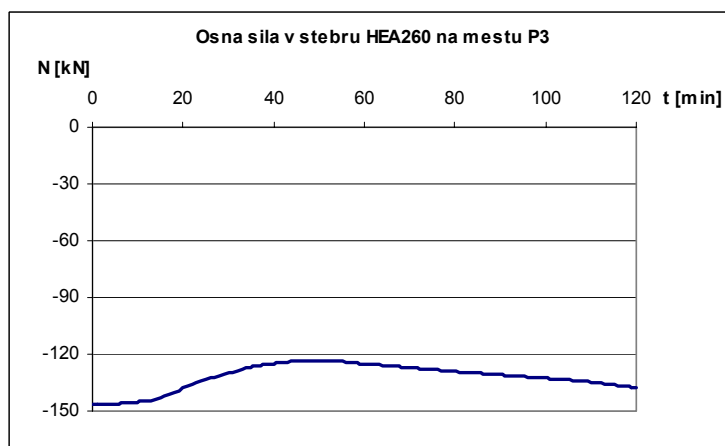


Slika 187: Horizontalni pomik U3 na mestu T17

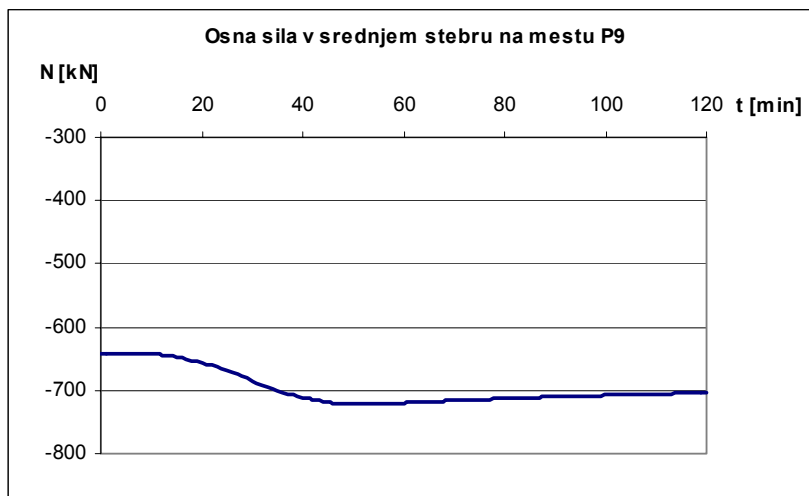
Naslednje slike (od 188 do 193) prikazujejo potek osnih sil in upogibnih momentov v odvisnosti od časa za požarno zaščiteno prostorski okvir.



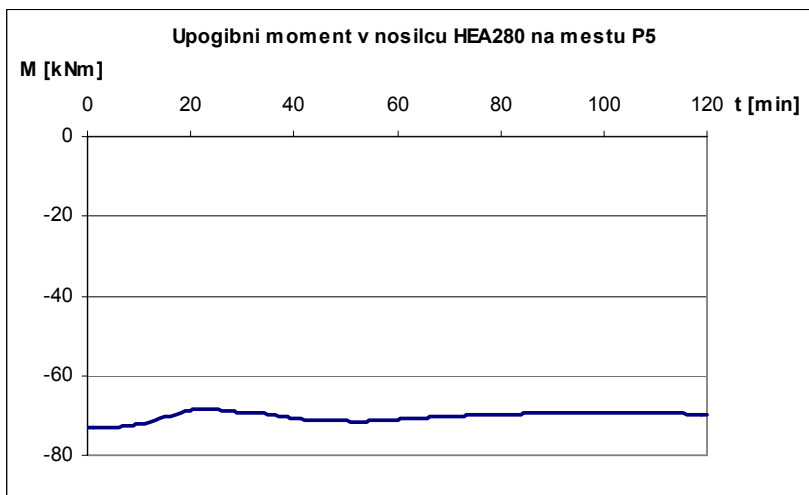
Slika 188: Osna sila N na mestu P1



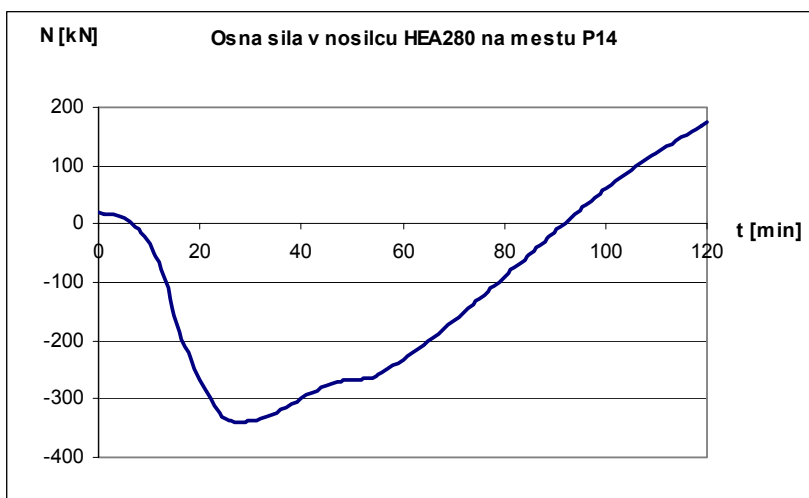
Slika 189: Osna sila N na mestu P3



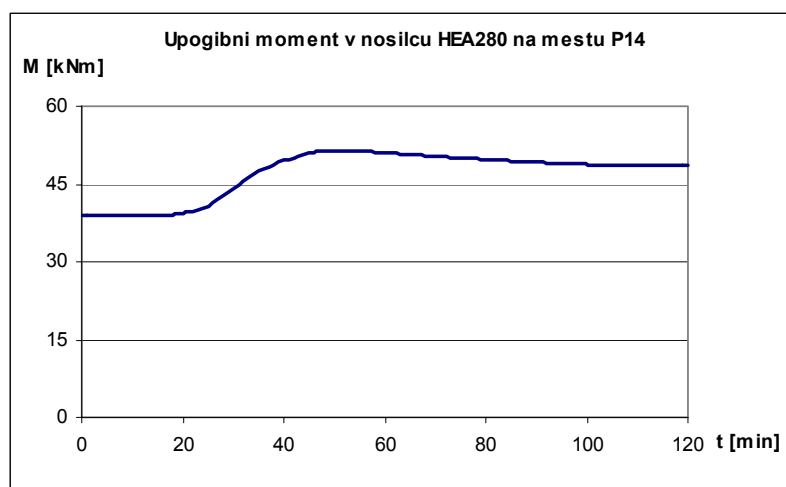
Slika 190: Osna sila N na mestu P9



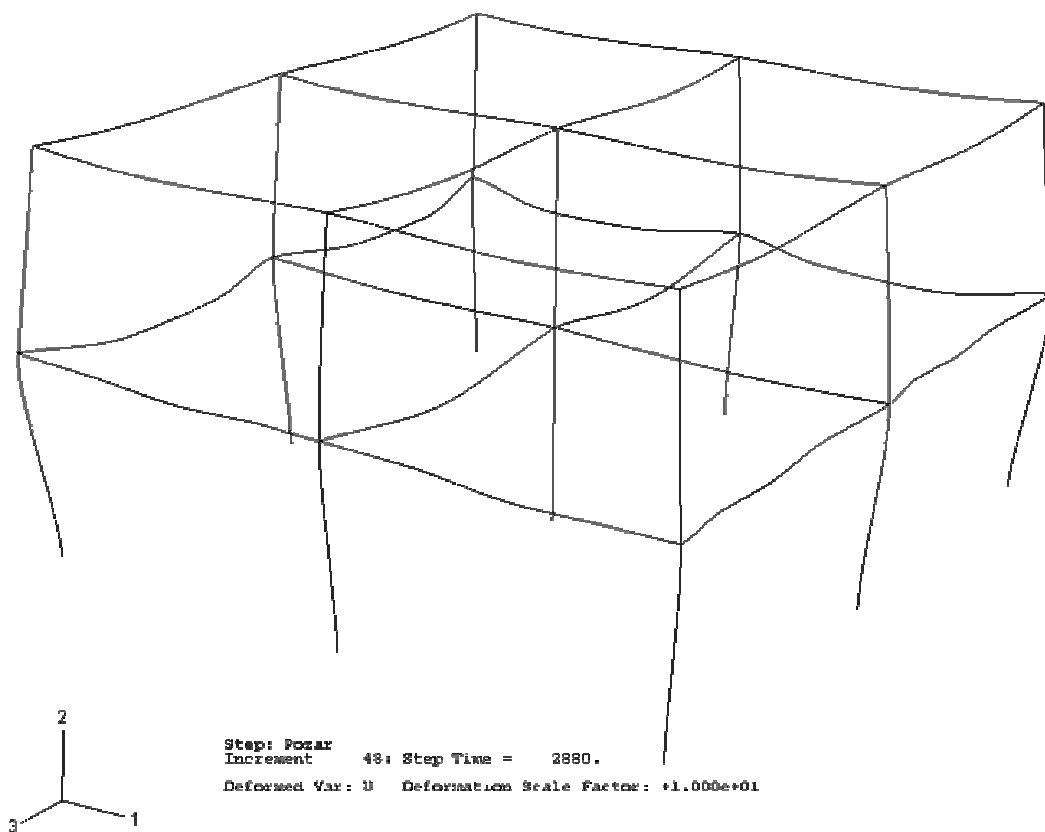
Slika 191: Upogibni moment M na mestu P5



Slika 192: Osna sila N na mestu P14

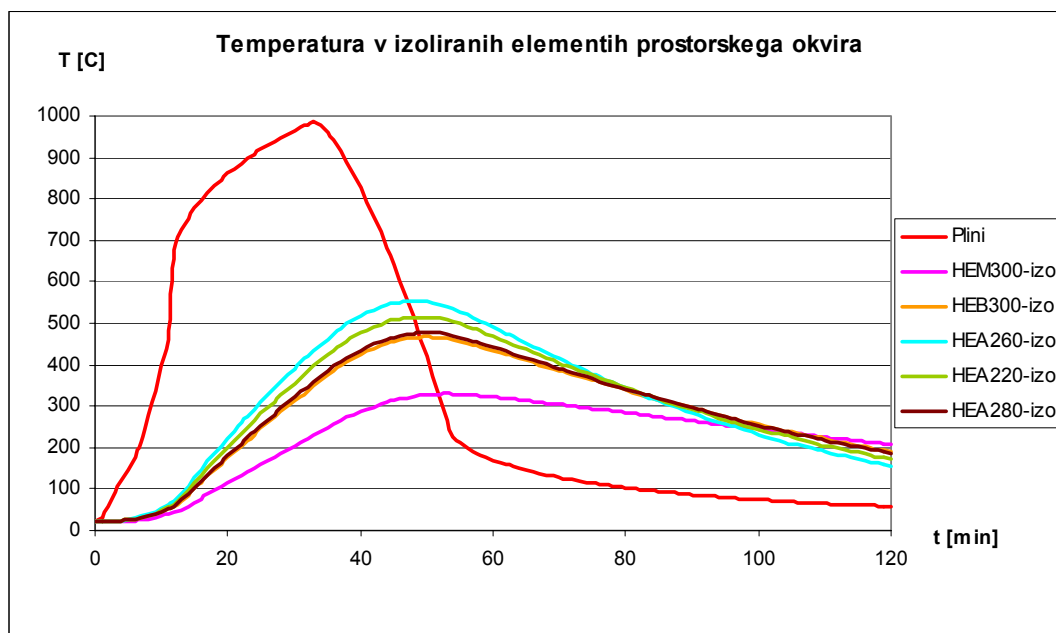


Slika 193: Upogibni moment M na mestu P14



Slika 194: Deformiran prostorski okvir pri protipožarno izoliranih nosilnih elementih  
v času  $t = 48\text{min}$

Slika 194 prikazuje deformirano obliko v celoti požarno zaščitenega okvira pri maksimalni temperaturi v času  $t = 48\text{ min}$ . Deformacije so povečane za faktor 10!



Slika 195: Potek temperatur pri požarno zaščiteneh nosilnih elementih

Slika 195 prikazuje potek temperature v izoliranih elementih, kjer so dosežene bistveno nižje maksimalne vrednosti kot pri nezaščiteneh elementih!

Požarna analiza prostorskega okvira je bila izvedena tudi za primer, ko se temperatura plinov v požarnem sektorju spreminja v skladu s standardno temperaturno krivuljo po ISO-834. Nezaščiten okvir lahko prevzame podano obtežbo v primeru požara, dokler temperatura v nosilnih elementih (nosilci HEA280) ne preseže 755 °C.



## 5 Zaključki naloge

Požarna analiza stavb z naprednimi metodami ima veliko prednosti pred pred požarno analizo stavb z uporabo standardnih temperaturnih krivulj. Napredne metode zagotavljajo, na podlagi številnih eksperimentov, zelo dobro napovedovanje obnašanja stavb v primeru požara. Za razliko od standardnih temperaturnih krivulj nam napredni požarni modeli podajajo potek temperature za izbrani požarni sektor in požarni scenarij, ki je zelo podoben dejanskemu. Dejstvo, da napredni požarni modeli, kot je OZone V2, uporabljajo pri svojih izračunih vpliv različnih parametrov, kot so: oblika in velikost požarnega sektorja, faktor odprtin, prezračevanje, namembnost prostorov, aktivni protipožarni ukrepi in karakteristična požarna obtežbe; pripelje do rezultatov, ki se zelo dobro ujemajo z dejanskimi. Zato je uporaba naprednih požarnih modelov, za določanje temperatur v posameznem požarnem sektorju, povsem razumljiva.

Uporaba naprednih računskih modelov za analizo stavbe pri požarni obtežni kombinaciji omogoča vpogled v globalno obnašanje stavbe med požarom. Velika prednost naprednih računskih modelov pred poenostavljenimi računskimi modeli je v tem, da napredni modeli upoštevajo interakcijo posameznih konstrukcijskih elementov. To pomeni, da lahko analiziramo globalno obnašanje konstrukcije med požarom, kot je bilo to storjeno na prostorskem okviru v zadnjem delu naloge. V tej diplomski nalogi so bili za požarno analizo uporabljeni izključno linijski končni elementi, zato se rezultati dobljeni s programom Abaqus nekoliko manj natančni, kot bi bili z uporabo ploskovnih končnih elementov, vendar pa je zato čas, potreben za izračun, mnogo krajši. Kljub uporabi linijskih končnih elementov, pa je možen zelo dober vpogled v globalno obnašanje konstrukcije v primeru požara.

Glede na to, da je bil del standarda EN1991-1-2 razvit na osnovi programa OZone V2 in opravljenih testov, ter da program Abaqus 6.6 lahko izvaja analize, kjer upošteva temperaturno odvisne materialne lastnosti, lokalne in globalne geometrijske nepopolnosti, različne zveze deformacija-napetost zaradi spremenljive temperature materiala in nelinearne materialne lastnosti, lahko zaključimo, da se z uporabo omenjenih programov (OZone V2 in Abaqus 6.6) lahko izvajajo požarne analize jeklenih stavb z naprednimi metodami v skladu z Evrokodi.

## VIRI

Beg D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Cadorin JF, Pintea D., Franssen JM. 2001. The Design Fire Tool OZone V2.0 – Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests. Liege, University of Liege.

Schleich JB. 2006. Fire Safety in Buildings – "Architectural & Engineering Measures for some logic in fire safety". Slovenian Chamber of Engineers, Ljubljana. 23. – 25. October 2006. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije – IZS v sodelovanju z Odborom za jeklene konstrukcije – OJK.

Teden požarne varnosti konstrukcij. Zbornik mednarodnega seminarja. Ljubljana. 23. – 27. oktober 2006. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije – IZS v sodelovanju z Odborom za jeklene konstrukcije – OJK.

EN 1991-1-2. 2002. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire.

EN 1993-1-2. 2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

EN 1994-1-2. 2005. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

SIST EN 1993-1-1: 2004. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1-1: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 1991-1-1: 2004/A101. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – Del 1-1: Splošni vplivi – Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb – Nacionalni dodatek

Abaqus Version 6.6 Documentation. 2006. United States of America. Abaqus, Inc.