



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

DIPLOMSKI RAD

Sara Šeparović

Split, 2018.



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Analiza utjecaja puzanja pri visokim temperaturama kod aluminijskih konstrukcija

Diplomski rad

Sara Šeparović

Split, 2018.



Zahvala:

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP 2014-09-5711: Utjecaj deformacija od puzanja na nosivost čeličnih i aluminijskih stupova pri djelovanju požara. Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu odnose se na autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost.



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

Zahvala:

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Jošku Ožboltu i Hiteshu Laktaniu kao i ostalom osoblju instituta IWB u Stuttgartu koji su mi omogućili boravak i rad na institutu, stručnu pomoć i mnogo strpljenja pri izradi ovog rada.

Htjela bi se zahvaliti mentoru u Splitu prof. dr. sc. Ivici Boki i dr. sc. Neni Toriću što su mi bili dostupni i pomagali mi savjetima u svakom trenutku pisanja ovog rada.



STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT: Sara Šeparović
BROJ INDEKSA: 634
KATEDRA: Katedra za Metalne i drvene konstrukcije
PREDMET: Metalne konstrukcije

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: **Analiza utjecaja puzanja pri visokim temperaturama kod aluminijskih konstrukcija**

Opis zadatka: Za zadane dimenzije, materijal, geometriju i pridržanje stupa opterećenog uzdužnim, poprečnim silama i temperaturom potrebno je odrediti vrijeme i temperaturu pri kojoj dolazi do popuštanja zadanog stupa.

U Splitu, ožujak 2018.

Mentor:

prof.dr.sc. Ivica Boko

Komentor:

prof.dr.sc. Joško Ožbolt

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
doc.dr.sc. Veljko Srzić

Analiza utjecaja puzanja pri visokim temperaturama kod aluminijskih konstrukcija

Sažetak:

U radu je obrađen aluminijski stup "I" profila modeliran sa svojstvima aluminijske legure EN 6082AW - T6 na kojeg djeluju uzdužna i poprečna sila. Stup se postepeno zagrijava brzinom zagrijavanj od 2,5°C/min. U sklopu rada napravljena su dva modela stupa s dvije različite vrste pridrzanja u cilju pronalaska modela koji bi dao što realnije rezultate. Cilj je odrediti utjecaj puzanja pri visokim temperaturama kod aluminijskih konstrukcija.

Proračun je proveden za dva postupka nanošenja opterećenja. U prvom postupku je stup prvo zagrijan na zadanu temperaturu a zatim su nanesene sile i analizirano je vrijeme nakon nanošenja opterećenja do popuštanja stupa – stacionarne simulacije. U drugom slučaju prvo su nanesene sile te je onda stup zagrijavan sve do loma tj. tražila se temperatura pri kojoj će doći do popuštanja stupa – nestacionarne simulacije.

Ključne riječi:

Puzanje, aluminij, 6082 T6, slitina, temperatura, opterećenje

Influence of high-temperature creep on the behaviour of aluminium structures

Abstract:

This thesis presents an analysis of "I" shaped aluminium columns made of alloy EN 6082 AW - T6, loaded with axial compressive and vertical force. The column is heated by applying heating rate of 2.5°C/min. There are two models with two different types of support for the purpose of finding a model that has the most realistic results. The main task is to determine the influence of high-temperature creep on the behaviour of aluminum structures.

There are two different load application procedures. In the first procedure, the column is first heated to the target temperature. Afterwards, the force is applied and time to temperature exposure is measured from loading until the column failure - stationary simulation. In the second case the forces are applied first and then the column is heated up to failure. The critical temperature at which column experiences failure due to creep is determined by this kind of heating arrangement - transient simulation.

Keywords:

Creep, aluminium, 6082 T6, alloy, temperature, load

SADRŽAJ:

1	UVOD	3
1.1	Općenito	3
1.2	Geometrijske karakteristike.....	4
1.3	Pridržanja.....	5
1.4	Opterećenje.....	7
2	SVOJSTVA ALUMINIJA	11
2.1	Općenito o aluminiju	11
2.2	Aluminijska legura 6082	13
2.3	Materijalna svojstva aluminijskih legura.....	14
2.4	Mehanička svojstva aluminijskih legura	15
2.5	Termalna svojstva aluminijskih legura.....	21
3	TEORETSKA POZADINA PRORAČUNA	23
3.1	Općenito o računalnom programu MASA	23
3.2	Podatci unijeti u program MASA kako bi bio moguć proračun aluminija... Error! Bookmark not defined.	
4	REZULTATI PRORAČUNA – NESTACIONARNE SIMULACIJE	27
4.1	Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$	30
4.2	Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F2 = 549 \text{ kN}$	34
4.3	Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F3 = 610 \text{ kN}$	38
4.4	Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$	40
4.5	Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F2 = 549 \text{ kN}$	42
4.6	Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F3 = 610 \text{ kN}$	44
4.7	Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$	46
4.8	Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F2 = 549 \text{ kN}$	50
4.9	Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F3 = 610 \text{ kN}$	54
4.10	Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$	58
4.11	Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F2 = 549 \text{ kN}$	62
4.12	Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F3 = 610 \text{ kN}$	66
5	USPOREDBA REZULTATA ZA NESTACIONARNE SIMULACIJE	70
5.1	Rezultati modela 1 u smjeru osi Y	70
5.2	Rezultati modela 1 u smjeru osi Z.....	73
5.3	Rezultati modela 2 u smjeru osi Y	75
5.4	Rezultati modela 2 u smjeru osi Z.....	78
6	REZULTATI PRORAČUNA – STACIONARNE SIMULACIJE	81
6.1	Rezultati za MODEL 1 – Test 1 – bez puzanja	81
6.2	Rezultati za MODEL 1 – Test 2 – bez puzanja	84

6.3	Rezultati za MODEL 1 – Test 3 – bez puzanja	87
6.4	Rezultati za MODEL 1 – Test 4 – bez puzanja	90
6.5	Rezultati za MODEL 1 – Test 1 – sa puzanjem	93
6.6	Rezultati za MODEL 1 – Test 2 – sa puzanjem	97
6.7	Rezultati za MODEL 1 – Test 3 – sa puzanjem	100
6.8	Rezultati za MODEL 1 – Test 4 – sa puzanjem	103
6.9	Rezultati za MODEL 2 – Test 1 – bez puzanja	106
6.10	Rezultati za MODEL 2 – Test 2 – bez puzanja	110
6.11	Rezultati za MODEL 2 – Test 3 – bez puzanja	113
6.12	Rezultati za MODEL 2 – Test 4 – bez puzanja	116
6.13	Rezultati za MODEL 2 – Test 1 – sa puzanjem	119
6.14	Rezultati za MODEL 2 – Test 2 – sa puzanjem	124
6.15	Rezultati za MODEL 2 – Test 3 – sa puzanjem	128
6.16	Rezultati za MODEL 2 – Test 4 – sa puzanjem	132
7	USPOREDBA REZULTATA ZA STACIONARNE SIMULACIJE.....	135
7.1	Rezultati modela 1 u smjeru osi Y	135
7.2	Rezultati modela 1 u smjeru osi Z.....	137
7.3	Rezultati modela 2 u smjeru osi Y	139
7.4	Rezultati modela 1 u smjeru osi Z.....	141
8	ZAKLJUČAK.....	143
9	LITERATURA	144

1 UVOD

1.1 Općenito

Aluminij je metal koji je uz čelik najčešće korišten u građevinarstvu, on je jedini laki materijal koji se koristi u nosivim konstrukcijama. Aluminij je relativno nov konstruktivni materijal te se još uvijek vodi dosta istraživanja i pišu nove norme pri projektiranju.

1886. godine počinje široka primjena aluminija. 1893. odljeven je poznati kip Erosa na Piccadilly-u, dok je 1897. izrađena limena kupola crkve San Gioacchino u Rimu te je oboje još uvijek u jako dobrom stanju.

Aluminij je najbolje koristiti u slučajevima koji sami po sebi najbolje ističu najveće kvalitete aluminija, a to su mala težina i otpornost na koroziju. Takvi primjeri su:

- Krovni sustavi velikih raspona kod kojih je promjenjivo opterećenje malo u odnosu na vlastitu težinu, kao što je slučaj kod prostornih rešetkastih konstrukcija, kupola velikih raspona...
- Konstrukcije koje se nalaze daleko od radionica kod kojih troškovi prijevoza i montaže igraju ključnu ulogu pri odabiru materijala
- Konstrukcije koje su izložene korozivnom djelovanju kao što su hidrotehničke građevine, riječni mostovi, krovovi bazena...
- Konstrukcije sa pokretnim djelovima, kod kojih mala težina predstavlja znatnu uštedu električne energije

Jedan od većih nedostataka aluminija kao materijala za nosive konstrukcije je njegova mala otpornost na povišene temperature zbog niske temperature taljenja. Samo ponašanje aluminija u požarnim okolnostima nije dovoljno istraženo.[1]

U ovom diplomskom radu proveden je proračun aluminijskog stupa I profila izloženog djelovanju koncentriranih sila i temperaturnom djelovanju.

Provedeni su stacionarni (prvo zagrijavan stup i tek onda nanoseno opterećenje) i nestacionarni (prvo nanoseno opterećenje i onda zagrijavanje) testovi.

Cilj stacionarnih testova je zagrijati stup na određenu temperaturu i zatim nanijeti predviđenu silu te utvrditi vrijeme potrebno da dođe do otkazivanja nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Cilj nestacionarnih testova je nanijeti različite sile i onda zagrijavati stup te utvrditi za svako pojedino opterećenje potrebno vrijeme i temperaturu pri kojima dolazi do otkazivanja.

1.2 Geometrijske karakteristike

U ovom radu je proveden proračun aluminijskog stupa u računalnom programu MASA.

Aluminijski stup je "I" profil. Visina stupa je 2 910 mm.

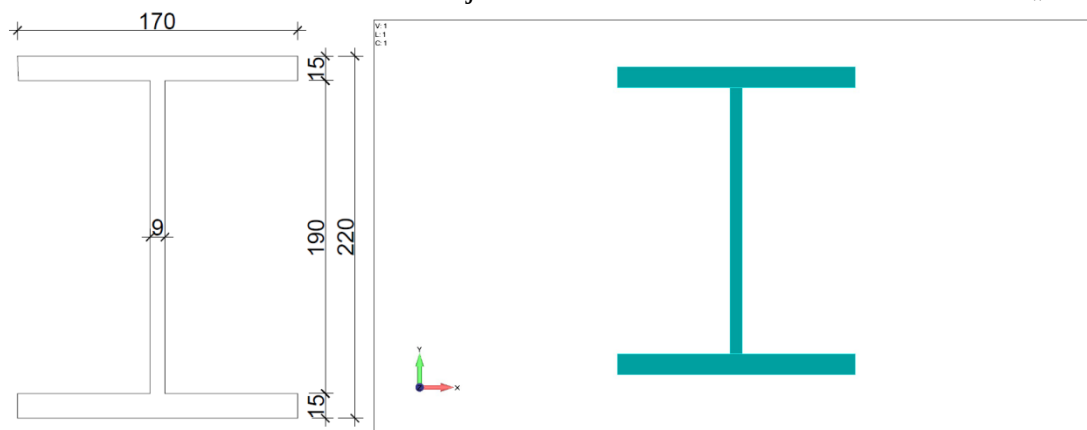
Dimenzije poprečnog presjeka stupa:

visina poprečnog presjeka..... $h = 220$ mm

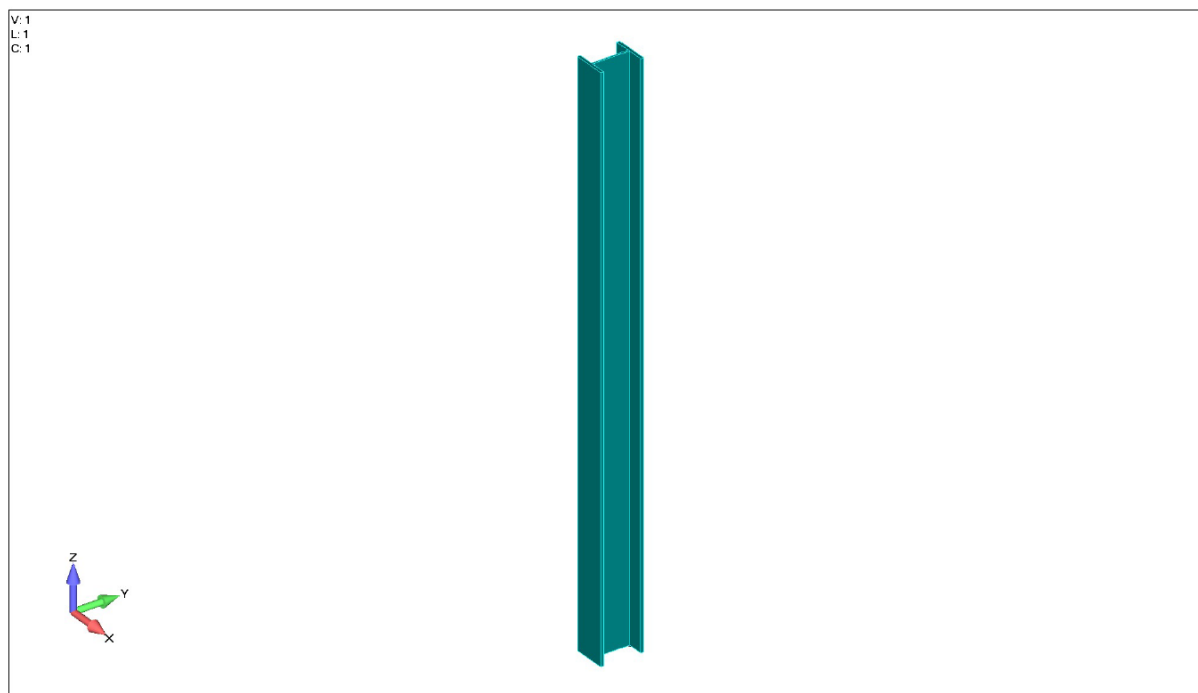
širina pojasnice..... $b = 170$ mm

debljina pojasnice..... $t_f = 15$ mm

debljina hrpta..... $t_w = 9$ mm



Slika 1.1 – Poprečni presjek stupa



Slika 1.2 – Pogled na stup

1.3 Pridržanja

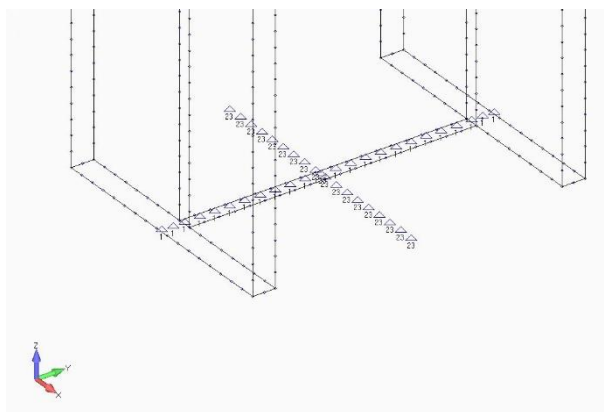
Stup je pridrжан s dva oslonca. S donje strane je nepomični zglobni ležaj dok je s druge strane klizni ležaj.

Potrebno je što bolje modelirati pridržanja, kako bi se što bolje oponašali stvarni ležajevi te je bilo potrebno pridržanja modelirati s oprugama i uz utjecaj trenja. Međutim računalni program MASA u svojim postavkama nema opruge, a trenje nije moguće uzeti u obzir u proračunu u kombinaciji s djelovanjem toplinskog djelovanja.

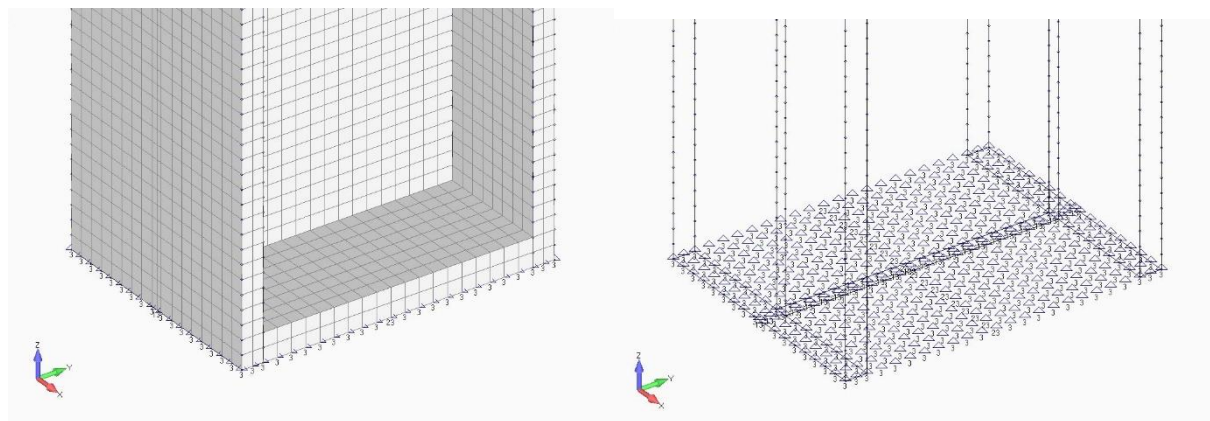
Pri modeliranju su napravljena dva modela tj. jedina razlika među njima je u modelu pridržanja donjeg ležaja odnosno u modelu nepomičnog zgloba.

Model 1 – spriječena su sva tri pomaka u smjeru x, y i z a zaokret je oslobođen

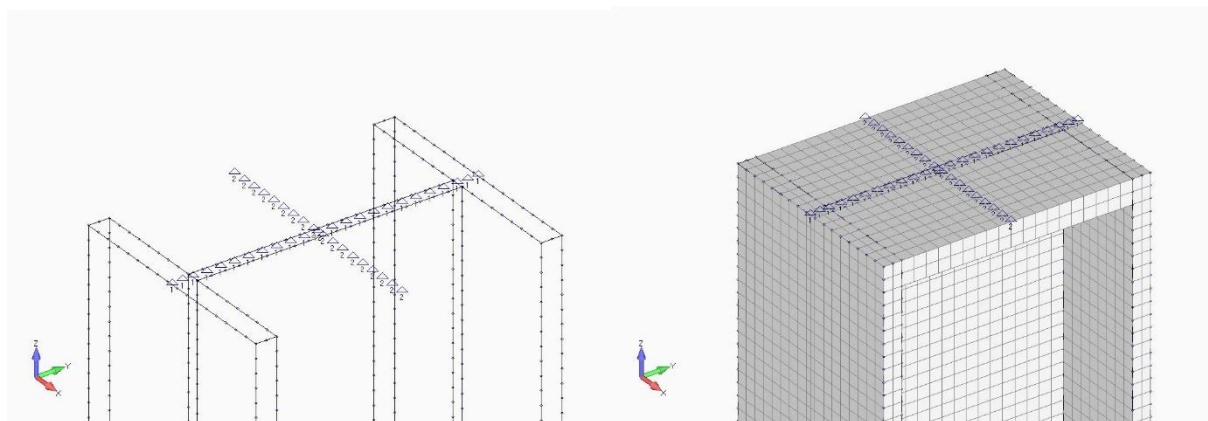
Model 2 - spriječena su sva tri pomaka u smjeru x, y i z, dodana je ploča za ukrutu jer je dolazilo do prevelikih deformacija te je cijelom pločom spriječen pomak u z smjeru.



Slika 1.3 – Model 1 – donji nepomični ležaj



Slika 1.4 – Model 2 – donji nepomični ležaj



Slika 1.5 – Gornji pomični ležaj (pločica za ukrotu s gornje strane nema utjecaj na rezultate)

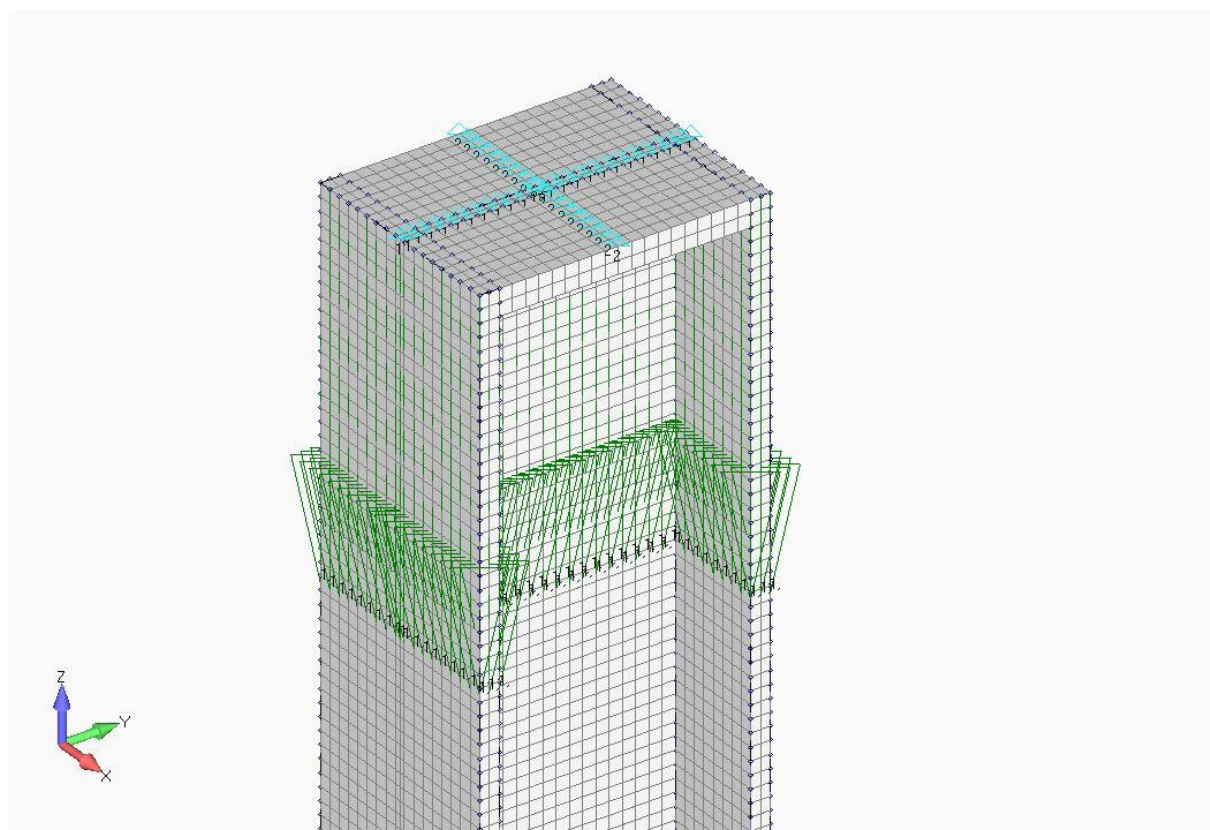
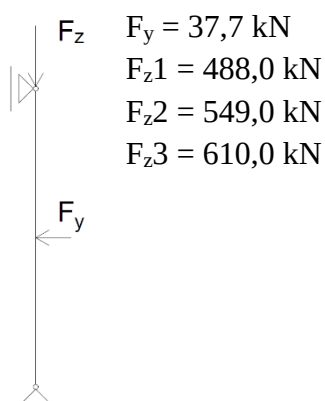
1.4 Opterećenje

Na stup djeluje uzdužna i poprečna sila. Poprečna sila djeluje na visini od 1,44m od prvog ležaja stupa i iznosi 37,7 kN.

Uzdužna sila djeluje na vrhu stupa. Provedena su tri proračuna za tri različita iznosa uzdužne sile. Iznosi su redom: 488 kN; 549 kN i 610 kN.

Na stup djeluje toplinsko opterećenje. Stup se zagrijava brzinom zagrijavanja od 2,5°C/min

Shematski prikaz stupa, pridrzanja i opterećenja:

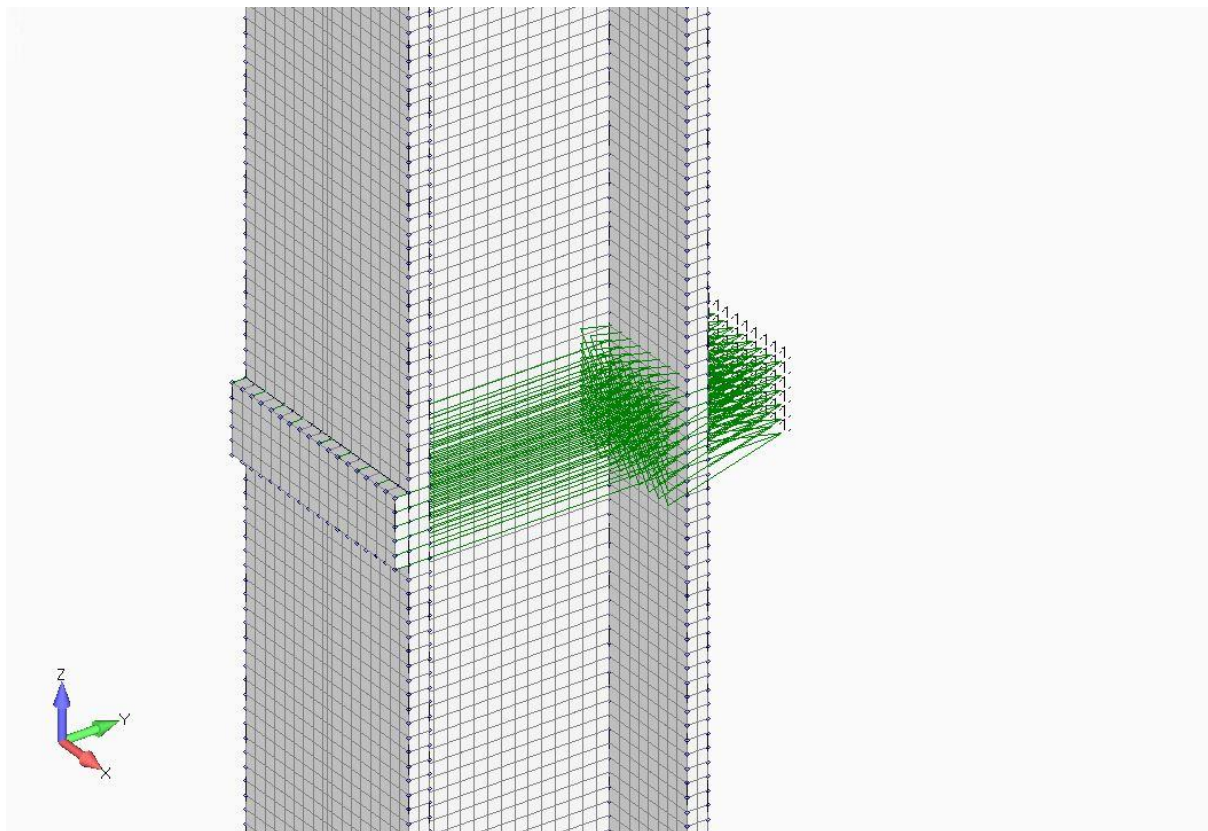


Slika 1.6 – Uzdužno opterećenje – u smjeru stupa – u smjeru osi z (F_z)

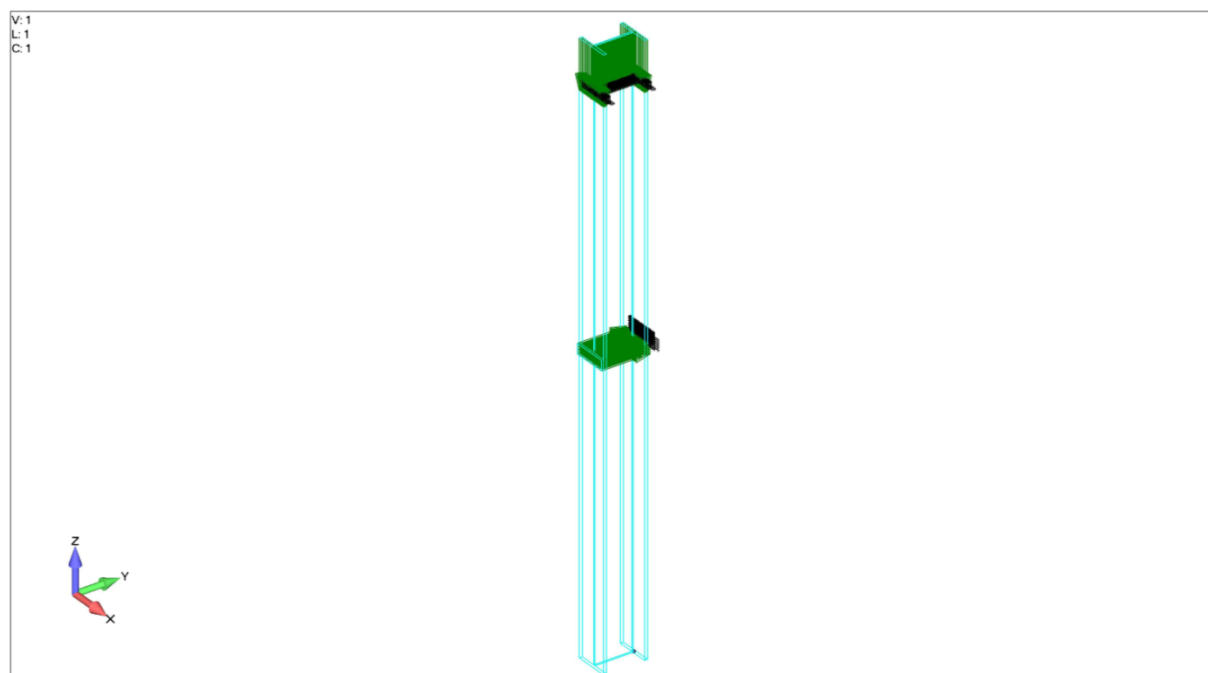
Uzdužne i poprečne sile nije moguće zadati kao koncentrirane sile. Program je trodimenzionalan te nema mogućnosti proračuna u 1D. Zbog toga koncentrirana sila je podijeljena sa brojem čvorova mreže konačnih elemenata.

Uzdužna sila raspodjeljena je na 172 čvorova.

Poprečna sila prenosi se na element preko pločice. Dimenzije pločice su 170 x 50 x 10 mm. 170 mm je ujedno i širina pojasnice stupa a 50 mm je visina pločice. Poprečna sila je podijeljena na 108 čvorova mreže konačnih elemenata.

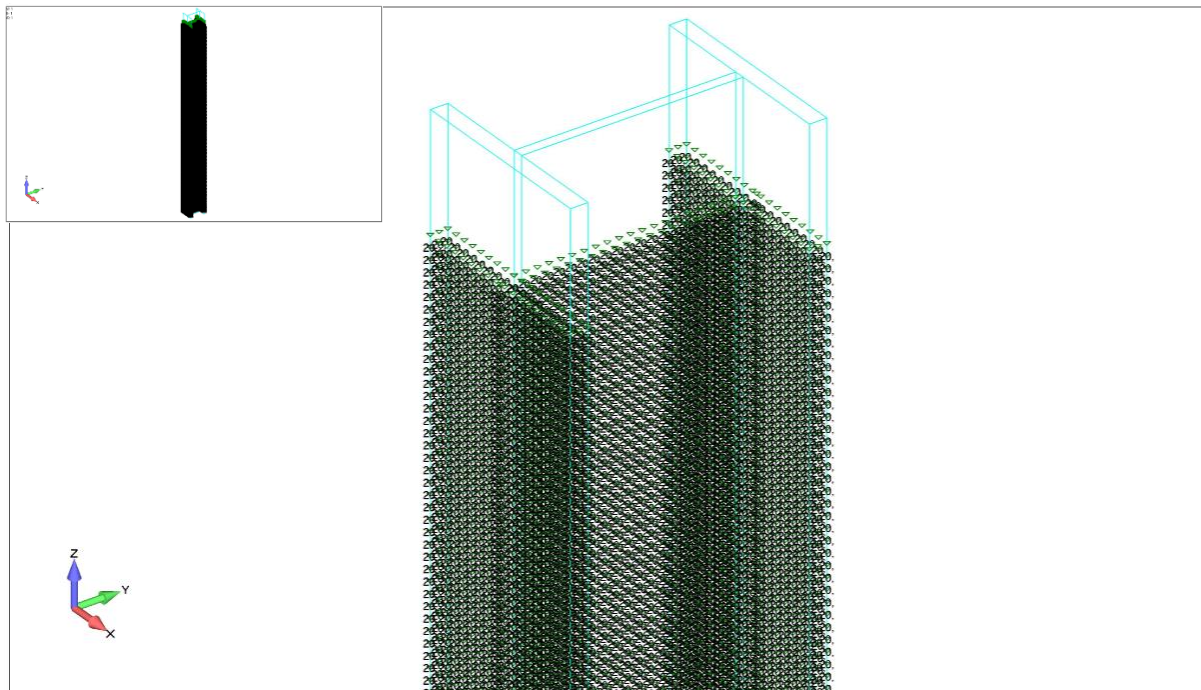


Slika 1.7 – Poprečno opterećenje – poprečno na stup – u smjeru osi y (F_y)

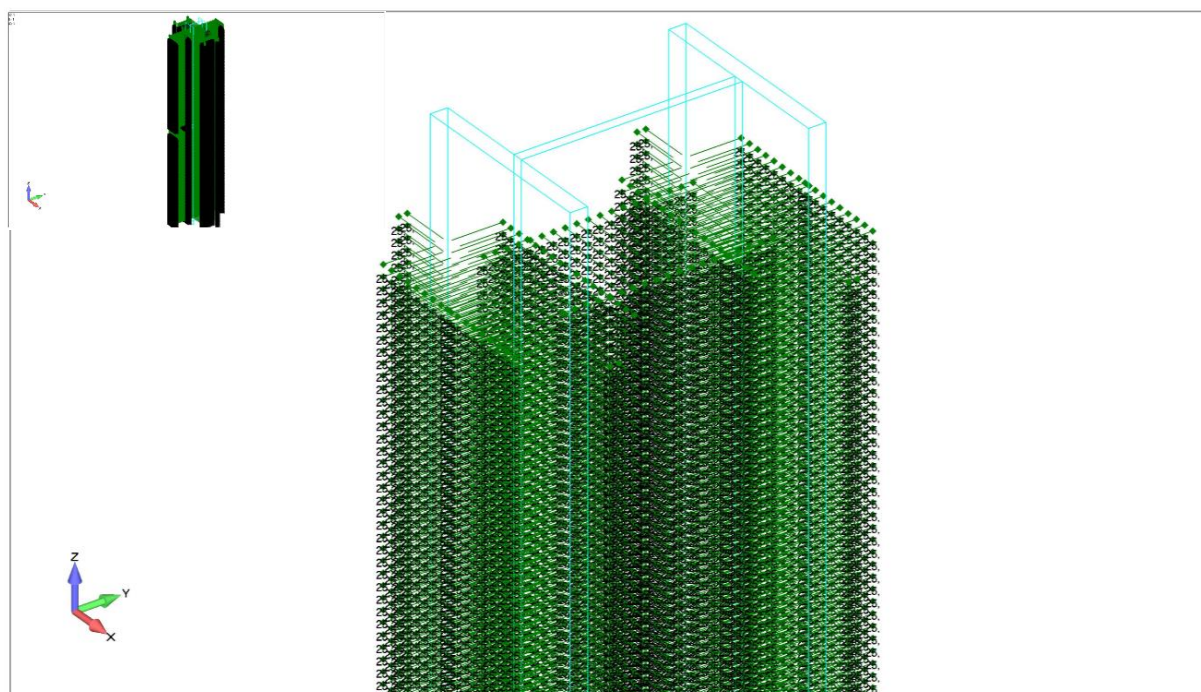


Slika 1.8 – Uzdužno i poprečno opterećenje na stup

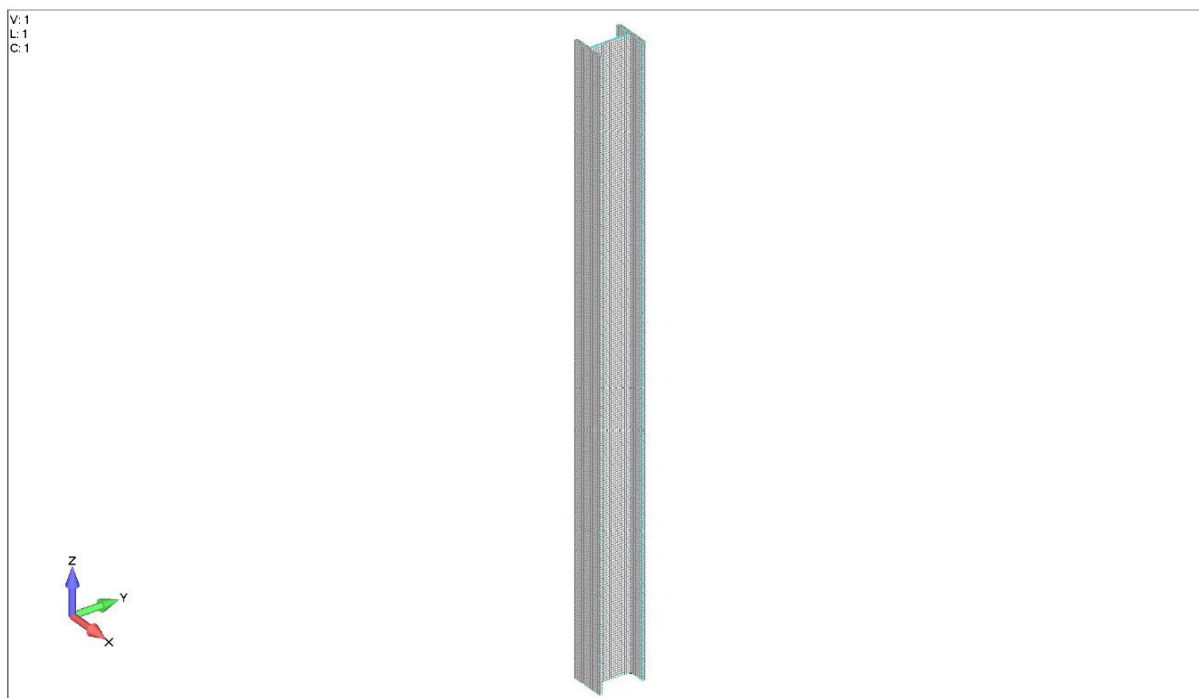
Inicialna temperatura nanesena na aluminijski stup je 20°C. Temperatura je nanesena na sve stranice elementa sa svih strana. Temperatura nije nanesena uz ležajeve i na pločicu preko koje se nanosi poprečno opterećenje kako ne bi došlo do lokalnog otkazivanja što bi dalo pogrešne rezultate.



Slika 1.9 – Temperatura – početna – 20°C

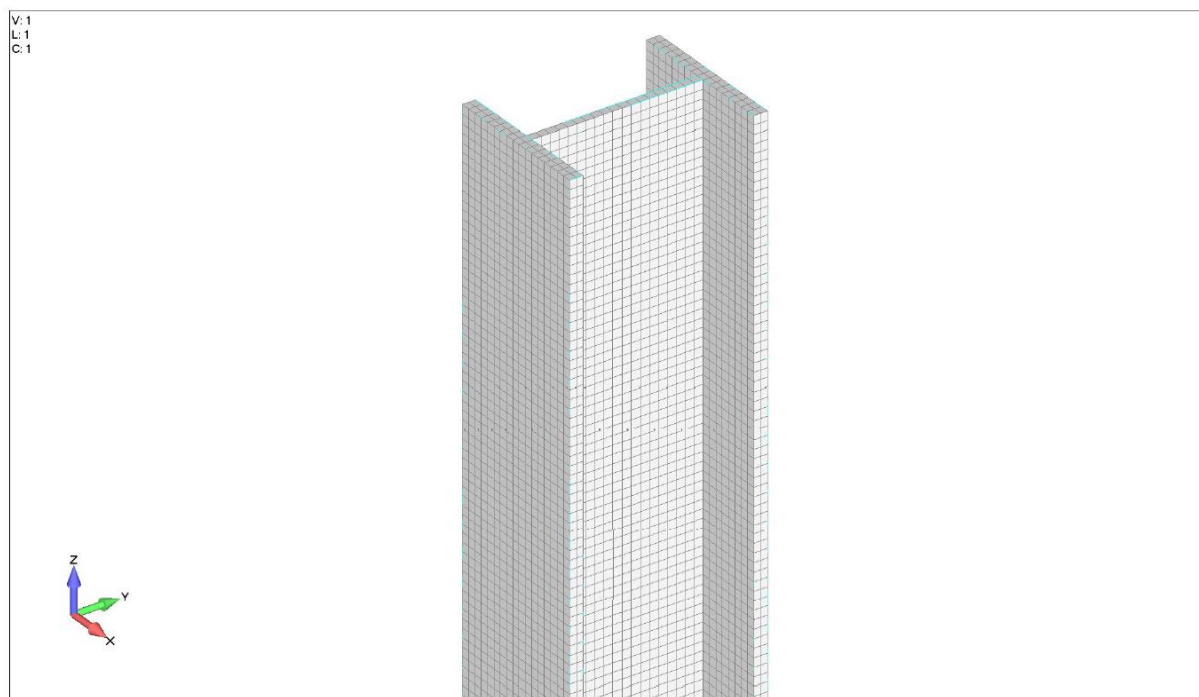


Slika 1.10 – Flux – 25°C



Slika 1.11 – Mreža konačnih elemenata

Nakon što je modeliran stup sa zadanom geometrijom i pridržanjima u programu FEMAP napravljena je mreža konačnih elemenata. Mreža je dosta gusta kako bi se dobili točniji rezultati. Kako ovaj model ima dosta jednostavnu geometriju i samo jedan materijal, gusta mreža neće imati veliki utjecaj na produljenje proračuna.



Slika1.12 – Mreža konačnih elemenata – detalj

2 SVOJSTVA ALUMINIJA

2.1 Općenito o aluminiju

Aluminij je čvrst i lagan materijal koji je kao takav našao svoju primjenu u građevinarstvu. On je uz čelik drugi najčešće korišteni metal.

Aluminij je treći najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori, gdje ga ima ukupno 8%, ispred njega su samo kisik i silicij. Aluminij se u prirodi nikad ne pojavljuje kao čisti metal, već kao spoj. Primarni izvor aluminija je ruda boksit, složeni spoj aluminija, kisika i drugih elemenata. Proces odvajanja aluminija od ostalih spojeva iz rude boksita je skup a provodi se elektrolizom. Postojanje aluminija utvrđeno je 1808. godine kada ga je britanski znanstvenik Humphrey Davy pokušao izdvojiti iz zemlje iako to nije uspio. Prva osoba koja je uspjela izdvojiti česticu aluminija bio je danski znanstvenik Hans Oersted i to 1825 godine. Njemački kemičar Friedrich Wöhler je 1827. nastavio sa istraživanjima i proizveo je prvi dovoljno velik komad aluminija iz kojeg se mogla vidjeti lakoća i sjaj ovog metala.

Nakon što je 1854. godine francuski kemičar Henri Sainte – Claire Deville razvio redukcijski proces upotrebom natrija umjesto dotadašnjeg skupog kalija i daljnjom rafinacijom bilo je moguće proizvoditi aluminij koji je tada postao dostupnim širem krugu ljudi. Nakon što je Simens 1866. godine otkrio dinamo stroj, omogućena je tehnička elektroliza koju su istovremeno i neovisno jedan o drugome otkrili Paul – Luis – Toussaint Heroult iz Francuske i Charles Martin Hall iz SAD-a[1]. Utvrdili su da se aluminijev oksid topi na puno nižim temperaturama ako se pomješa sa kriolitom. Kroz dobivenu rastaljenu smjesu provodi se električna struja te se proizvodi aluminij[2].

Mehanička svojstva čistog aluminija su dosta loša te da bi se mogao koristiti u građevinarstvu potrebni su mu različiti dodatci tj. odgovarajuće aluminijske legure. Prvu leguru napravio je njemački metalurg Alfred Wilm 1903. godine, a sadržavala je 4% bakra. Kasnije je dobio leguru boljih mehaničkih svojstava, što je početak razvoja legura.

Struktura aluminija je dosta slična strukturi čelika. Međutim njegova mehanička svojstva su dosta lošija od svojstava čelika. Aluminij je lakši, a njegova gustoća (2700kg/m^3) je tri puta manja od gustoće čelika (7830kg/m^3)[3]. Aluminij ne hrđa i zato se može koristiti neobojen međutim poželjno ga je zaštititi u nekim izrazito agresivnim okolinama[1]. Aluminij je otporan na progresivnu oksidaciju koja uzrokuje hrđu čelika. Površina aluminija u dodiru sa kisikom reagira stvarajući inertni film aluminijevog oksida koji sprječava daljnju oksidaciju. Ako je ogreban zaštitni sloj aluminija on se sam ponovno zatvara[3]. Korodiranje aluminija može se javiti na spojevima aluminija i drugih metala, posebice čelika, te se pri projektiranju treba voditi računa da ne budu u izravnom kontaktu ako je ikako moguće da ne bi došlo do degradacije aluminija.

Osim što su općenito mehanička svojstva aluminija lošija nego kod čelika, na visokim temperaturama ona brže degradiraju nego kod čelika, a kod nekih legura dolazi do degradacije već pri temperaturama nešto većim od 100°C . Toplinsko izduženje aluminijских legura je dvostruko veće nego kod čelika. Oštećenja od zamora materijala izraženi su kod aluminijских nego kod čeličnih konstrukcija[1].

Aluminij ima jako dobru električnu i toplinsku provodljivost, ali postoje posebne legure s visokim stupnjem otpora[3].

Zbog loših mehaničkih svojstava čistog aluminija on se ne koristi u građevinarstvu, već se koriste aluminijske legure. Sastav legura je različit ovisno koja se svojstva žele postići. Glavni elementi svake legure je aluminij kao osnovni elementi, a legirni elementi su bakar, mangan, silicij, magnezij i cink. Osim ovih osnovnih postoje još mnogi dodatni legirni elementi kao što su željezo, nikal, olovo, krom...

Aluminijske legure se razvrstavaju u skupine ovisno o legurnom elementu koji je najviše zastupljen u leguri. Prema načinu prerade legure se dijele na legure za gnječenje i legure za lijevanje[1]. Za označavanje gnječene legure koristi se četveroznamenkasti sustav:

- 1xxx – nelegirani (čisti) aluminij, s minimalnom čistoćom od 99,00% , često se koristi u električnoj i kemijskoj industriji
- 2xxx – legure u kojima je bakar glavni legirni element (do 6%) – nema dobra antikorozivna svojstva i često postoje problemi sa zavarivanjem
- 3xxx - legure u kojima je mangan glavni legirni element (do 1,2%) koji pozitivno utječe mehanička svojstva, povećava korozijsku otpornost – koristi se kao legura opće namjene za razne proizvode i u arhitekturi
- 4xxx – legure u kojima je silicij glavni legirni element – snižava temperature tališta bez pojave krtih lomova
- 5xxx – legure u kojima je magnezij glavni legirni element, a on je ujedno i najčešće korišten legirni element u aluminijskim legurama – poboljšava svojstva pri niskim temperaturama, u morskoj vodi i dobro se zavaruju – najčešće se koriste u brodogradnji i građevinarstvu
- 6xxx – legure u kojima su silicij i magnezij glavni legirni elementi – dobro se zavaruju, plastično oblikuju, a imaju i dobra antikorozivna svojstva – obično se koriste u arhitekturi i automobilske industriji
- 7xxx – legure u kojima su cink i magnezij glavni legirni elementi – imaju loša antikorozivna svojstva ali najbolja mehanička (čvrstoća ≥ 500 Mpa) – koriste se u konstrukcijskim komponentama zrakoplova i drugdje gdje je potrebna visoka čvrstoća
- 8xxx – legure različitih sastava, mogu sadržavati znatne količine kositra, litija i/ili željeza
- 9xxx – rezervirano za buduće legure[1][3]

2.2 Alumijska legura 6082

Alumijska legura 6082 je legura srednje čvrstoće s izvrsnom otpornosti na koroziju. Ima najveću čvrstoću među legurama iz serije 6xxx.



Slika 2.1 – Mikrostruktura aluminija (uzorak izložen temperaturi od 300°C)

Slika 2.1 prikazuje mikrostrukturu aluminija pri 500x povećanju. Vidljiv je aluminij s česticama Mg_2Si (zaobljene) i $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ (uglate). Uzorci su prvo zagrijani na temperaturu od 20°C i 300°C te zatim ohlađeni. Vickersovim ispitivanjem čvrstoće na tim uzorcima utvrđen je pad čvrstoće sa 68,1 na 39,9.

	Al	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn ₂	Cr	Ca	Pb	Ti ₂	Sn ₂
6082-T6-Exp	96,49	0,099	1,281	0,708	0,523	0,767	0,0615	0,0141	0,0011	0,0034	0,0108	0,0173

Tablica 2.1 - Kemijski sastav alumijske legure 6082[4]

2.3 Materijalna svojstva aluminijskih legura

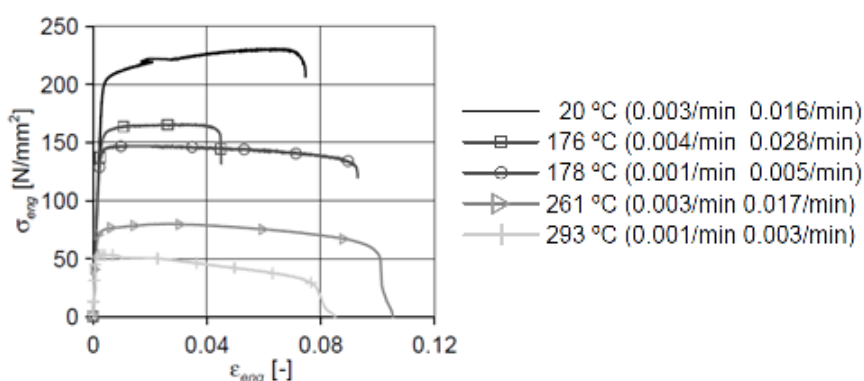
Svojstvo	Vrijednost
Modul elastičnosti	$E=70\,000\text{ N/mm}^2$
Modul posmika	$G=27\,000\text{ N/mm}^2$
Poasonov koeficijent	$\nu=0,3$
Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja	$\alpha=23\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Gustoća	$\rho=2\,700\text{ kg/m}^3$

Tablica 2.2–Materijalna svojstva aluminijskih legura[5]

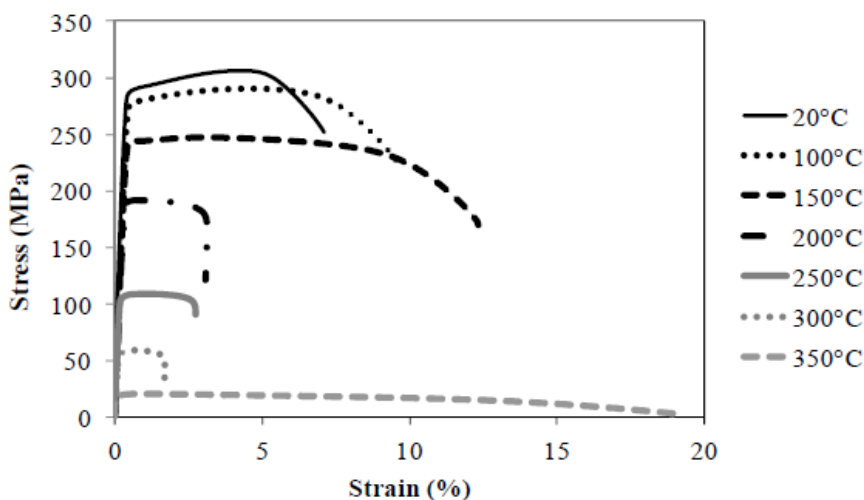
2.4 Mehanička svojstva aluminijских legura

- Svojstva čvrstoće i deformacije

U većini jednostavnih modela i pristupa odnos naprežanje-deformacija ima bi-linearan odnos. U stvarnosti je taj odnos znatno zakrivljen. Stupanj prinosa za čelik i aluminij određeni su Eurocodom. Stupanj prinosa naprežanja pri plastičnoj deformaciji za čelik iznosi 2% f_y , a za aluminij 0,2% $f_{0,2}$. $f_{0,2}$ je standardna vrijednost određena na osnovu stanja čvrstoće. Određuje se na osnovu vlačnog ispitivanja s definiranom razinom naprežanja pri konstantnoj temperaturi, nakon što je sam uzorak već neko vrijeme izložen zadanoj temperaturi. Odnos naprežanje-deformacija ovisi o temperaturi i brzini naprežanja. Što je viša temperatura to je osjetljivost na naprežanje veća[6].

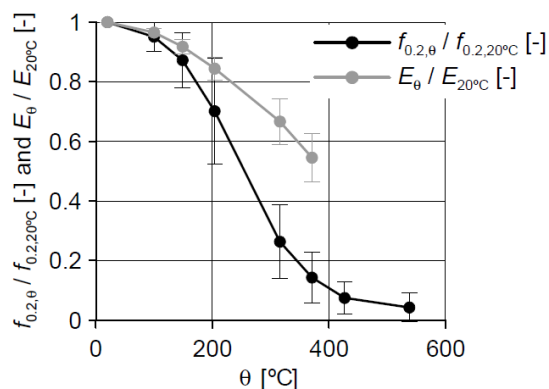


Slika 2.2 – Vlačno ispitivanje legure 6060-T66 pri različitim temperaturama[6]



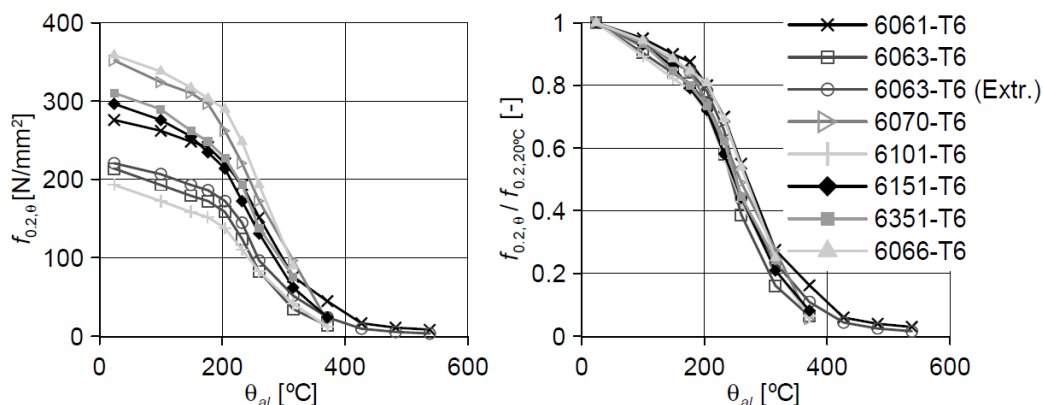
Slika 2.3 – Vlačno ispitivanje legure 6082-T6 pri različitim temperaturama[4]

Kaufman je 1999. godine objavio rezultate statičkih ispitivanja vlačne čvrstoće za 158 različitih aluminijских legura na različitim temperaturama. Vrijednosti naprežanja pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji se smanjuju između 80 i 20% iznosa na sobnoj temperaturi u odnosu na vrijednosti pri temperaturama između 175 i 350 °C.

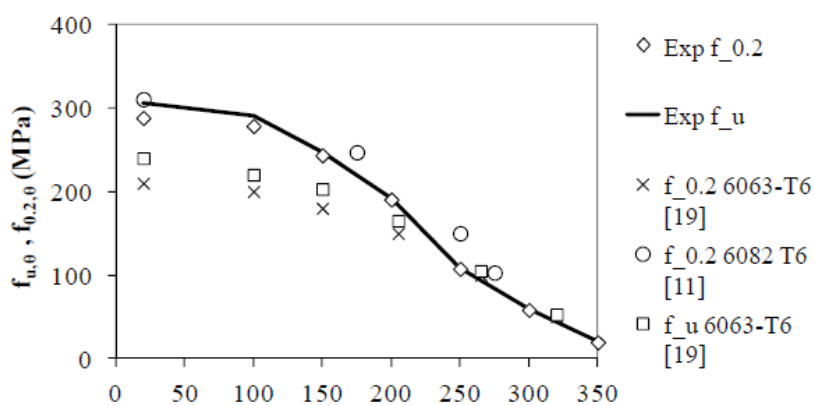


Slika 2.4 – Omjeri $f_{0.2,\theta} / f_{0.2,20^\circ\text{C}}$ i $E_\theta / E_{20^\circ\text{C}}$ s izloženosti temperaturnom djelovanju od 30min i $d\varepsilon / dt = 0,005 / \text{min}$ [6]

Sa slike se vidi da je odstupanje omjera $f_{0.2,\theta} / f_{0.2,20^\circ\text{C}}$ dosta veliko. Međutim odstupanje je jako malo kad se razmatraju legure u istoj seriji i na istoj temperaturi tj. s usporedivim sastavom i obradom.



Slika 2.5 – Granična čvrstoća pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji za legure u seriji 6xxx u ovisnosti o temperaturi T6 [6]



Slika 2.6 – Redukcija granične čvrstoće pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji za leguru 6082 T6 u ovisnosti o temperaturi [4]

Granica čvrstoće aluminijskih legura za izloženost temperaturnom djelovanju od 2 sata pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji dobiva se iz zraza: $f_{0,\theta} = k_{0,\theta} \cdot f_0$ (1), a koeficijent $k_{0,\theta}$ dan je u tablici 2.3.

$f_{0,\theta}$ - 0,2 otpornost na povišenu temperaturu

f_0 - 0,2 čvrstoće na sobnoj temperaturi prema EN 1999-1-1

Legura	Način obrade	Temperatura aluminijske legure (°C)							
		20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW-3003	O	1,00	1,00	0,90	0,79	0,64	0,46	0,38	0
EN AW-3003	H14	1,00	1,00	0,76	0,51	0,26	0,16	0,10	0
EN AW-3004	H34	1,00	1,00	0,98	0,57	0,31	0,19	0,13	0
EN AW-3004	H38	1,00	1,00	0,88	0,46	0,25	0,16	0,10	0
EN AW-5005	O	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82	0,58	0,39	0
EN AW-5005	H14 ¹⁾	1,00	0,93	0,87	0,66	0,37	0,19	0,10	0
EN AW-5005	H18	1,00	0,92	0,85	0,60	0,32	0,15	0,08	0
EN AW-5052	H34 ²⁾	1,00	1,00	0,92	0,52	0,29	0,20	0,12	0
EN AW-5052	O	1,00	1,00	1,00	0,85	0,63	0,46	0,28	0
EN AW-5052	H38	1,00	0,98	0,80	0,44	0,24	0,16	0,10	0
EN AW-5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,40	0,22	0
EN AW-5083	H12 ³⁾	1,00	1,00	0,80	0,60	0,31	0,16	0,10	0
EN AW-5086	O	1,00	1,00	0,96	0,91	0,70	0,46	0,30	0
EN AW-5086	H34	1,00	1,00	0,85	0,58	0,34	0,24	0,15	0
EN AW-5154	O	1,00	1,00	0,96	0,92	0,70	0,50	0,30	0
EN AW-5154	H34	1,00	1,00	0,89	0,61	0,37	0,26	0,16	0
EN AW-5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0
EN AW-5454	H34	1,00	1,00	0,85	0,58	0,34	0,24	0,15	0
EN AW-5454	H32	1,00	1,00	0,92	0,78	0,36	0,23	0,14	0
EN AW-6005	T5	1,00	0,93	0,81	0,66	0,42	0,23	0,11	0
EN AW-6061	T6	1,00	0,95	0,91	0,79	0,55	0,31	0,10	0
EN AW-6063	T5	1,00	0,92	0,87	0,76	0,49	0,29	0,14	0
EN AW-6063	T6 ⁴⁾	1,00	0,91	0,84	0,71	0,38	0,19	0,09	0
EN AW-6082	T4 ⁵⁾	1,00	1,00	0,84	0,77	0,77	0,34	0,19	0
EN AW-6082	T6	1,00	0,90	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0
1) Vrijednosti se smiju primjeniti i na način obrade H24/H34/H12/H32									
2) Vrijednosti se smiju primjeniti i na način obrade H12/H22/H32									
3) Vrijednosti se smiju primjeniti i na način obrade H22/H32									
4) Vrijednosti se smiju primjeniti i na EN AW-6060 T6 i T66									
5) Vrijednosti ne uključuju povećanje granice popuštanja zbog učinka starenja. Preporučuje se da se takvi učinci zanemare									

Tablica 2.3 – Omjer $k_{0,\theta}$ za granicu popuštanja pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji[1]

- Modul elastičnosti

Modul elastičnosti određuje se iz relacije: $E_{\theta} = \sigma / \varepsilon_{el/\theta}$. Kaufman 1999. i Maljaars 2008. godine su odredili modul elastičnosti za aluminijske legure 5083-H111 i 6060-T66.

Dane su jednadžbe za izračun modula elastičnosti na osnovu ispitivanja savijanjem za:

$$\text{leguru 5xxx: } E_{\theta} = 72000 - 10 \cdot \theta_{al} - 0,21 \cdot \theta_{al}^2 \text{ za } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{al} \leq 350^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$\text{leguru 6xxx: } E_{\theta} = 69000 - 10 \cdot \theta_{al} - 0,21 \cdot \theta_{al}^2 \text{ za } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{al} \leq 350^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

Kaufman je zaključio da je modul elastičnosti zavisao o seriji legure te da je gotovo neovisan o tipu legure unutar serije.

Eurocod EN 1999-1-2 daje vrijednosti za modul elastičnosti aluminijskih legura pri povišenim temperaturama neovisno o seriji legure. Vrijednosti dane u eurocodu su slične odnosima u jednadžbama te je maksimalna razlika 5% za temperature do 300°C[6].

Modul elastičnosti nakon dva sata izloženosti povišenoj temperaturi je reduciran te su vrijednosti dane u tablici:

Temperatura aluminijske legure θ (°C)	Modul elastičnosti $E_{al,\theta}$ (N/mm ²)
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

Tablica 2.4 – Redukcija modula elastičnosti za aluminijske legure izložene djelovanju topline u vremenu od 2 sata koje propisuje Eurocod[5]

- Gustoća

Gustoća aluminija može se smatrati neovisnom o temperaturi aluminija.

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3 = \text{const.} [6]$$

- Puzanje

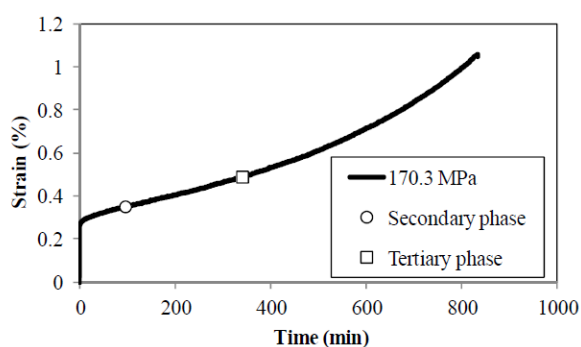
Puzanje materijala je posljedica dugotrajnog konstantnog naprezanja nižeg od granice razvlačenja, a karakteristično je pri dugotrajnoj izloženosti visokim temperaturama.

Puzanje materijala se dijeli na 3 faze puzanja:

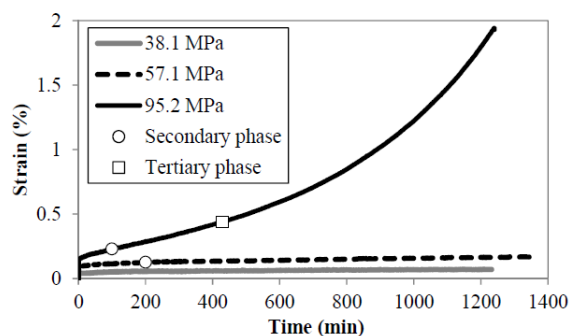
1. Faza – primarno puzanje – na početku dolazi do naglog prirasta deformacija, a zatim se brzina puzanja smanjuje kao posljedica očvršćavanja zbog deformacija
2. Faza – sekundarno puzanje – kontinuirani prirast deformacija u vremenu
3. Faza – tercijalno puzanje – naglo deformiranje, sve do loma[7]

Rezultati provođenih ispitivanja puzanja za aluminijsku leguru 6082-T6 uspoređivani su sa rezultatima ranije provođenih ispitivanja na puzanje koje su vodili Langhelle za leguru 6082-T6 i model pouzanja kojeg su dali Malaars [6] i suradnici za leguru 6060-T66.

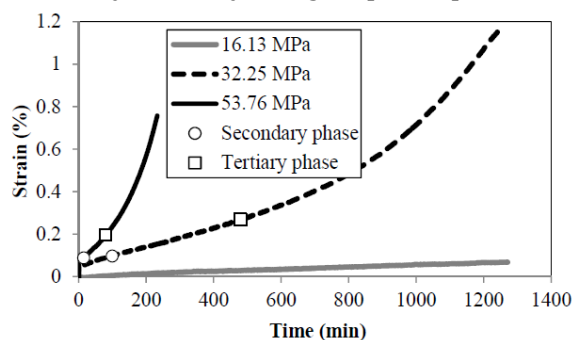
Rezultati su dani i korišteni u cilju stvaranja analitičkog modela puzanja prikladnog za primjenu strukturalnog modeliranja metodom konačnih elemenata.



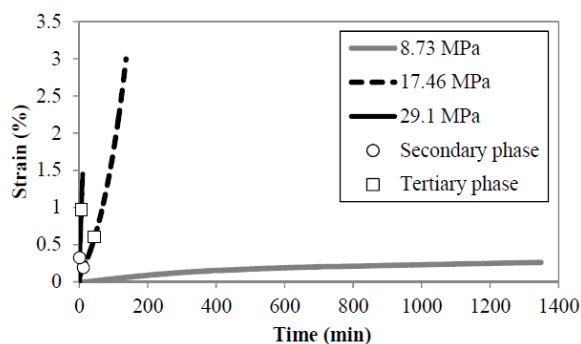
Slika 2.7 – Puzanje aluminijske legure pri temperaturi od 150°C



Slika 2.8 – Puzanje aluminijske legure pri temperaturi od 200°C



Slika 2.9 – Puzanje aluminijske legure pri temperaturi od 250°C



Slika 2.10 – Puzanje aluminijske legure pri temperaturi od 300°C

Analitički model omogućava proračun deformacije prema formuli:

$$\varepsilon(\sigma, T, t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} = c + a \cdot t^b + e \cdot t^f \quad (4)$$

gdje je: ε_{cr} - deformacija od puzanja (%)

t - vrijeme (min)

$$\varepsilon_{el} = c = \sigma / E_{y,\theta} \quad (5)$$

- elastična deformacija (omjer početnog naprezanja i modula elastičnosti koji ovisi o temperaturi)

Koeficijenti a, b, e i f su određeni prilagodbom krivulja puzanja u ovisnosti o različitim razinama naprezanja.

Koeficijent c predstavlja elastičnu deformaciju.

Prednost ovog modela je što uzima u obzir sve tri faze puzanja i što su potrebne samo vrijednosti trenutnog naprezanja, temperature i vremena kako bi se odredila vrijednost puzanja.

Temperatura(°C)	Koeficijent	Naprezanje (Mpa)		
		38,10 (0,20f _{0,2,θ})	57,10 (0,30f _{0,2,θ})	95,20 (0,50f _{0,2,θ})
200	a	3,378 x 10 ⁻⁴	5,133 x 10 ⁻³	8,619 x 10 ⁻³
	b	0,5200	0,3729	0,5115
	c	0,0586	0,0879	0,1465
	e	-	6,650 x 10 ⁻¹⁰	1,000 x 10 ⁻¹⁰
	f	-	2,1770	2,6270
		16,13 (0,15f _{0,2,θ})	32,25 (0,30f _{0,2,θ})	53,76 (0,50f _{0,2,θ})
250	a	2,187 x 10 ⁻⁴	1,742 x 10 ⁻³	5,641 x 10 ⁻⁴
	b	0,7468	0,7377	1,1460
	c	2,544 x 10 ⁻²	5,087 x 10 ⁻²	0,0848
	e	-	5,523 x 10 ⁻¹⁰	7,583 x 10 ⁻⁸
	f	-	2,9500	2,8270
		8,73 (0,15f _{0,2,θ})	17,46 (0,30f _{0,2,θ})	29,10 (0,50f _{0,2,θ})
300	a	2,513 x 10 ⁻³	5,133 x 10 ⁻³	0,1697
	b	0,6470	0,3729	0,9000
	c	0,0182	0,0879	0,0606
	e	-	6,650 x 10 ⁻¹⁰	5,861 x 10 ⁻⁵
	f	-	2,1770	3,1200

Tablica 2.5 – Parametri puzanja dani na osnovu eksperimenta[4]

2.5 Termalna svojstva aluminijskih legura

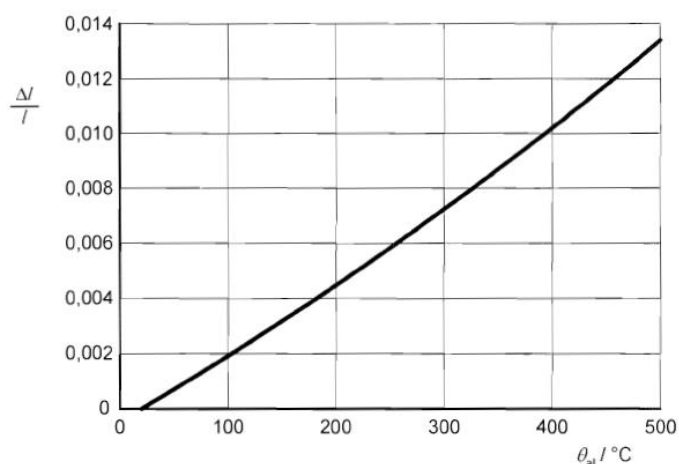
- Toplinsko rastezanje

Relativno toplinsko izduženje za temperature aluminijskih legura $0^{\circ}\text{C} < \theta_{\text{al}} < 500^{\circ}\text{C}$ računa se:

$$\Delta l / l = 0,1 \cdot 10^{-7} \theta_{\text{al}}^2 + 22,5 \cdot 10^{-6} \theta_{\text{al}} - 4,5 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

l – duljina pri temperaturi od 20°C

Δl - izduženje zbog djelovanja temperature



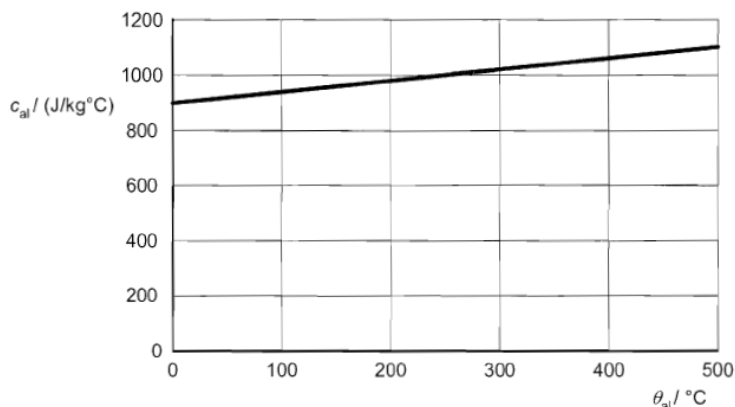
Slika 2.11 – Relativno izduženje aluminijskih legura kao posljedica zagrijavanja [4]

Koeficijent linearnog toplinskog izduženja α_{θ} je gotovo neovisan o vrsti aluminijske temperaturama između 20°C i temperature θ_{al} dobivena je krivulja za α_{θ} a određena je jednadžbom legure. Pri $\alpha_{\theta} = 22,5 \cdot 10^{-6} + 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_{\text{al}}$ [6] (7)

- Specifična toplina

Za temperature $0^{\circ}\text{C} < \theta_{\text{al}} < 500^{\circ}\text{C}$ specifična toplina aluminija se određuje na osnovu izraza:

$$c_{\text{al}} = 0,41 \cdot \theta_{\text{al}} + 903 \text{ (J/kg}^{\circ}\text{C)} \quad (8)$$



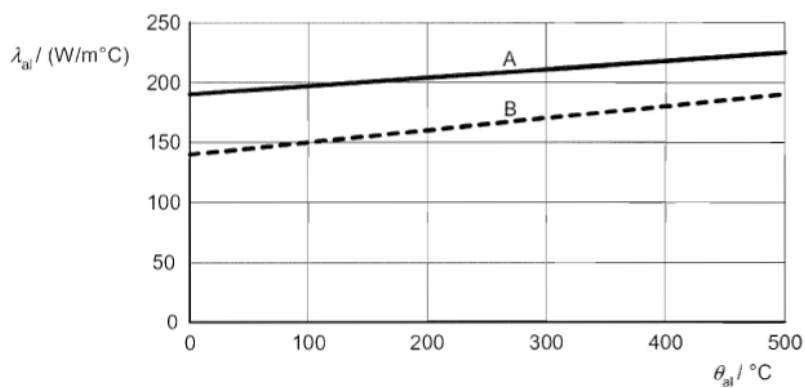
Slika 2.12 – Specifična toplina aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi [4]

- Toplinska provodljivost

Za temperature $0^{\circ}\text{C} < \theta_{al} < 500^{\circ}\text{C}$ toplinska provodljivost aluminijskih legura se određuje na osnovu izraza:

za legure iz serije 3xxx i 6xxx: $\lambda_{al} = 0,07 \cdot \theta_{al} + 190 \text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$ (9)

za legure iz serije 5xxx i 7xxx: $\lambda_{al} = 0,1 \cdot \theta_{al} + 140 \text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}$ (10)



A: 3xxx i 6xxx serije; B: 5xxx i 7xxx serije

Slika 2.13 – Toplinska provodljivost aluminijskih legura u ovisnosti o temperaturi[4]

3 TEORETSKA PODLOGA PRORAČUNA

3.1 Općenito o računalnom programu MASA

Računalni program MASA namjenjen je za proračun loma konstrukcija od kvazi krto materijala uz pomoć metode konačnih elemenata korištenjem nelinearne tro-dimenzionalne analize (3D). Program je prvenstveno napravljen za proračun pojava pukotina, tj. za nelinearnu analizu betonskih i armirano-betonskih konstrukcija. Međutim, program se može koristiti i za proračun i drugih materijala.

Za standardnu analizu betonskih i armirano-betonskih modela koristi se opći mikroravninski model betona, dok u istraživačkoj verziji programa postoje još i model plastičnosti i model oštećenja. Pri numeričkoj analizi materijala koji pokazuje pojave loma i oštećenja kao beton, treba koristiti tzv. elemente ograničavanja položaja kako bi se spriječila pojava oštećenja u nultom volumenu, tj. kako bi se mogla napraviti analiza neovisno o veličini konačnih elemenata. U računalnom programu MASA koriste se dva pristupa, prvi je relativno jednostavan pristup pukotina a drugi je općenitiji nelokalni pristup integralnog tipa.

Osim statističke analize pri jednolikom opterećenju, može se provoditi i potpuna 3D ciklička analiza. Isto tako u standardnoj verziji programa postoje opcije proračuna puzanja i skupljanja. U istraživačkoj verziji programa provodi se analiza pri visokim temperaturama, tj. kako raspodjela i utjecaj temperature utječu na degradaciju svojstava betona.

Program MASA se u biti može primjenjivati za trodimenzionalnu analizu različitih tipova konstrukcija kao što su štapni sustavi, ploče, školjke... Međutim, za takve proračune potrebna je jako velika memorija računala pa se program uglavnom koristi za određivanje pukotina, strukturalnu analizu i optimizaciju strukturalnih detalja.

Posljednjih godina došlo se do značajnog napretka u modeliranju betona kao općenitog odnosa naprezanja i deformacija. Trenutno dostupni modeli za beton mogu se svrstati u dvije kategorije i to u makroskopske modele u kojima se ponašanje materijala smatra prosječnim odgovorom vrlo složenog mikrostrukturnog mehanizma prijenosa naprezanja i drugi mikroskopski model gdje su mikromehaničke deformacije opisane odnosom naprezanja i deformacija na mikrorazini. S fizikalnog gledišta mikroskopski modeli su kvalitetniji ali su jako zahtjevni te se u stvarnosti moraju koristiti makroskopski modeli. Model mora točno opisati pojave kao što su kohezija, trenje, povezivanje agregata i međusobni utjecaj mikropukotina [8].

3.2 Podaci za proračun aluminija u računalnom programu MASA

Primarno je cijeli program prilagođen za ispitivanje i proučavanje betona, međutim postoji mogućnost proračuna i za druge materijale.

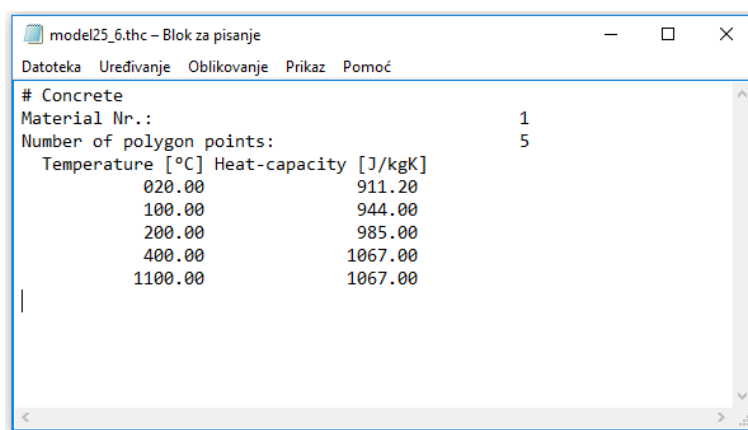
Proveden je proračun aluminija, tj. utjecaj visokih temperatura na aluminjski stup. Da bi se to moglo proračunati bilo je potrebno neke podatke unijeti u program:

- Vrijednosti dane u sljedećim tablicama proračunate su s obzirom na formule dane u drugom poglavlju
- Ponašanje materijala, sve toplinske karakteristike za temperature iznad 400°C nisu bitne jer očekivano dolazi do popuštanja prije postizanja tih vrijednosti.

- Specifična toplina aluminijских legura

θ_{al} (°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
C_{al} (J/kg°C)	911,2	944	985	1026	1067	1108	1149	1190	1231	1272

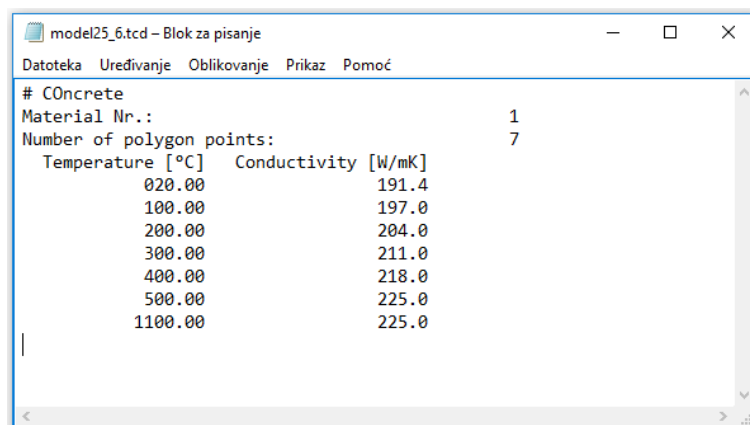
Tablica 3.1 – Specifična toplina za aluminijску leguru 6082-T6 u ovisnosti o temperaturi [5]



- Toplinska provodljivost aluminijских legura

θ_{al} (°C)	20	100	200	300	400	500
λ_{al} (W/m°C)	191,4	197	204	211	218	225

Tablica 3.2 – Toplinska provodljivost za aluminijскую leguru 6082-T6 u ovisnosti o temperaturi [5]



- Čvrstoća i deformacija

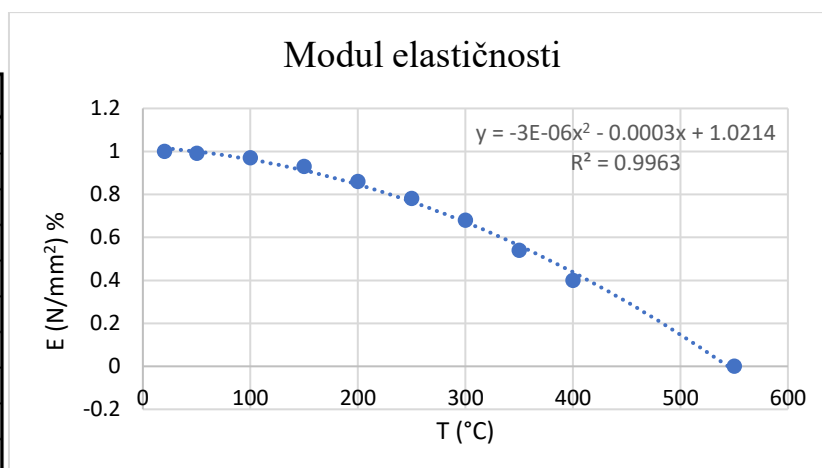
θ_{sl} (°C)	20	100	150	200	250	300	350	550
EN AW - 6082-T6	1,00	0,90	0,79	0,65	0,38	0,20	0,11	0,00

Tablica 3.3 – Omjer $k_{0,\theta}$ za granicu popuštanja pri 0,2%-tnoj trajnoj deformaciji[5]

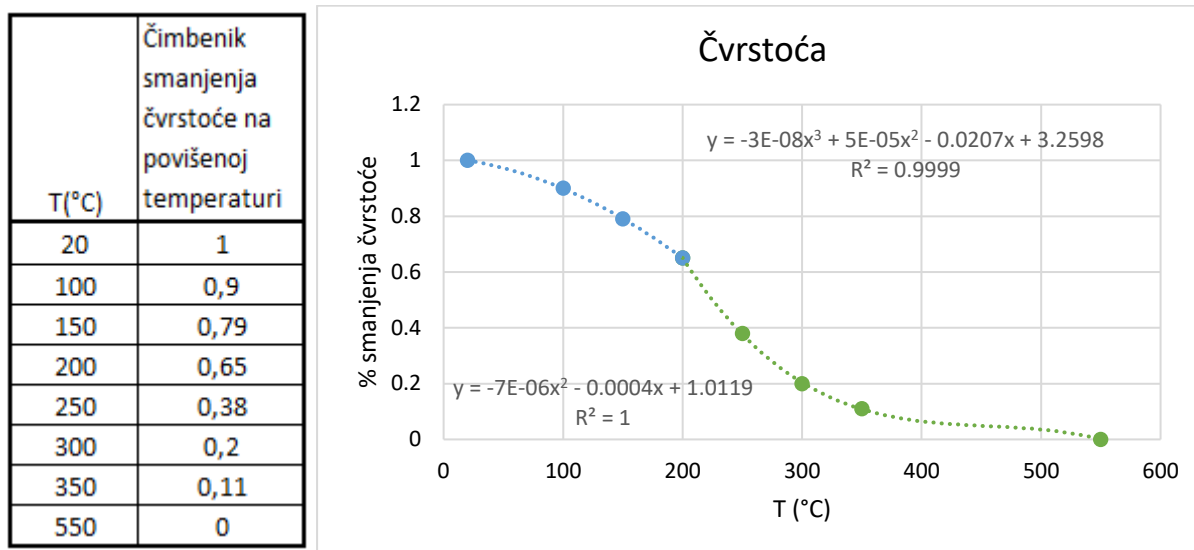
U sam kod programa bilo je potrebno unijeti:

- **Modul elastičnosti** - odnosno njegovu ovisnost o temperaturi:

T(°C)	E (N/mm ²)	%
20	7000	1
50	69300	0,99
100	67900	0,97
150	65100	0,93
200	60200	0,86
250	54600	0,78
300	47600	0,68
350	37800	0,54
400	28000	0,4
550	0	0



- **Ovisnost čvrstoće o temperaturi:**



- **Puzanje**, tj ovisnost puzanja o temperaturi i naprezanju:

Formula $\varepsilon(\sigma, T, t) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} = c + a \cdot t^b + e \cdot t^f$ ovisi o temperaturi, razini naprezanja i vremenu. U računalnom programu MASA potrebno je unijeti parametre za funkciju puzanja ali u funkciji samo temperature i vremena, neovisno o razini naprezanja. Na osnovu danih parametara u *Tablici 5* interpolacijom došli smo do nekih osrednjenih podataka:

	T (°C)					
Koeficijent	0	80	200	220	250	300
a	0	4,03E-03	1,21E-02	0,016	2,80E-03	0,139
b	0	0,2	0,60	0,712	0,88	0,6
e	0	3,87E-09	1,16E-08	3,77E-08	7,68E-08	5,72E-05
f	0	0,87	2,60	2,716	2,89	2,25

Tablica 3.4 – Osrednjeni parametri puzanja uneseni u program MASA

Na osnovu ove formule i podataka računato je puzanje aluminija i ponašanje pri visokim temperaturama.

4 REZULTATI PRORAČUNA – NESTACIONARNE SIMULACIJE

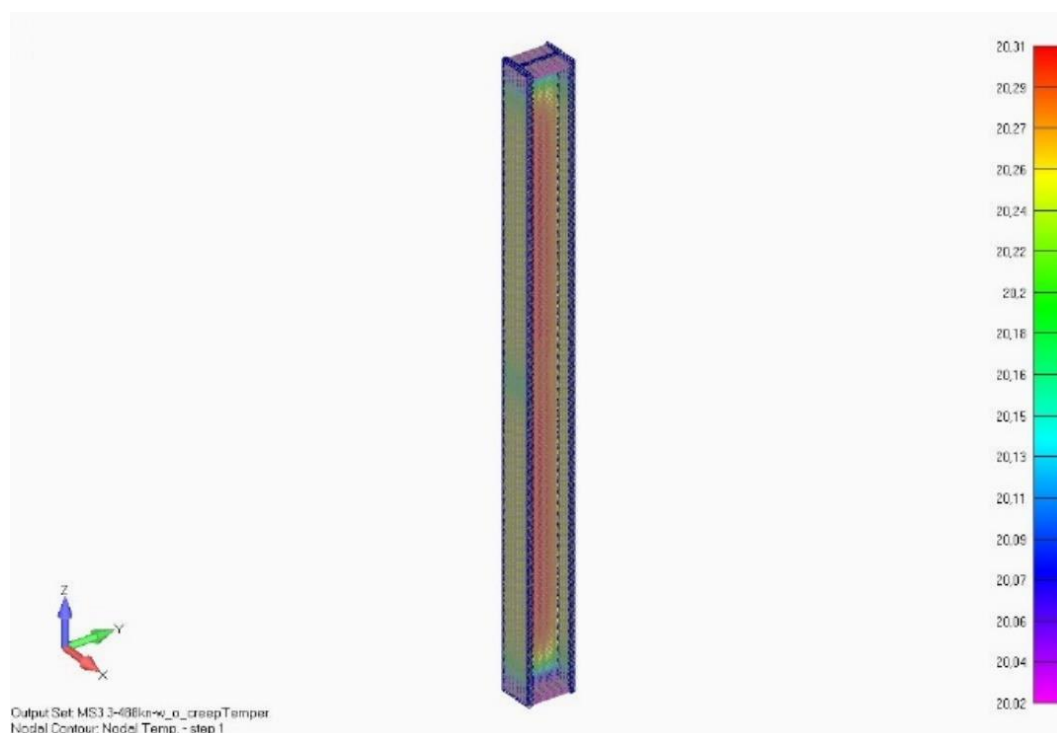
Kod nestacionarnih simulacija prvo se nanosi sila na stup a nakon nanesenog ukupnog opterećenja se stup zagrijava sve do njegova popuštanja.

Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, pa je stoga određeno da svaki korak predstavlja 1 min.

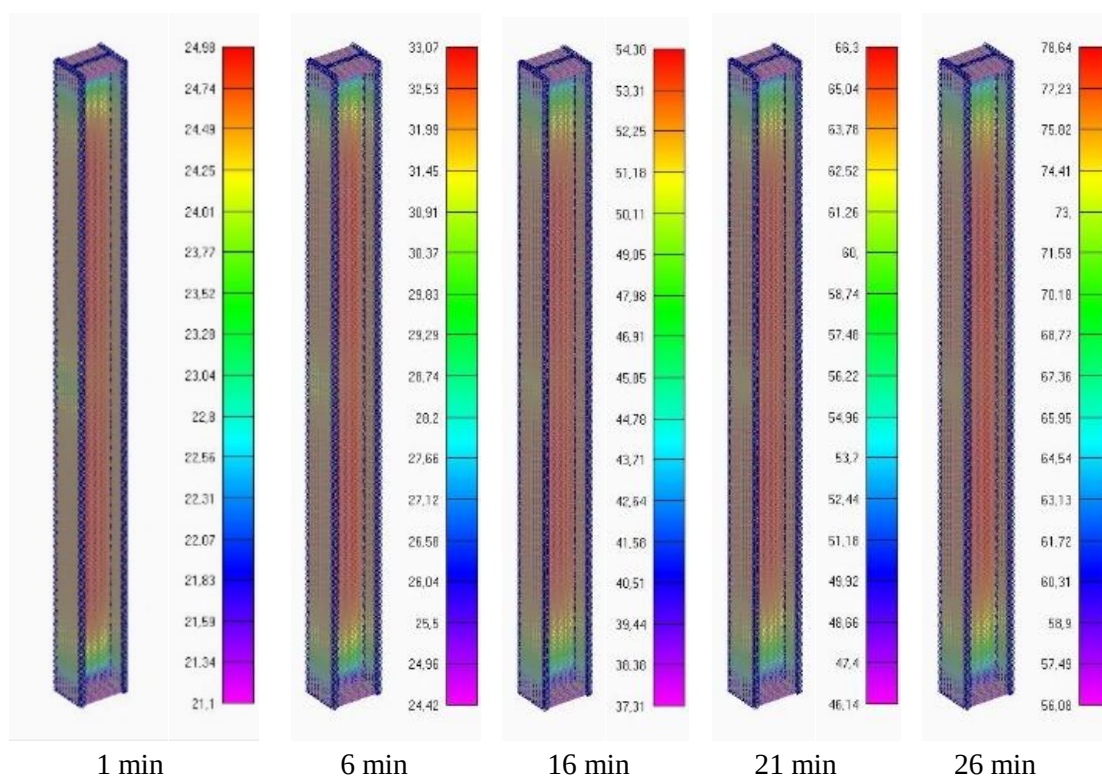
Skala temperature izražena je u $^{\circ}\text{C}$

Prikazani pomaci su u Y smjeru i iznosi su u mm.

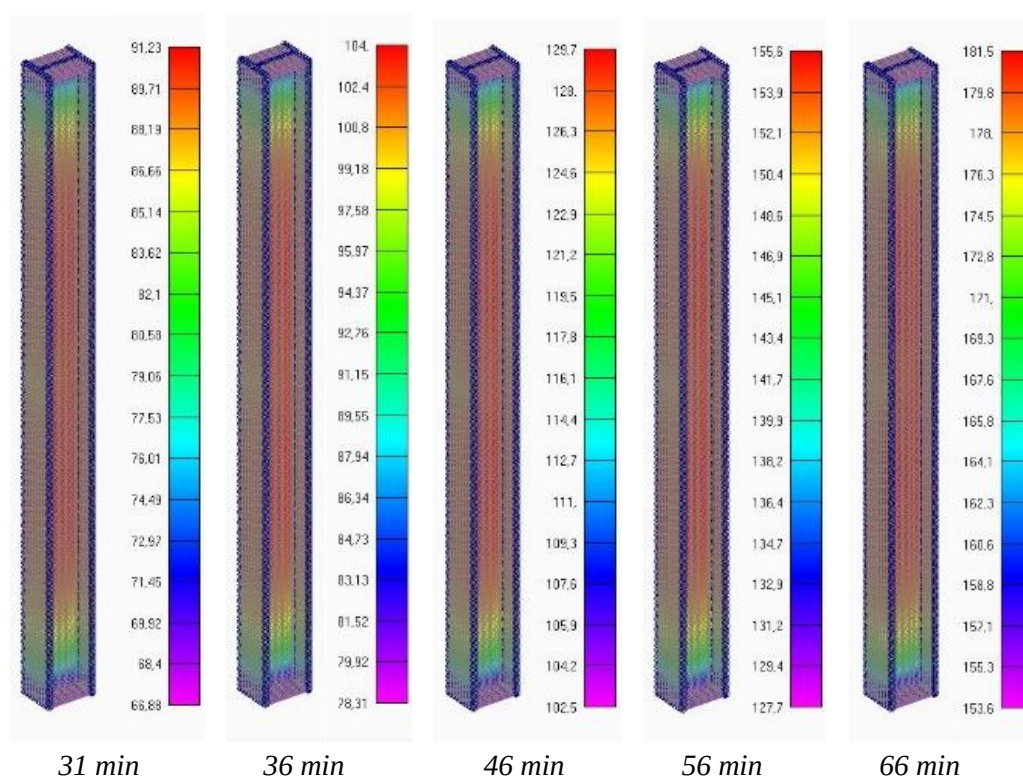
Prikazana naprezanja su von Mises naprezanja u N/mm^2



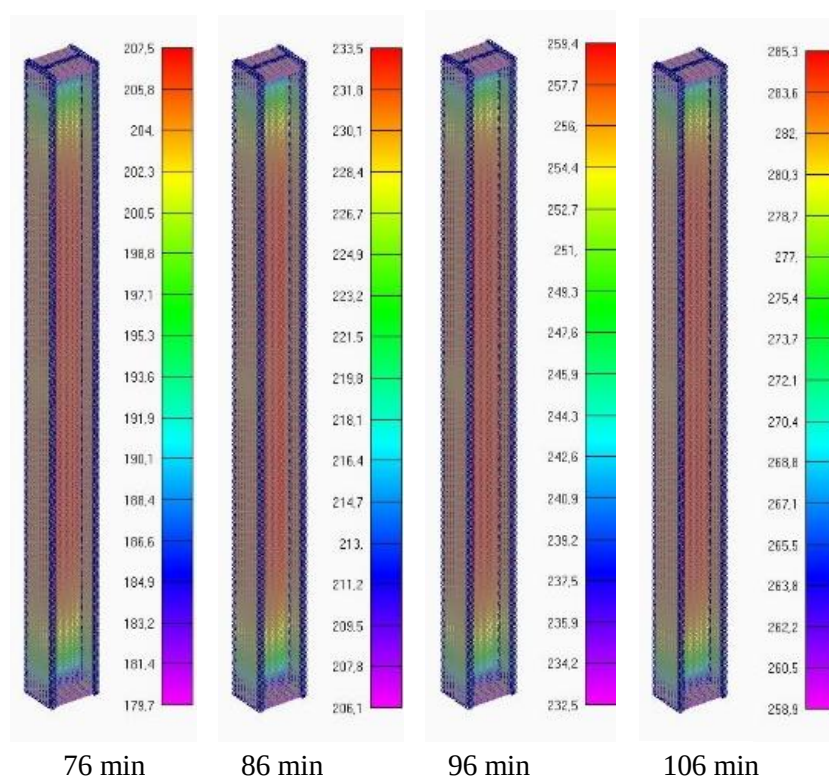
Slika 4.1 – Temperatura stupa pri izloženosti temperaturi od 20°C



Slika 4.2 – Temperatura stupa nakon 1,6,16,21,26 min pri zagrijavanju brzinom od 2,5°C/min



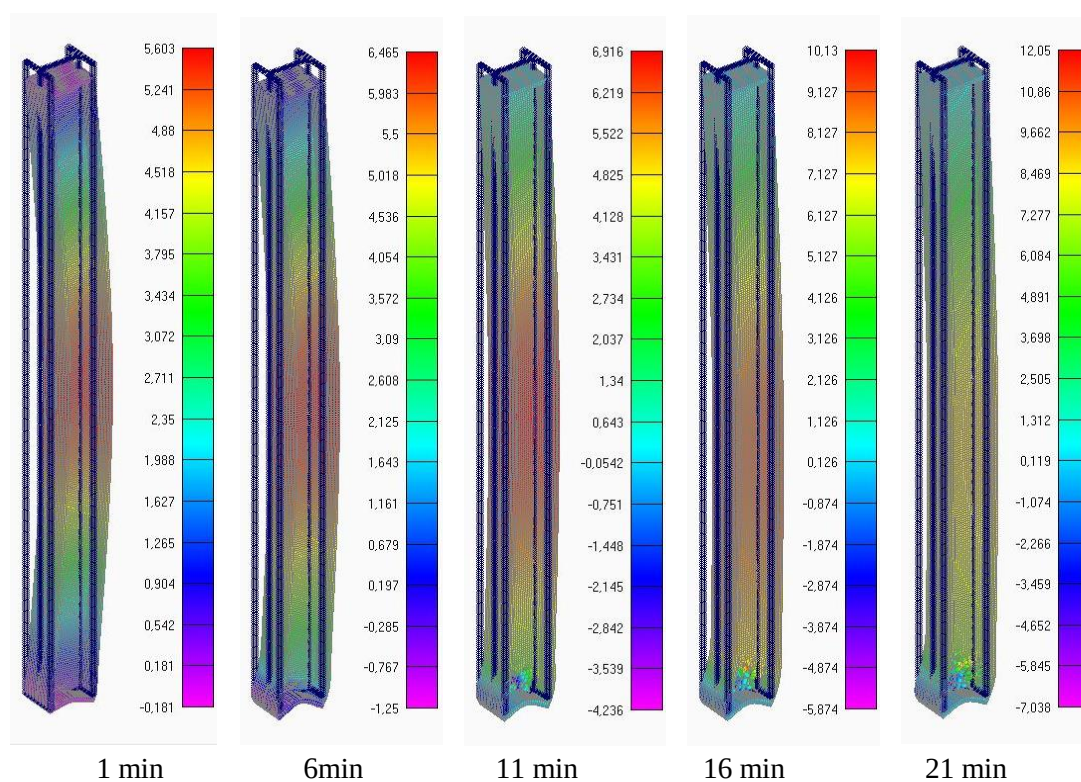
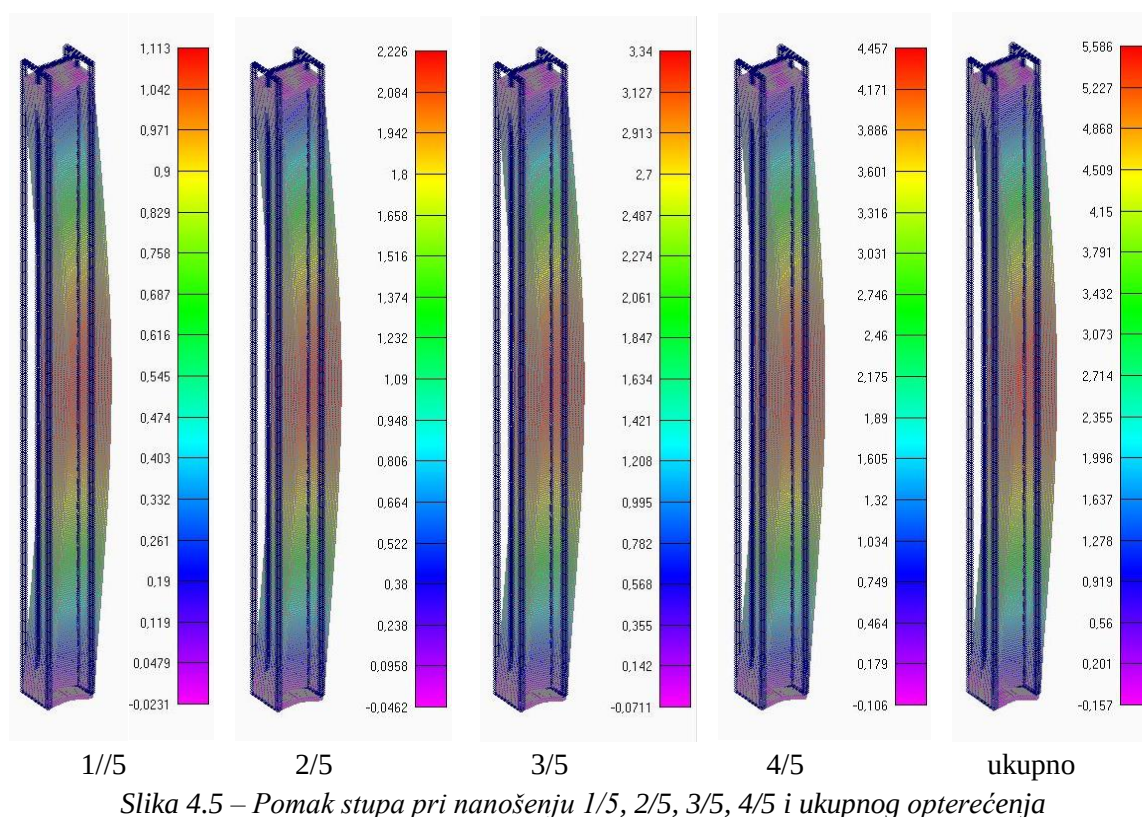
Slika 4.3 – Temperatura stupa nakon 31, 36, 46, 56, 66 min pri zagrijavanju brzinom od 2,5°C/min

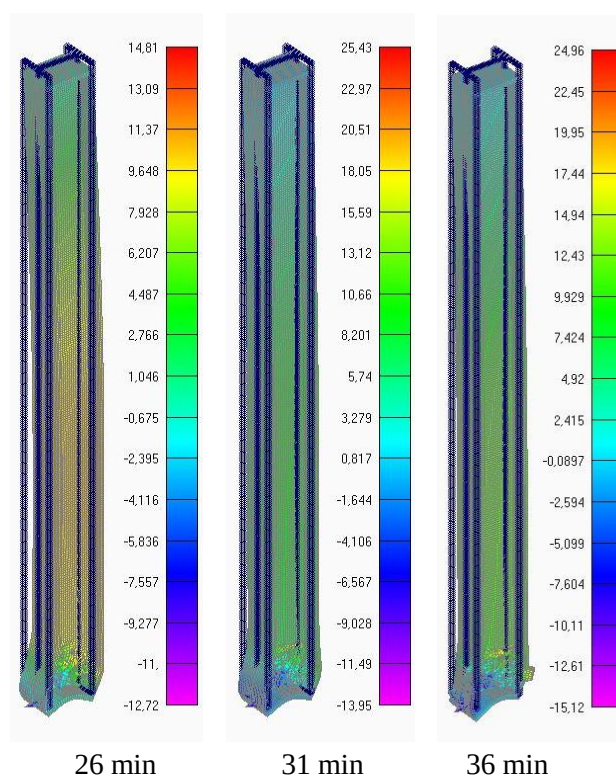


Slika 4.4 – Temperatura stupa nakon 76, 86, 96, 106 min pri zagrijavanju brzinom od 2,5°C/min

4.1 Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$

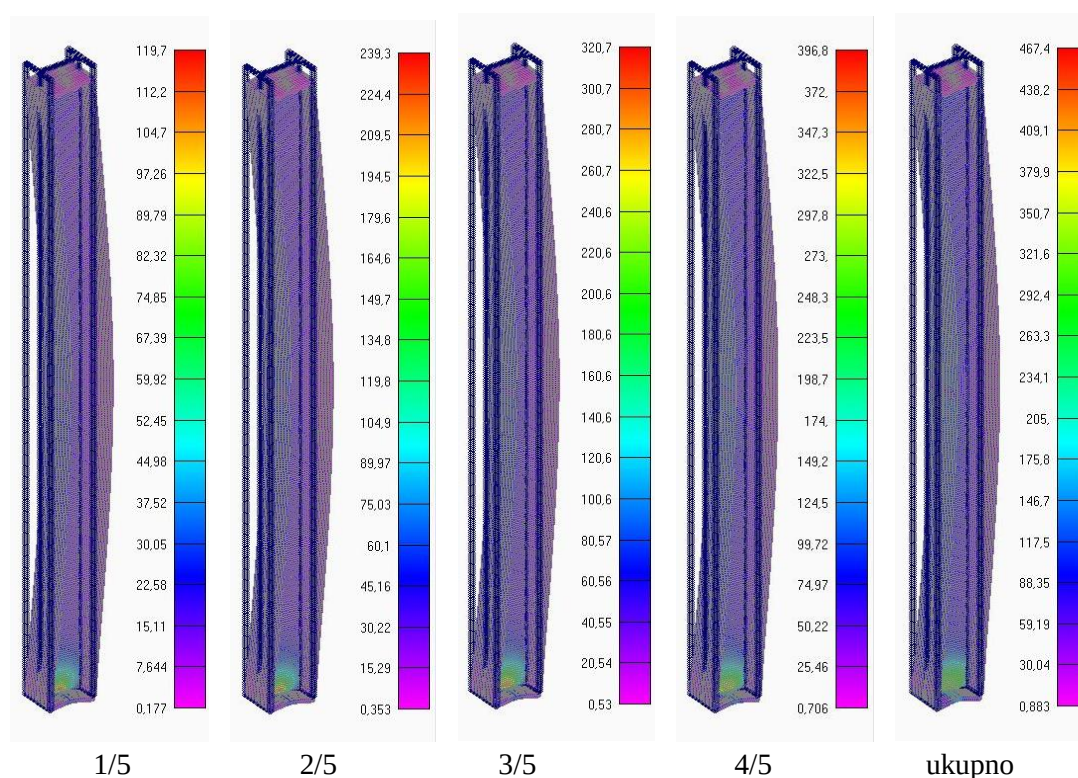
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



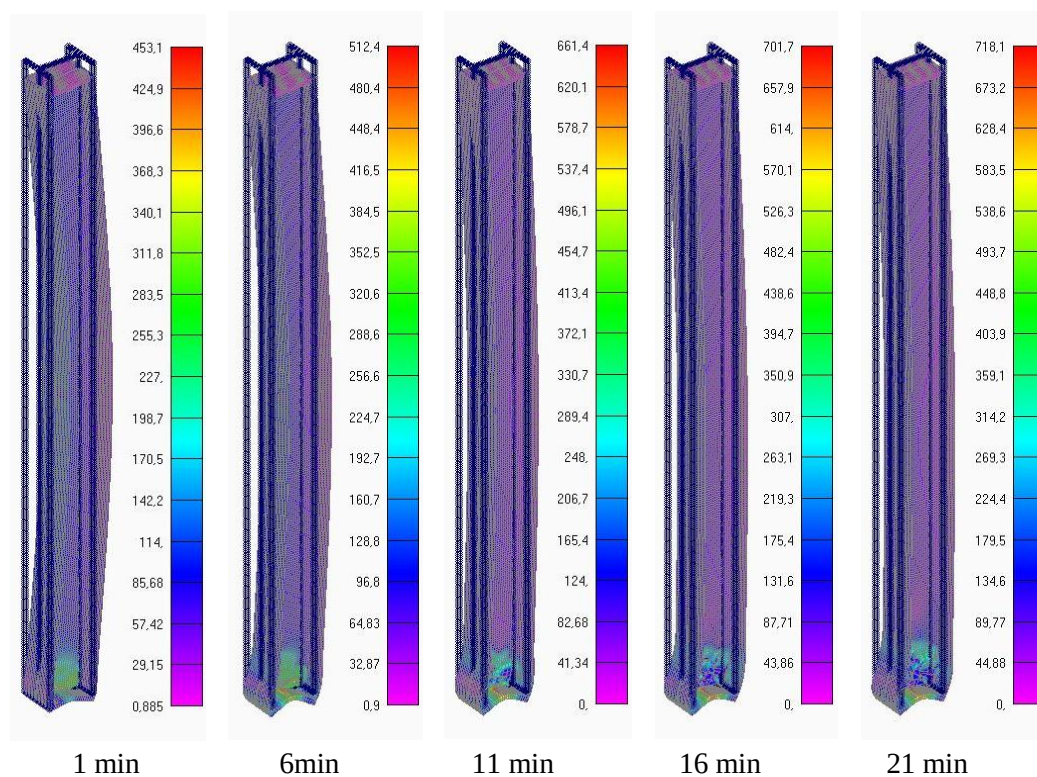


Slika 4.7 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 26, 31, 36 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

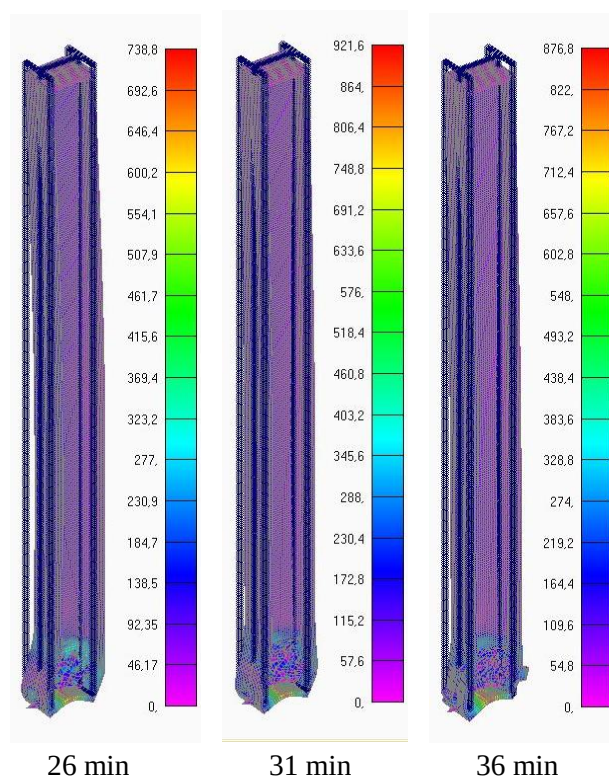
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 4.8 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



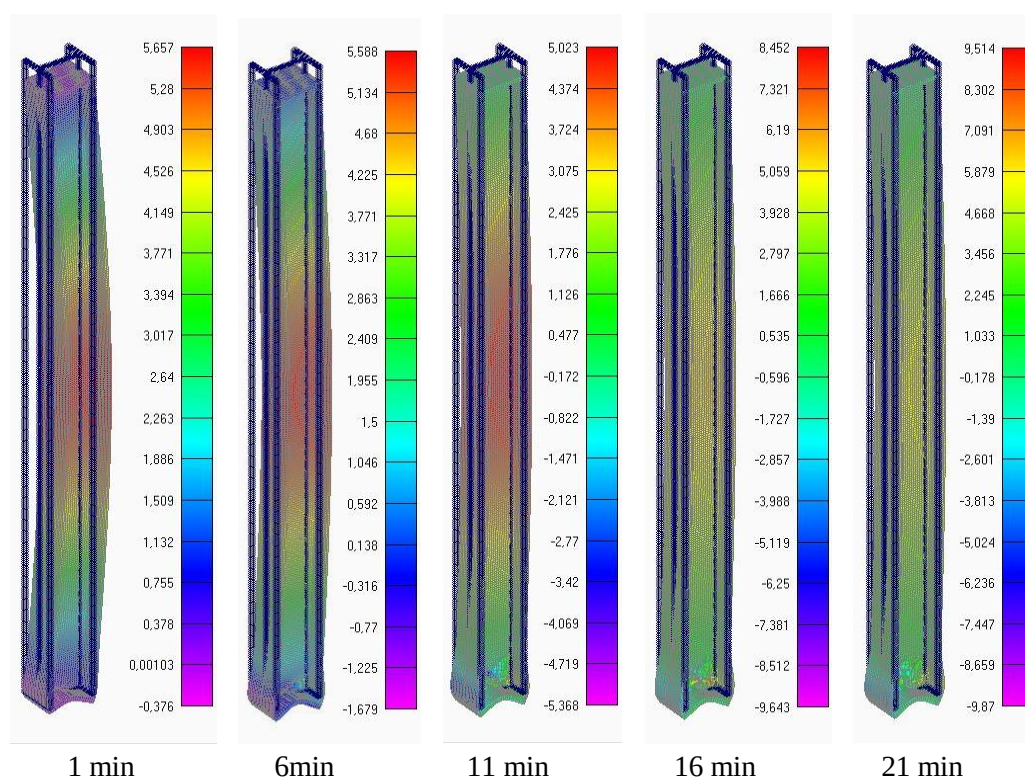
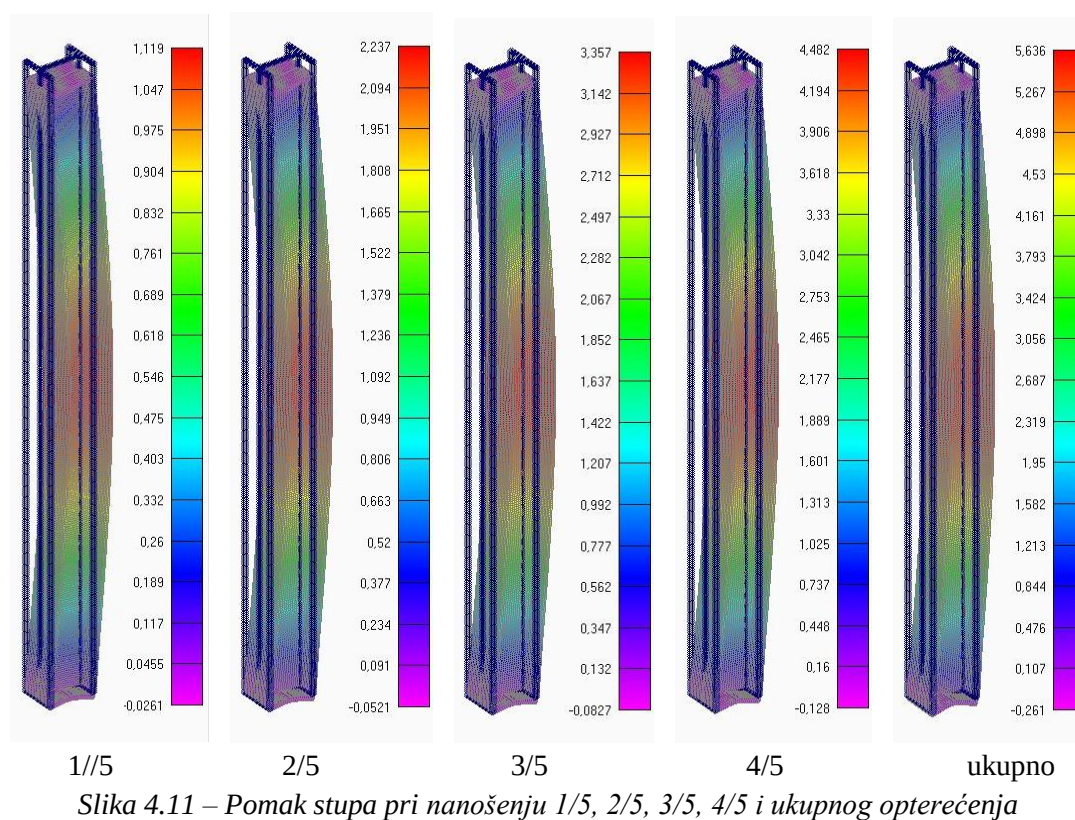
Slika 4.9 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 11, 16, 21 min grijanja brzinom 2,5°C/min

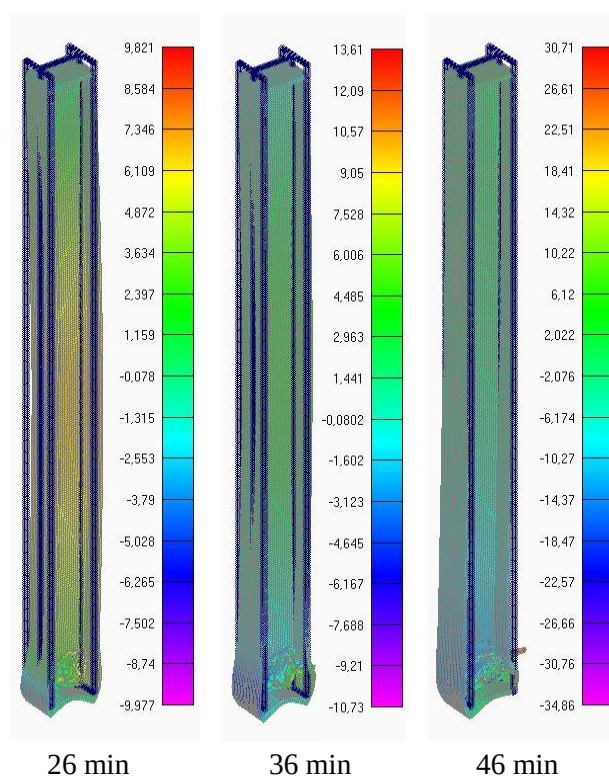


Slika 4.10 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 26, 31, 36 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4.2 Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F_2 = 549 \text{ kN}$

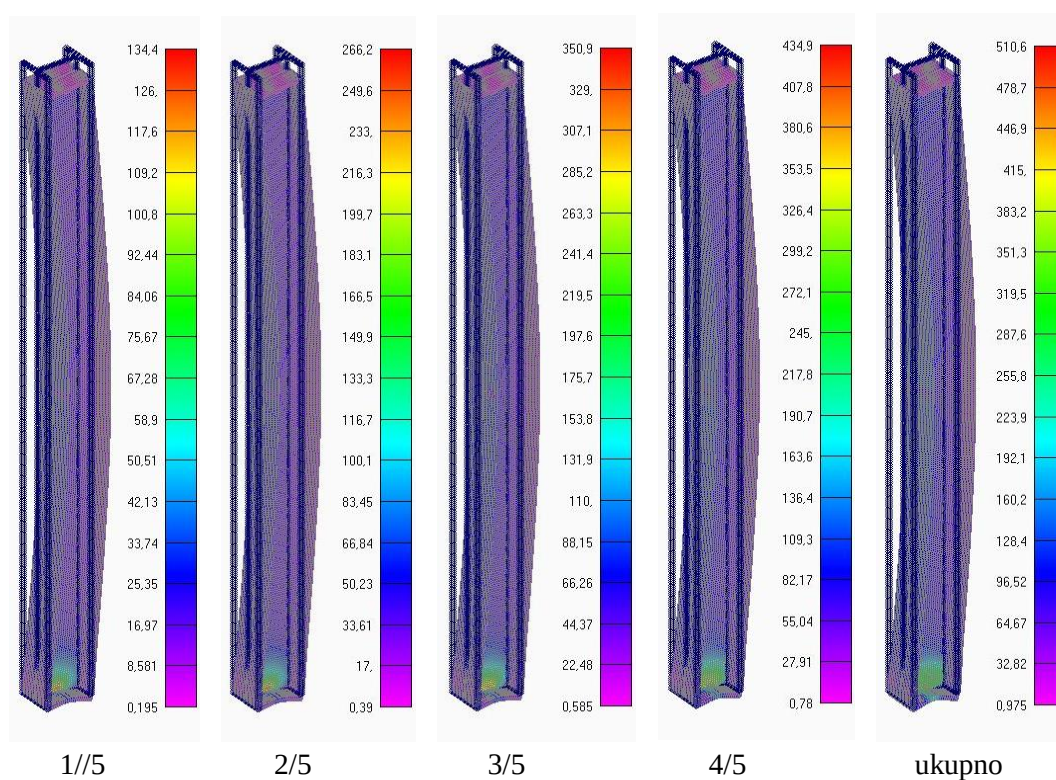
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



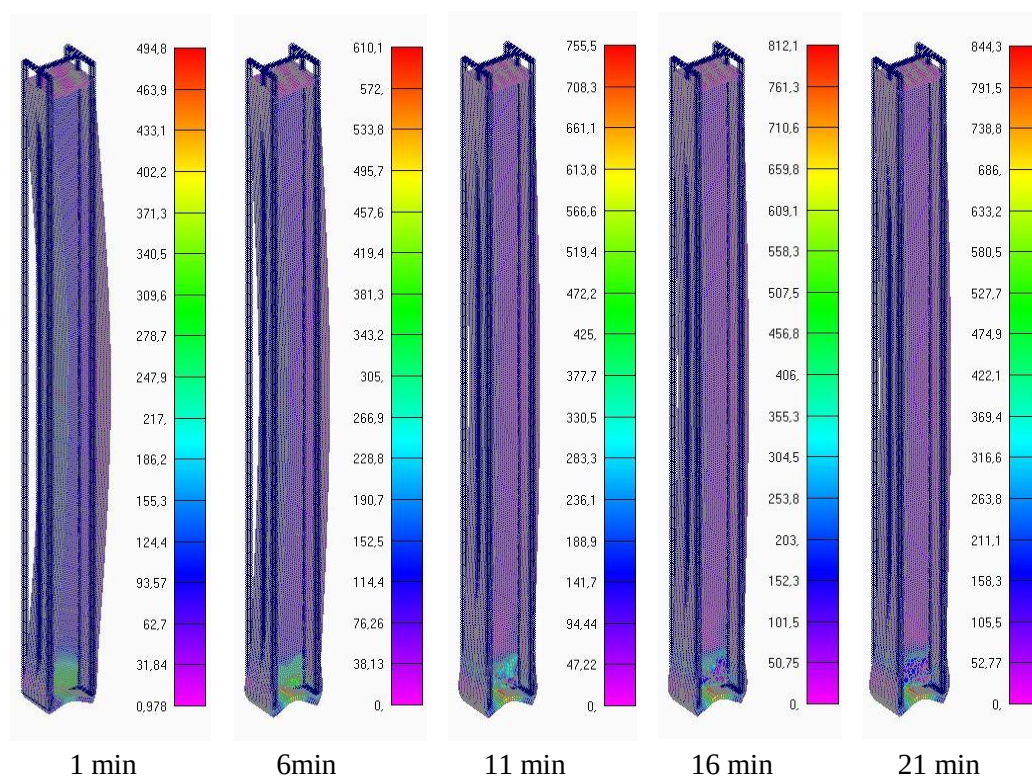


Slika 4.13 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 26, 36, 46 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

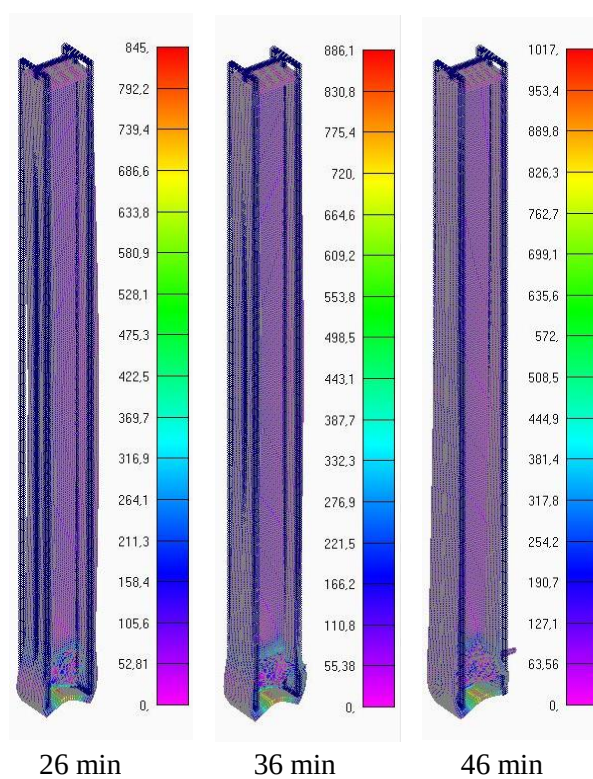
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 4.14 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



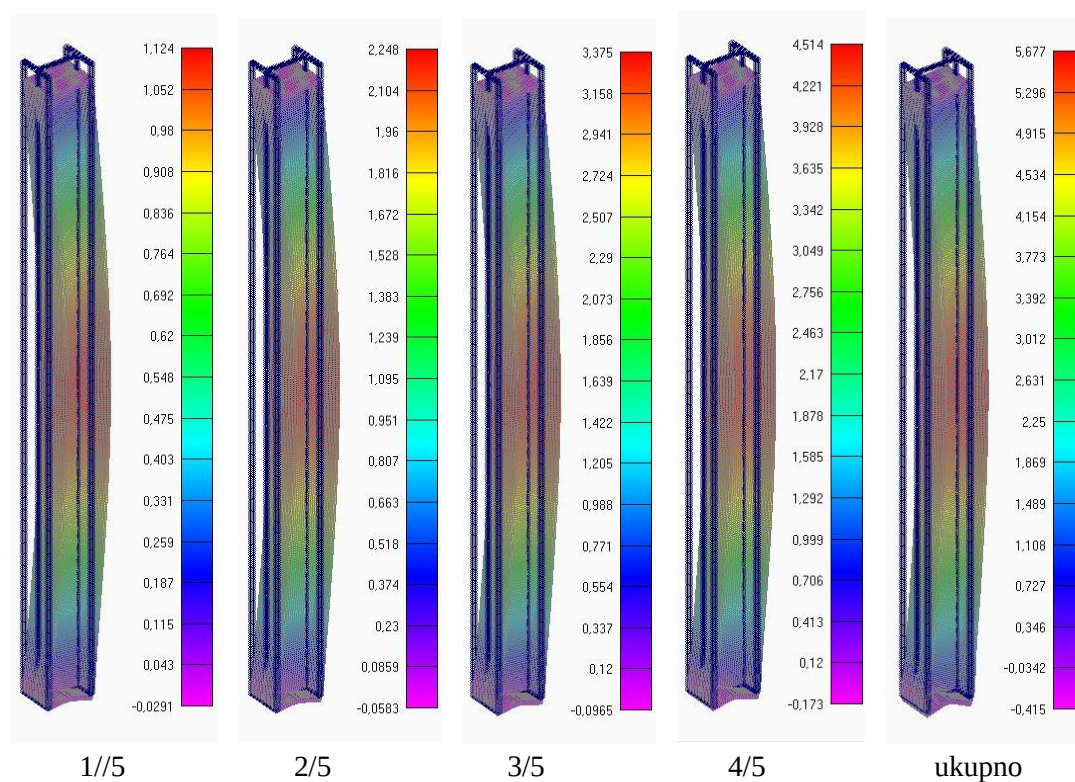
Slika 4.15 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 11, 16, 21 min grijanja brzinom 2,5°C/min



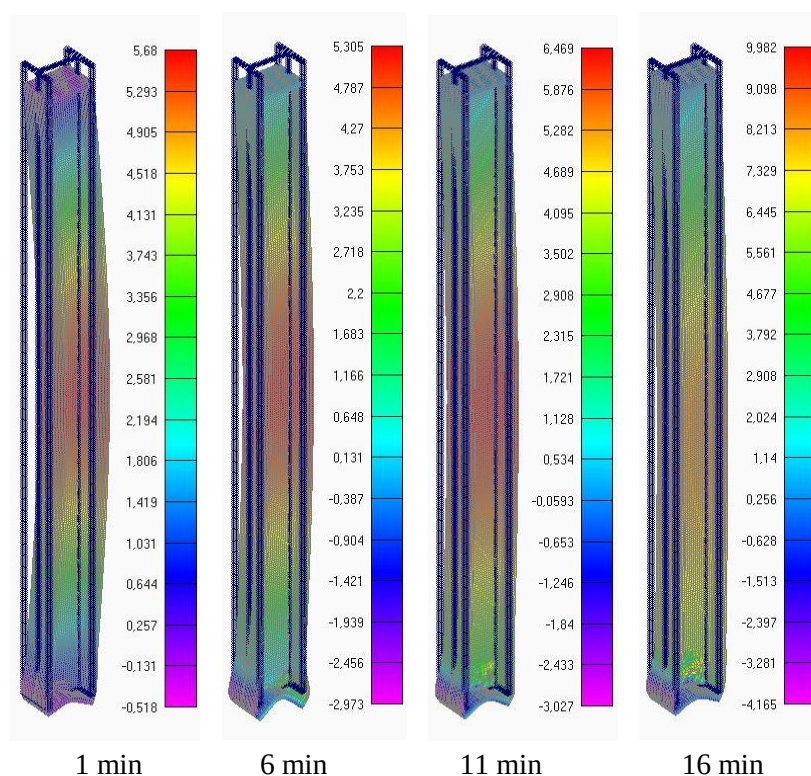
Slika 4.16 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 26, 36, 46 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4.3 Rezultati za MODEL 1 – bez utjecaja puzanja $F_3 = 610 \text{ kN}$

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

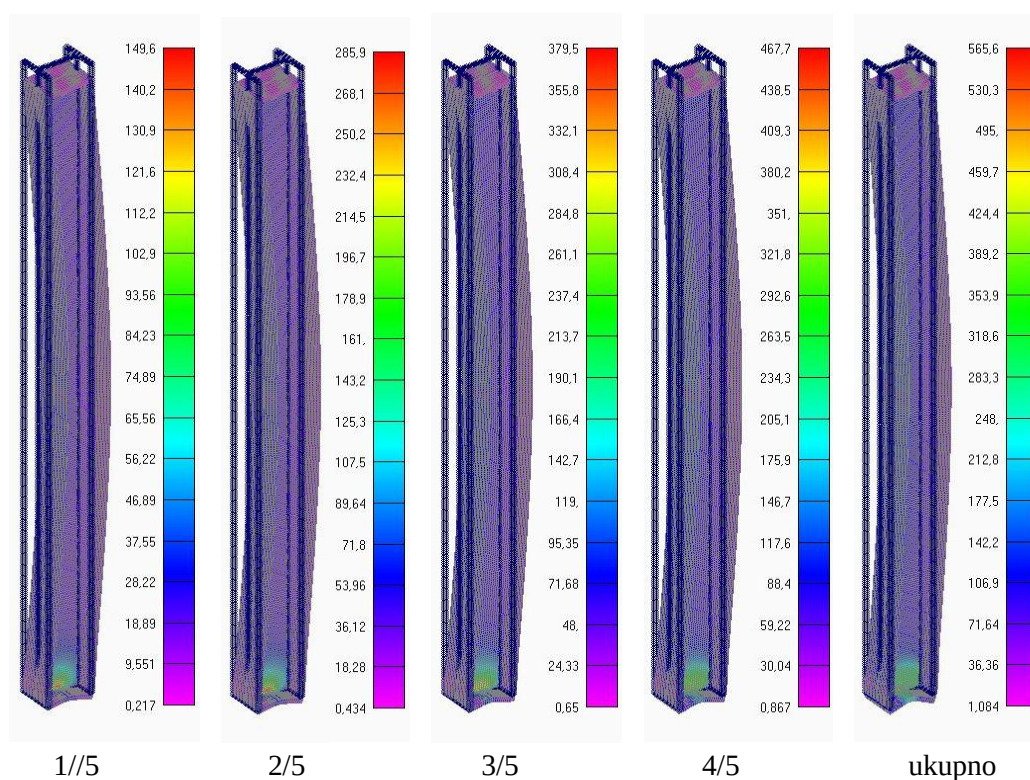


Slika 4.17 – Pomak stupa pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja

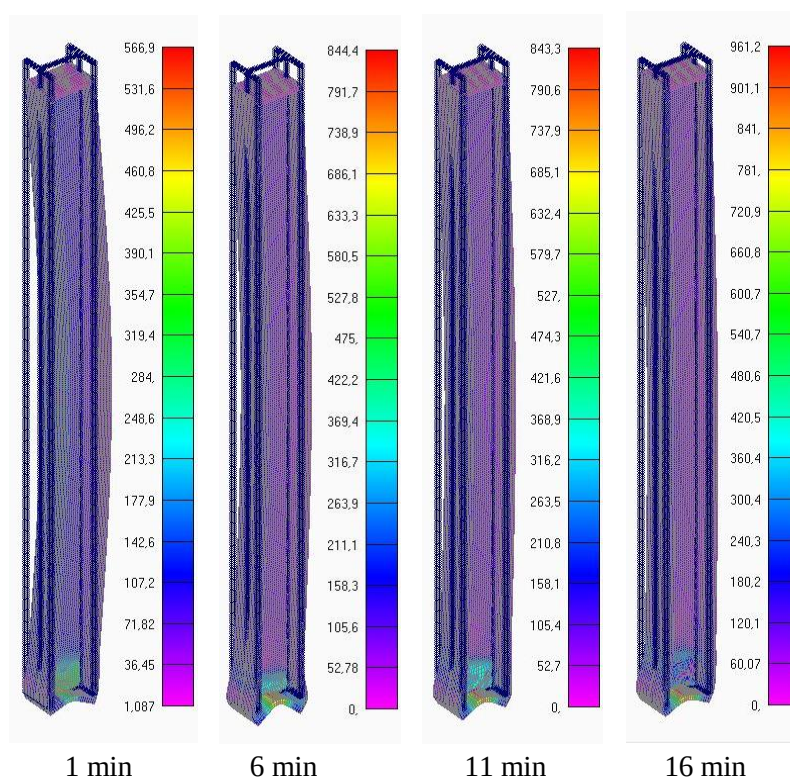


Slika 4.18 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 1, 6, 11, 16 min grijanja brzinom $2,5^\circ\text{C/min}$

Prikaz naprezanja u stupu usljed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



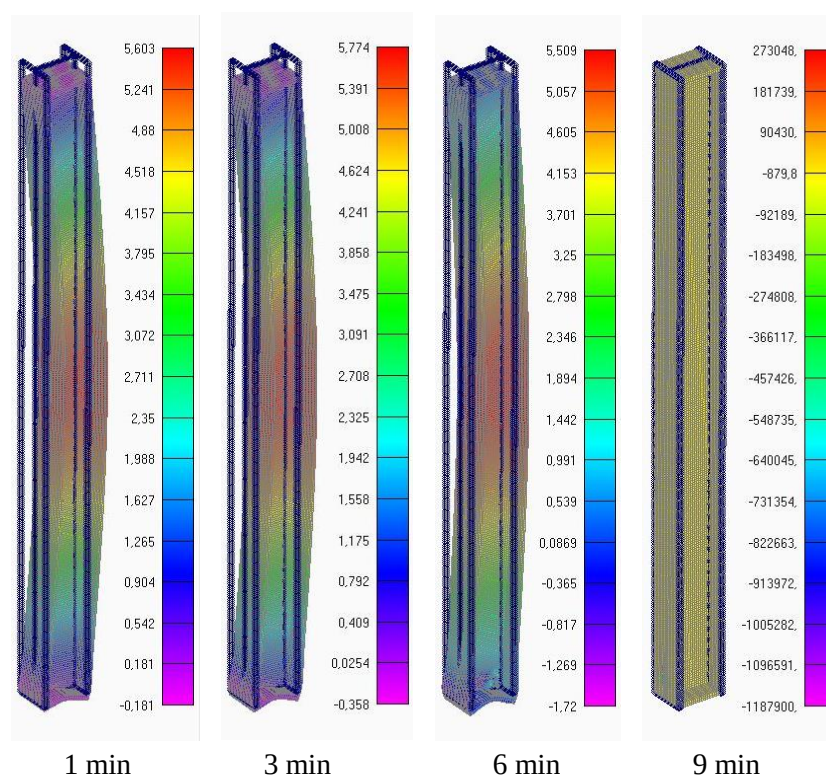
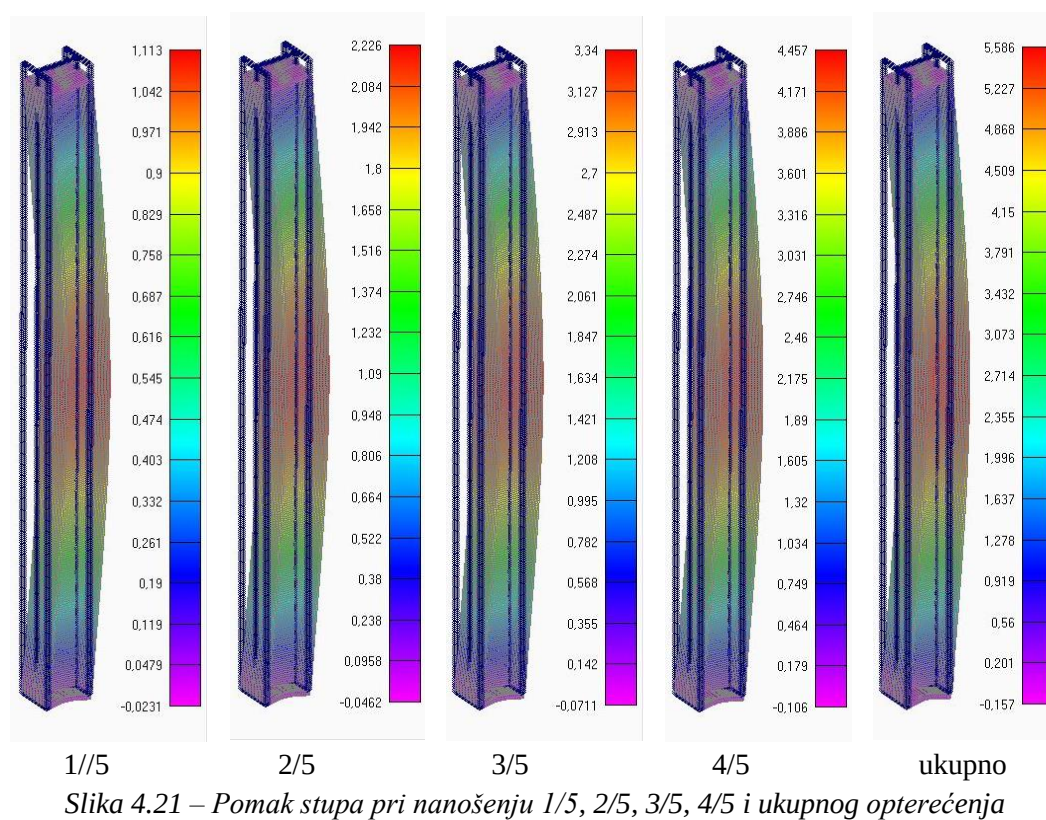
Slika 4.19 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



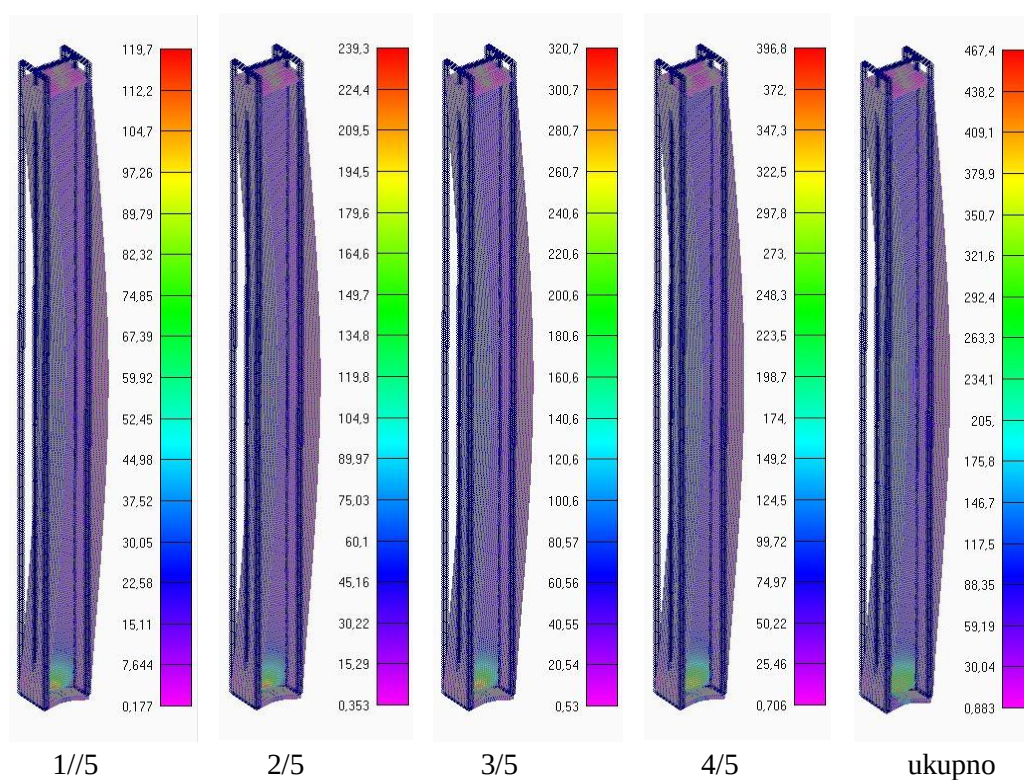
Slika 4.20 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 11, 16 min grijanja brzinom 2,5°C/min

4.4 Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$

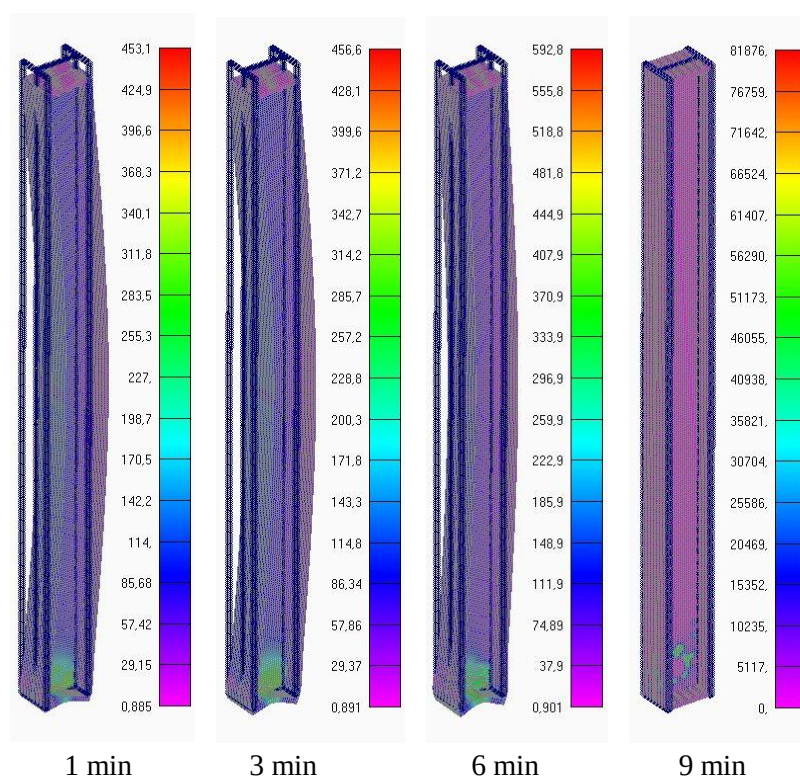
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



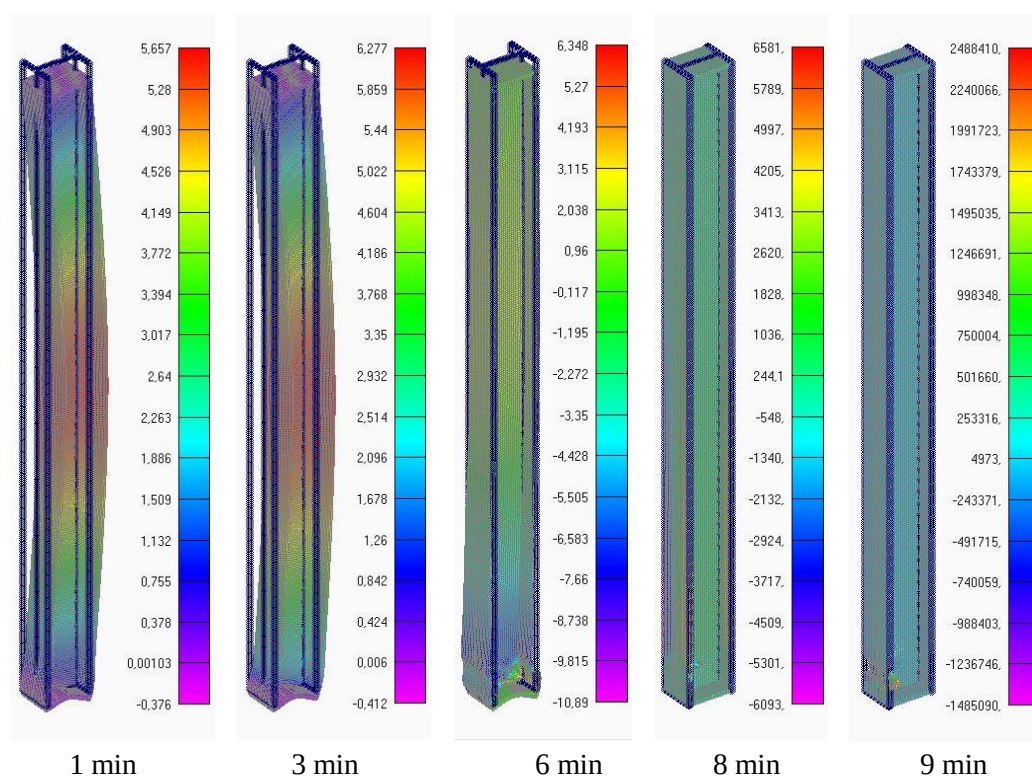
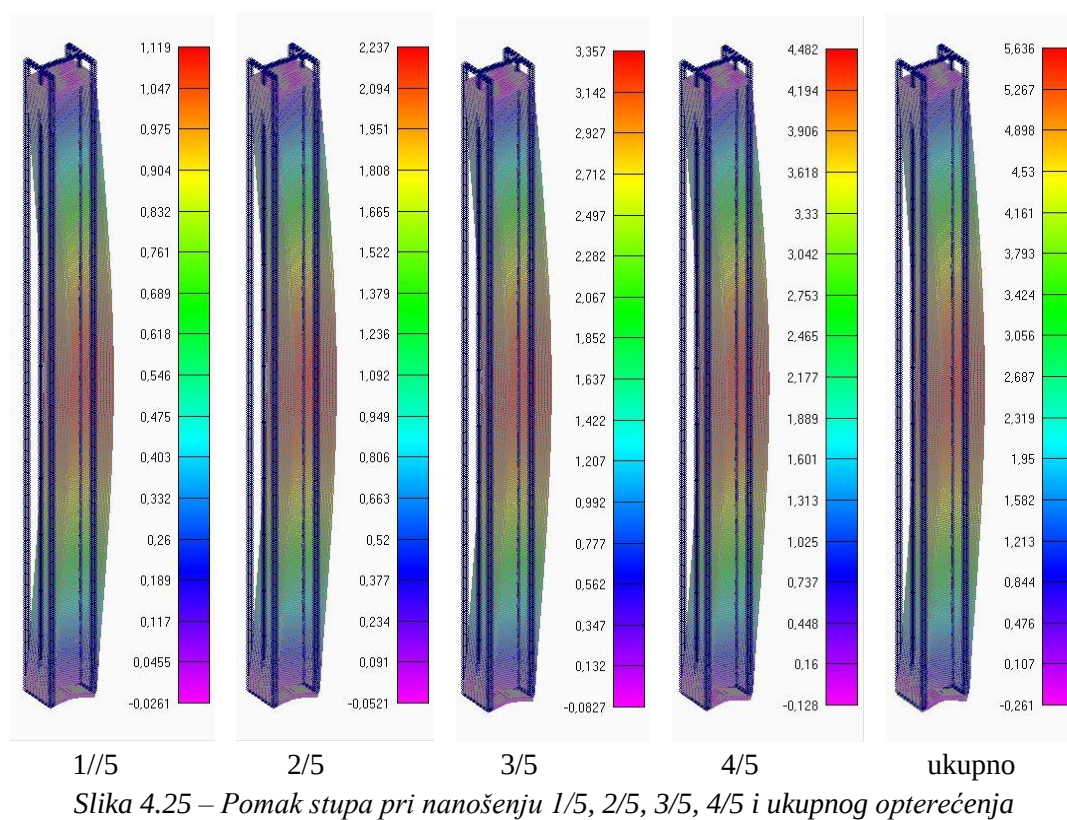
Slika 4.23 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



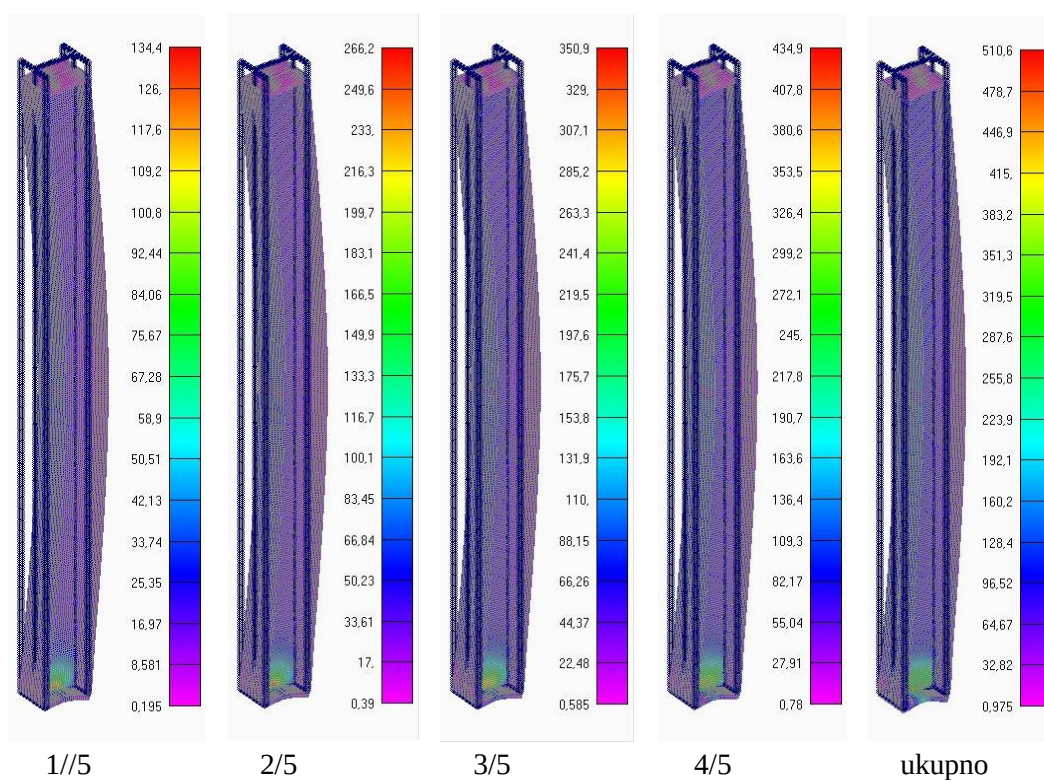
Slika 4.24 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 3, 6, 9 min grijanja brzinom 2,5°C/min

4.5 Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F_2 = 549 \text{ kN}$

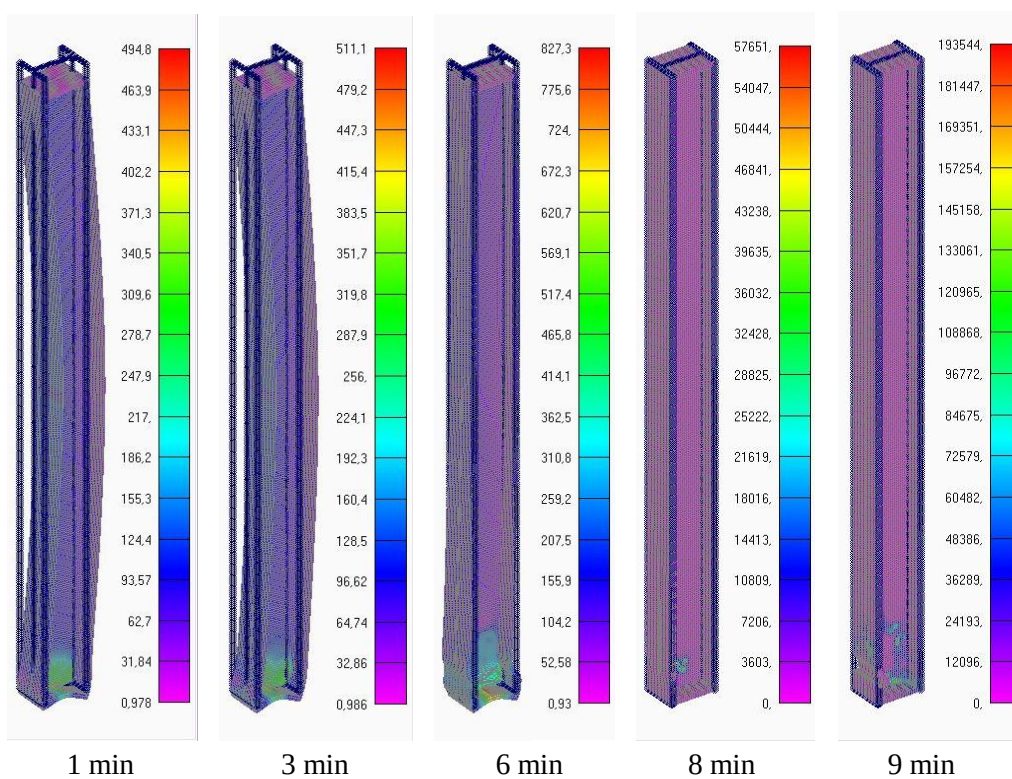
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



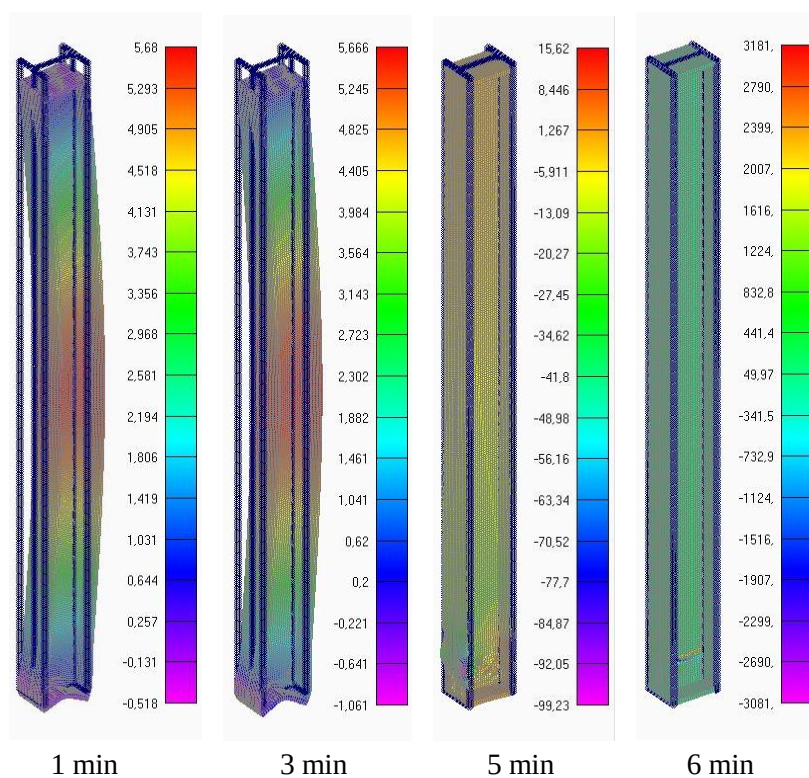
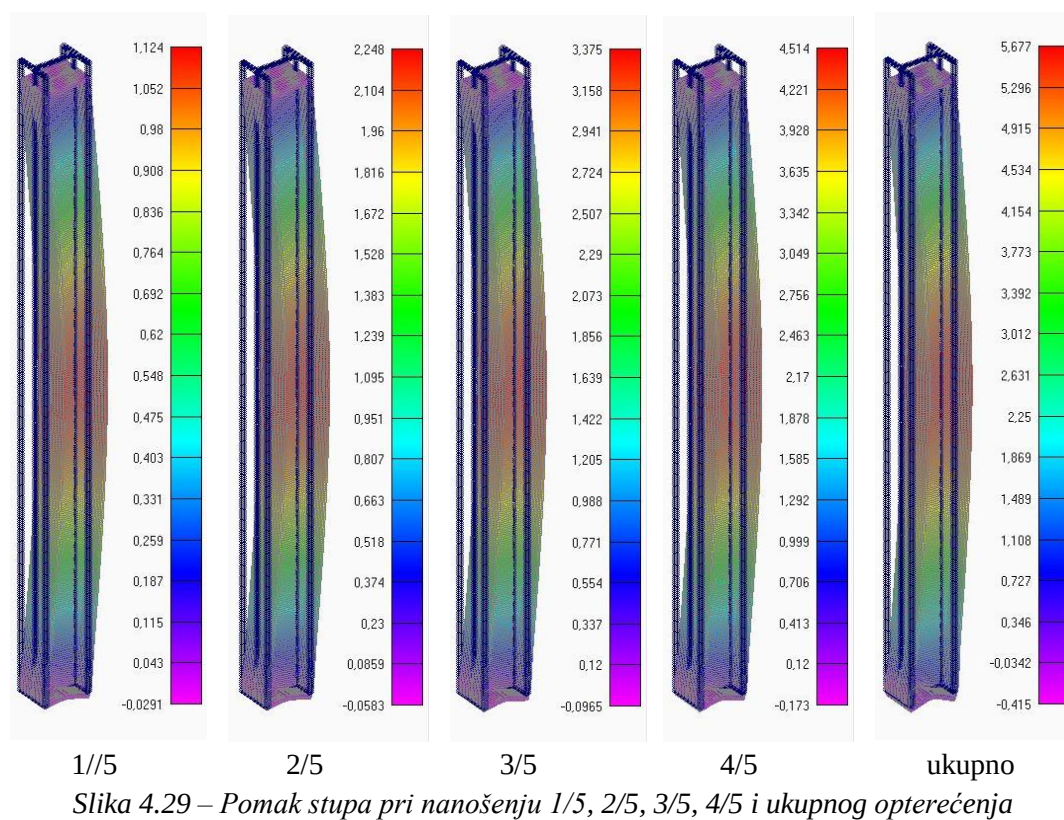
Slika 4.27 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



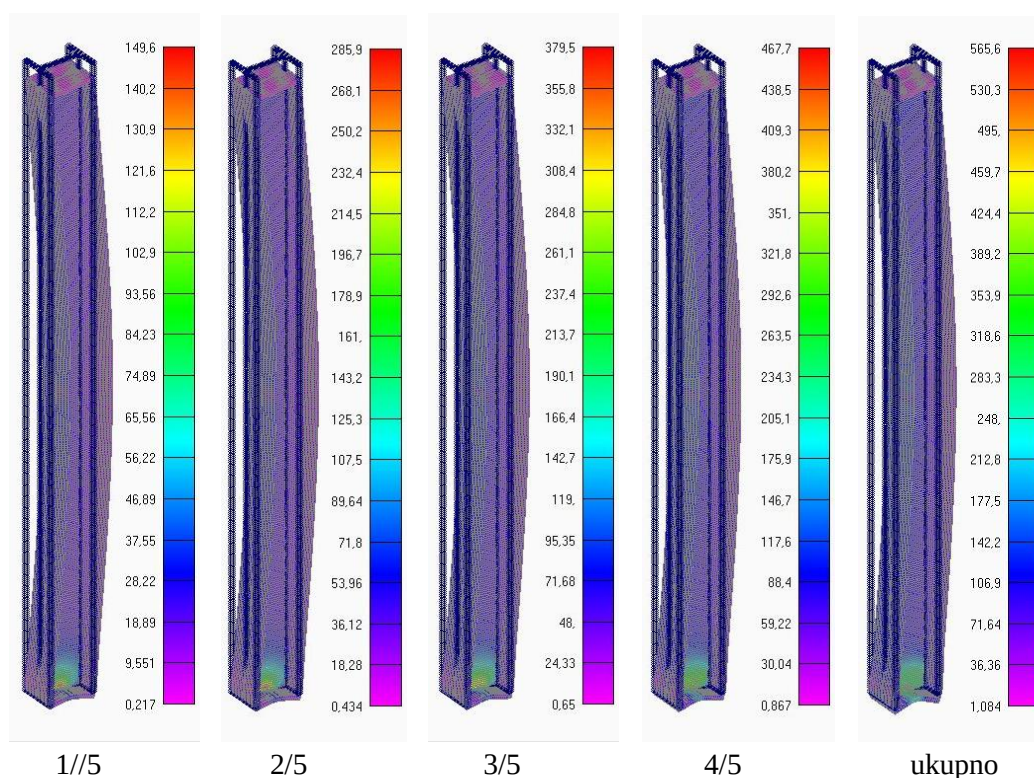
Slika 4.28 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 3, 6, 8, 9 min grijanja brzinom 2,5°C/min

4.6 Rezultati za MODEL 1 – sa utjecajem puzanja $F_3 = 610 \text{ kN}$

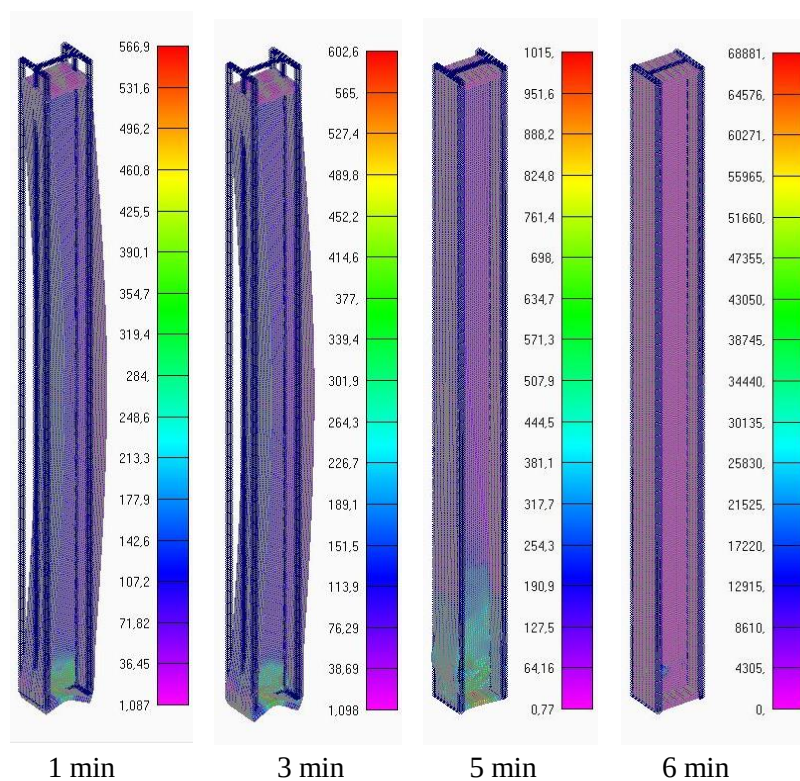
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



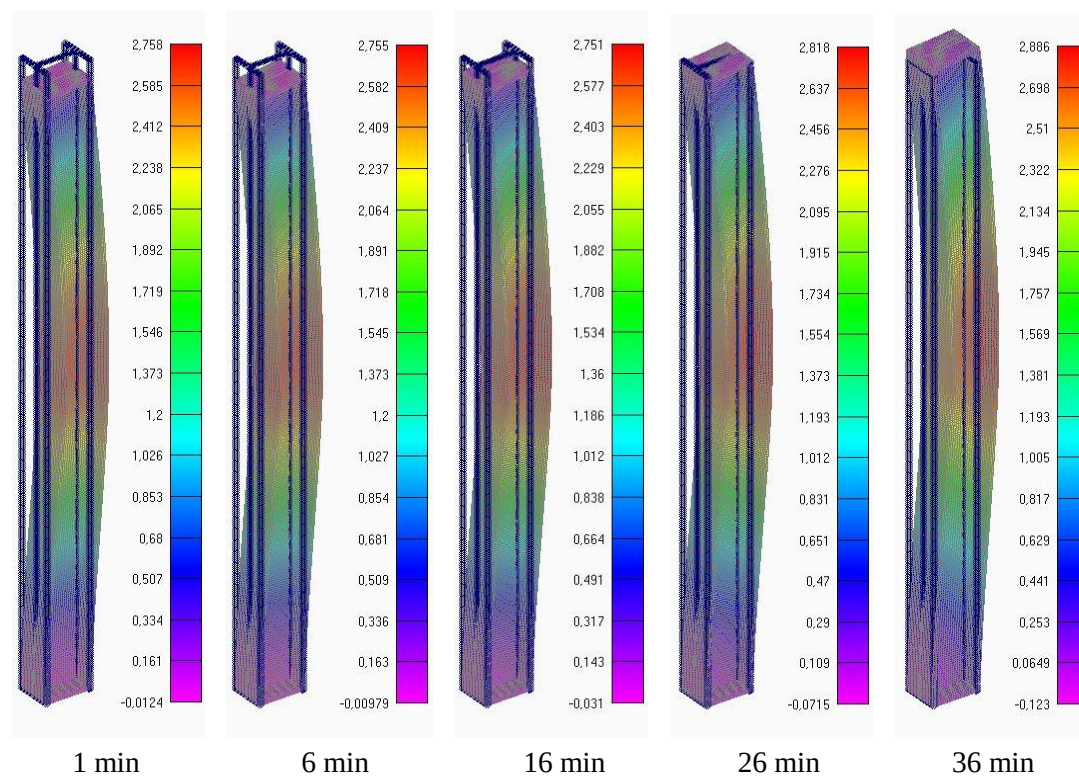
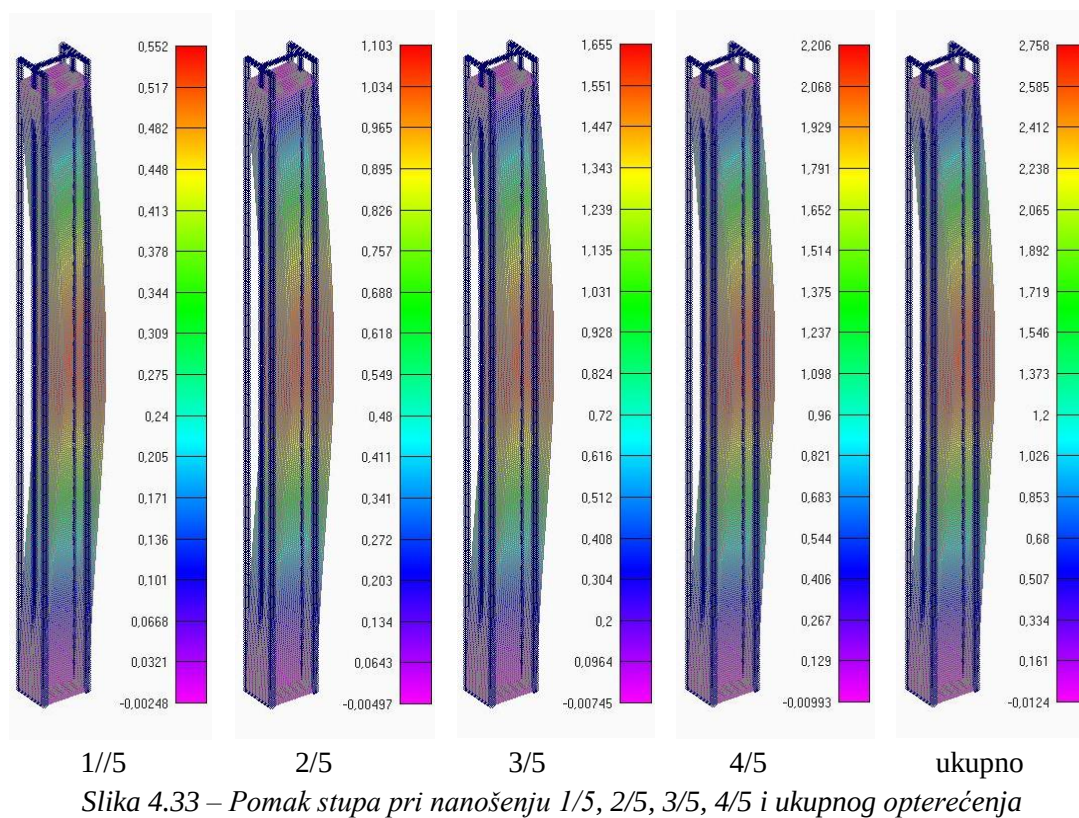
Slika 4.31 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja

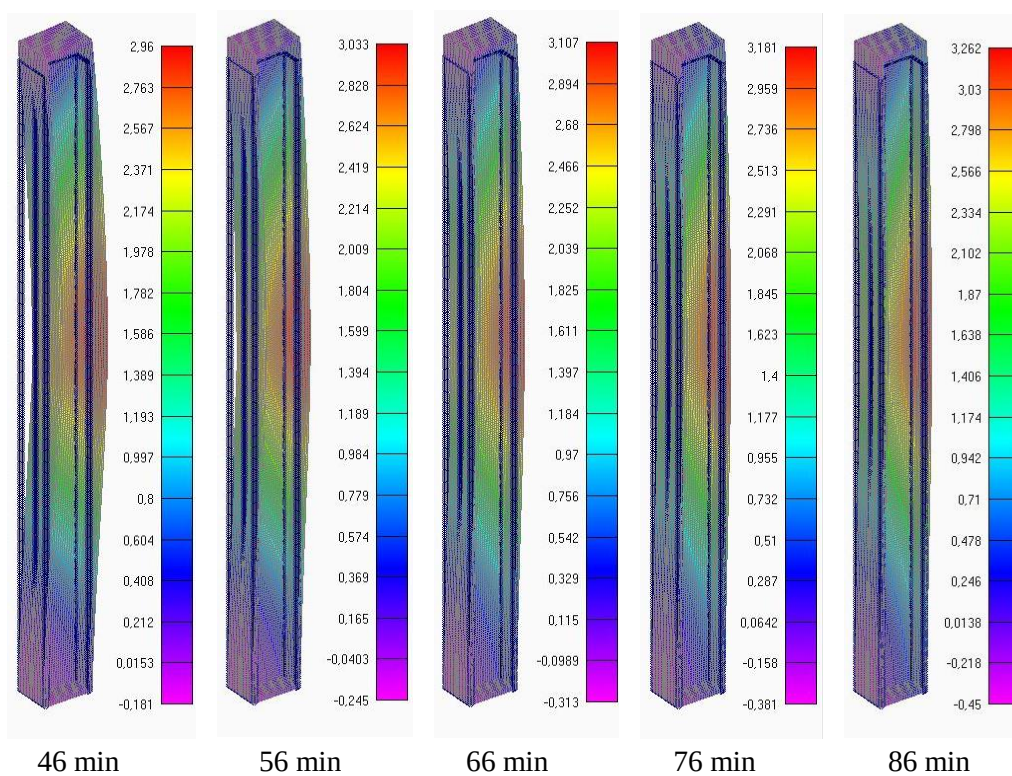


Slika 4.32 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 3, 5, 6 min grijanja brzinom 2,5°C/min

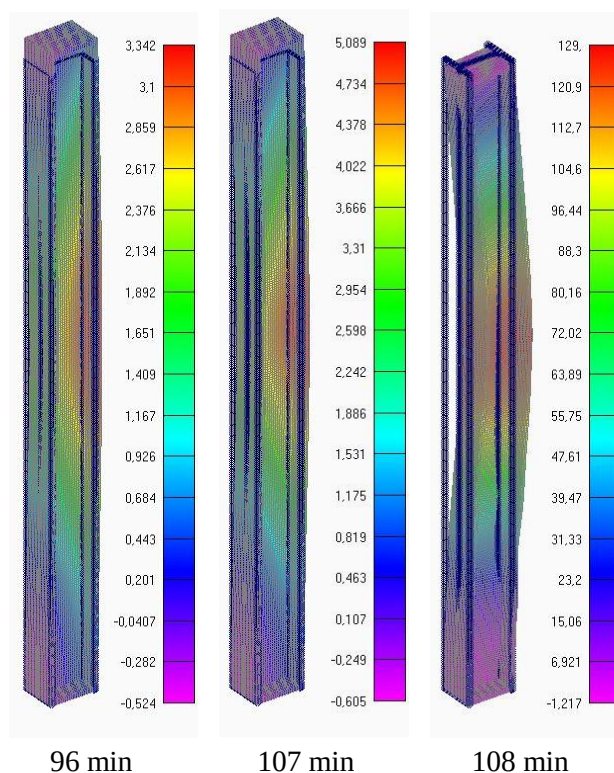
4.7 Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



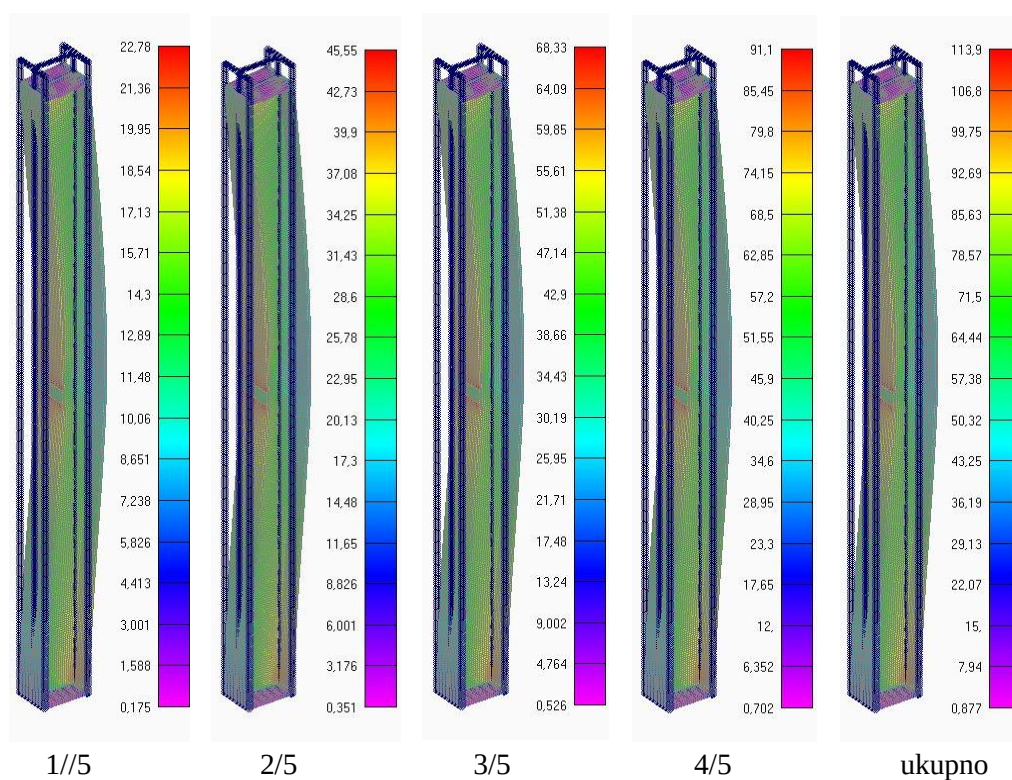


Slika 4.35 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

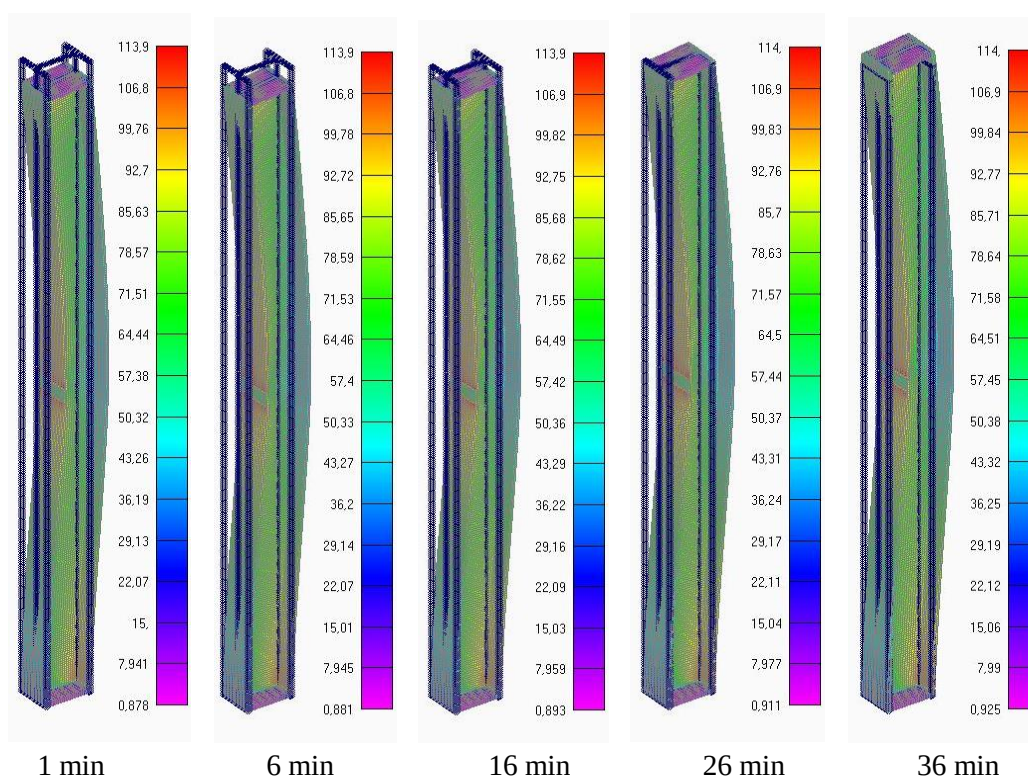


Slika 4.36 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96 min grijanja brzinom 2,5°C/min

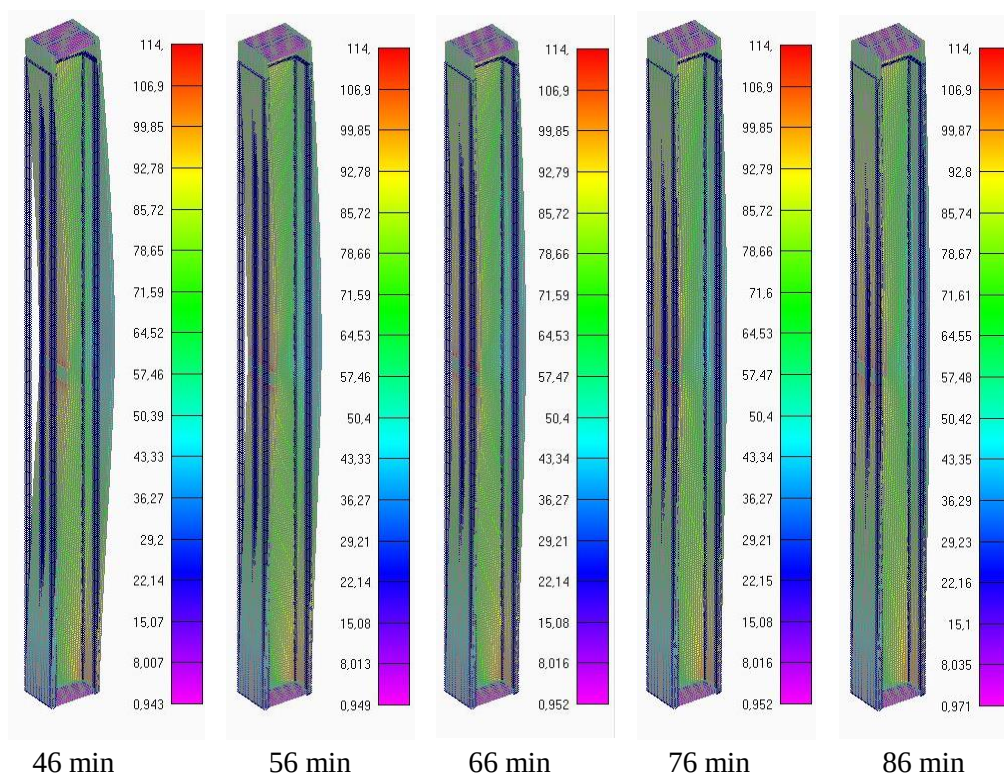
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



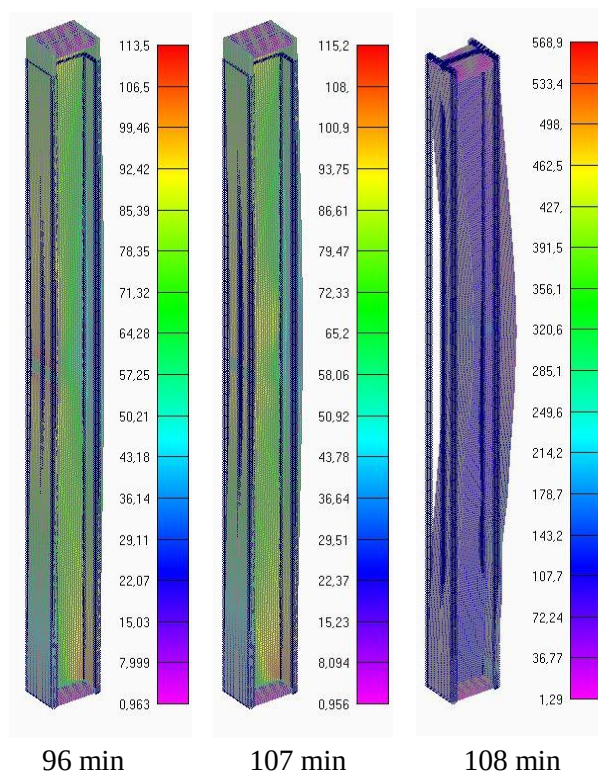
Slika 4.37 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.38 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



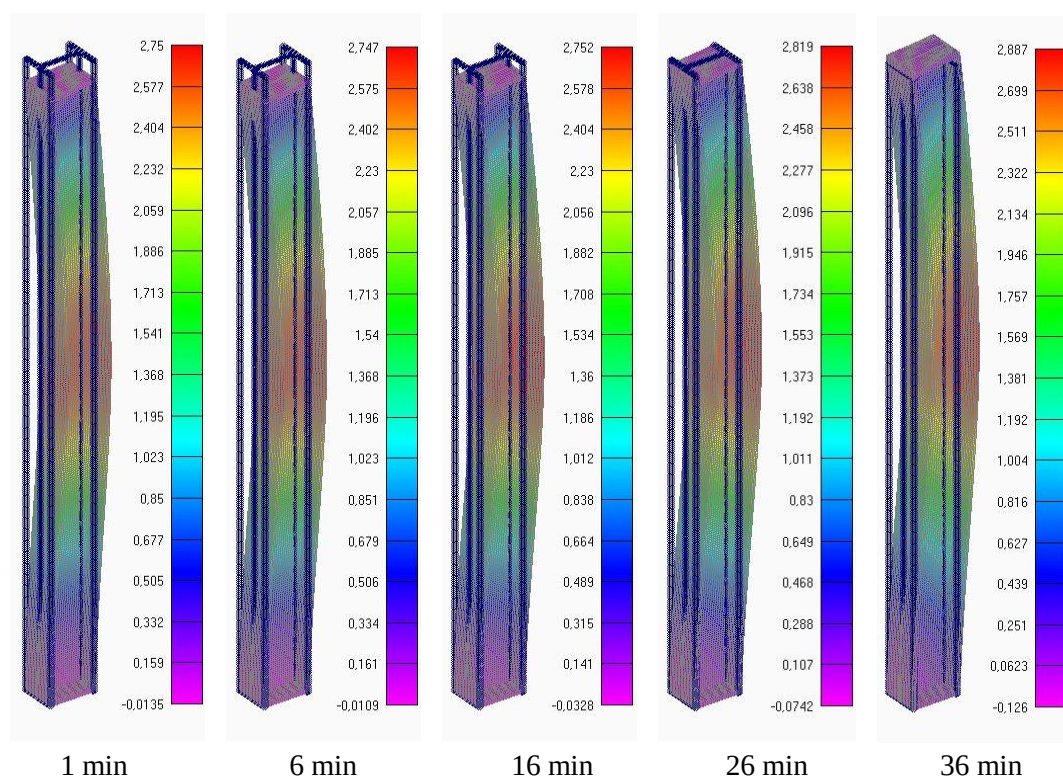
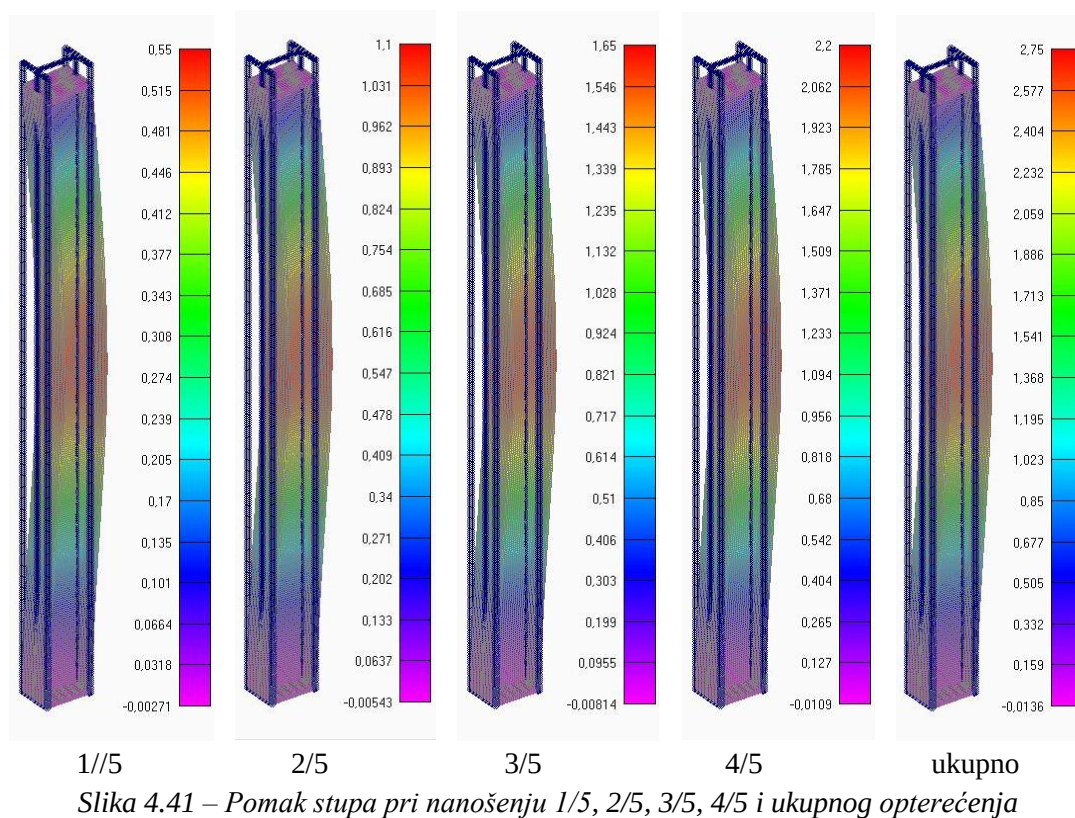
Slika 4.39 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min



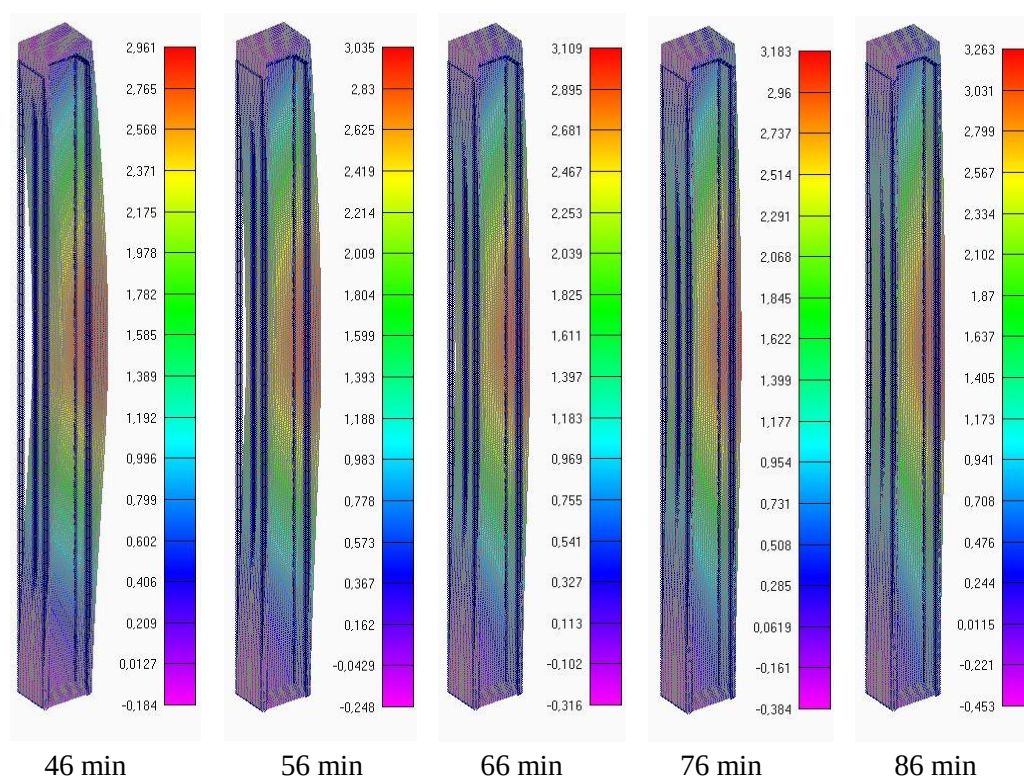
Slika 4.40 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 107, 108 min grijanja brzinom 2,5°C/min

4.8 Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F_2 = 549 \text{ kN}$

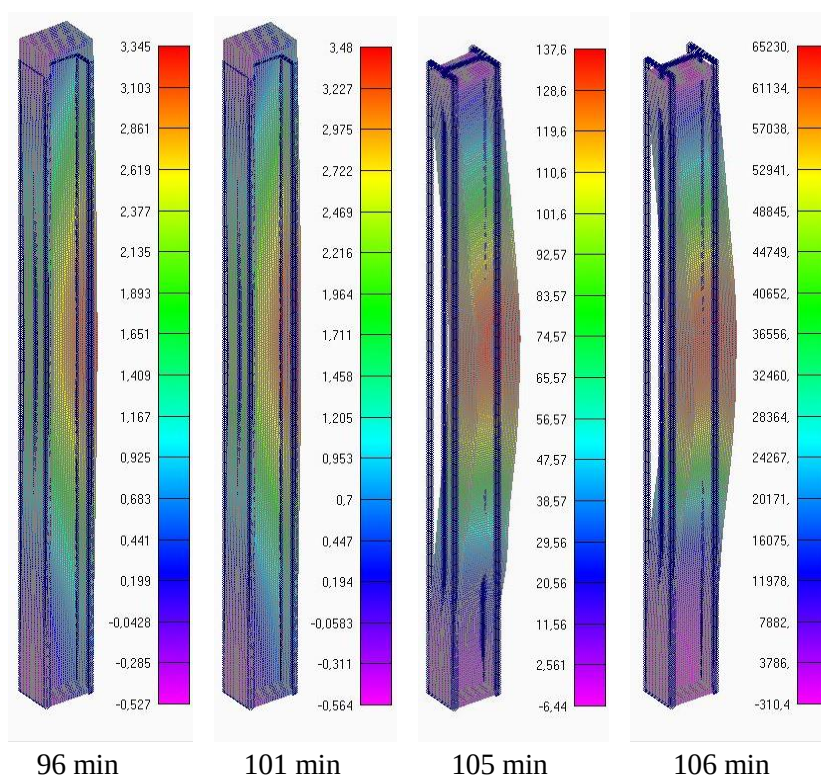
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 4.42 – Pomak stupa nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom $2,5^\circ\text{C}/\text{min}$

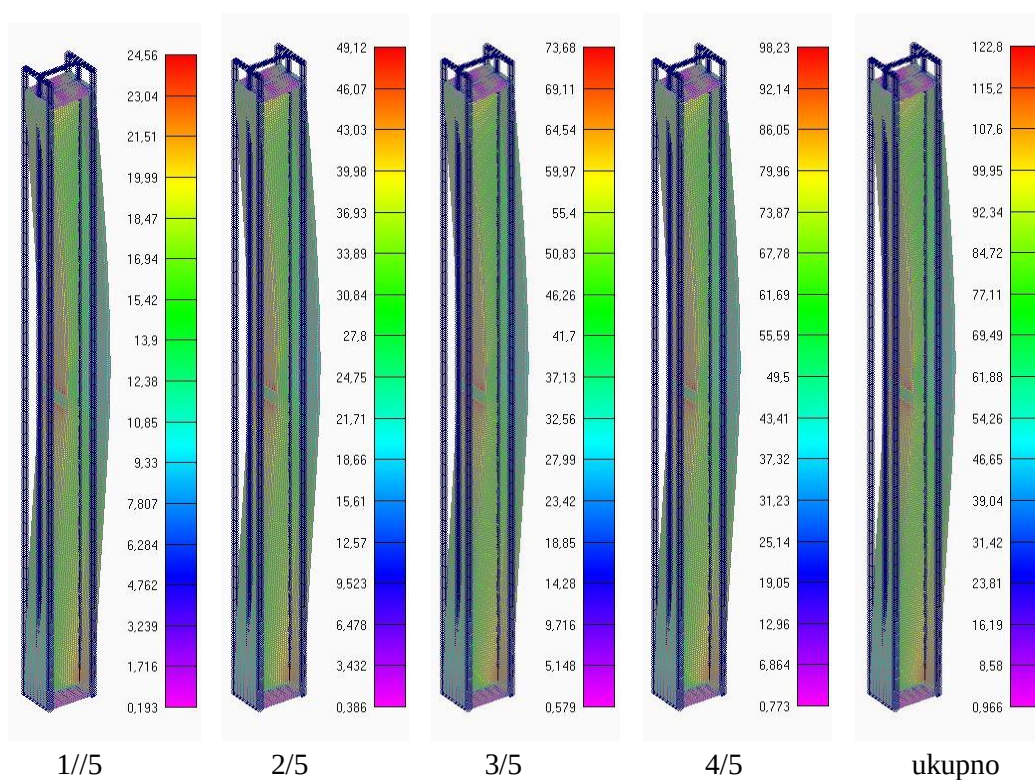


Slika 4.43 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

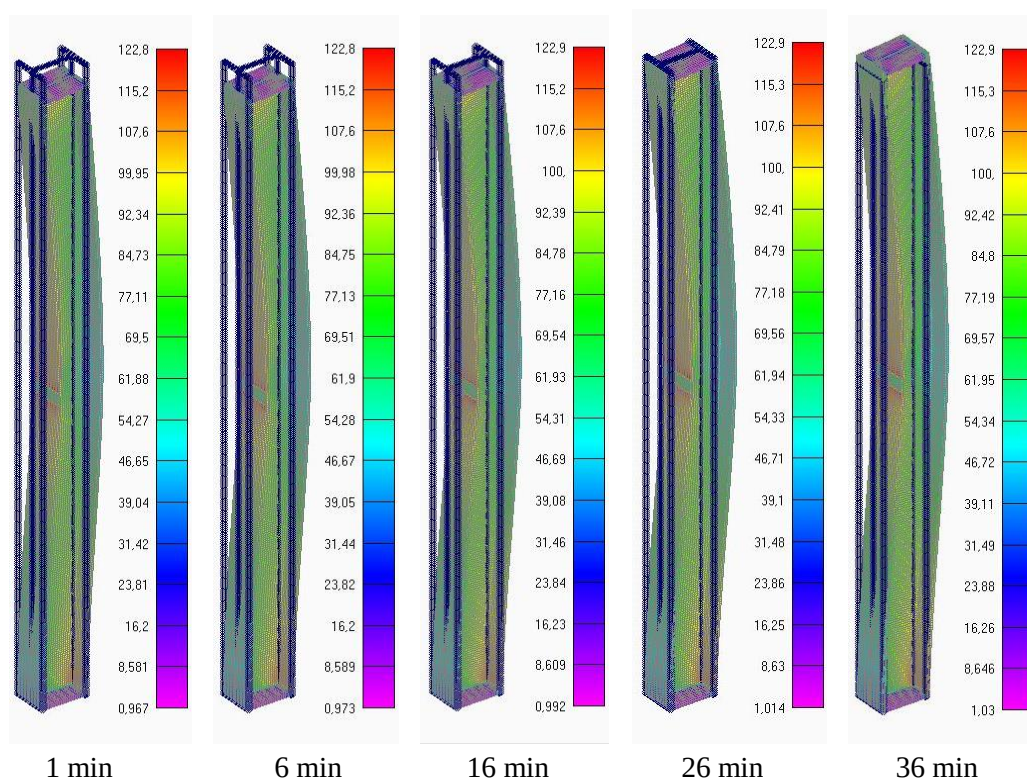


Slika 4.44 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96, 101, 105, 106 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

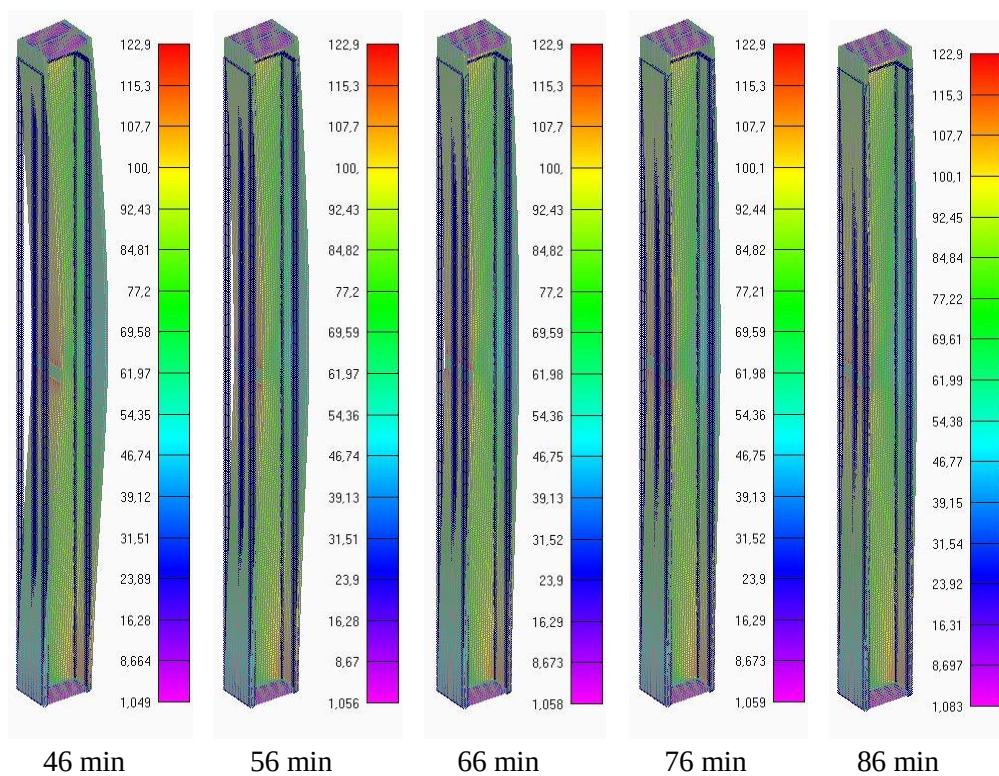
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



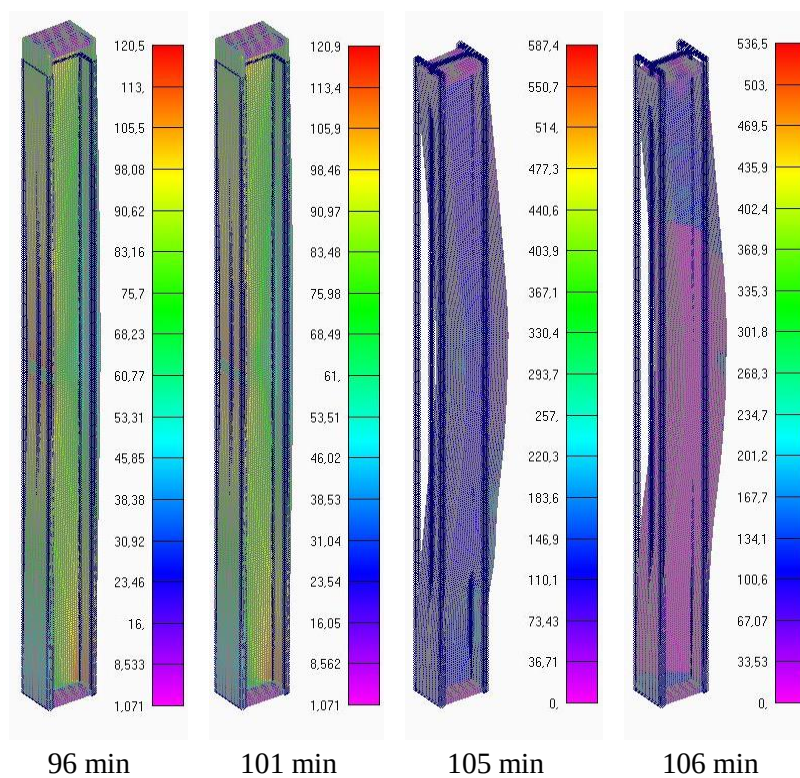
Slika 4.45 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.46 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



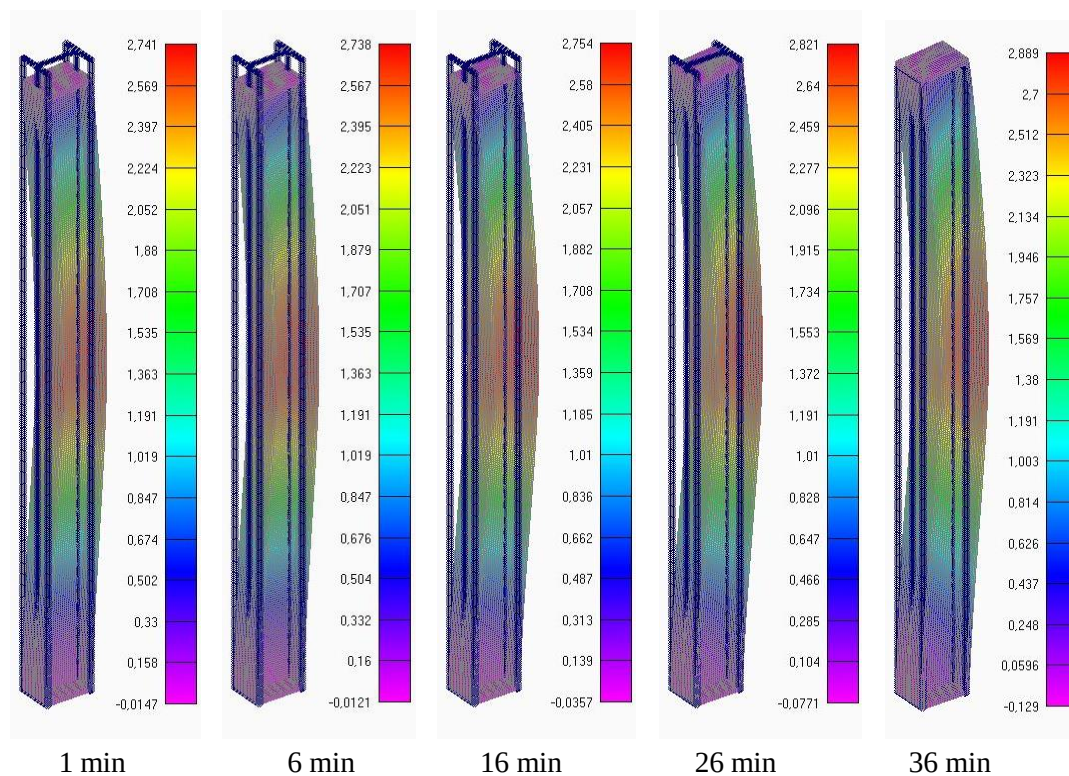
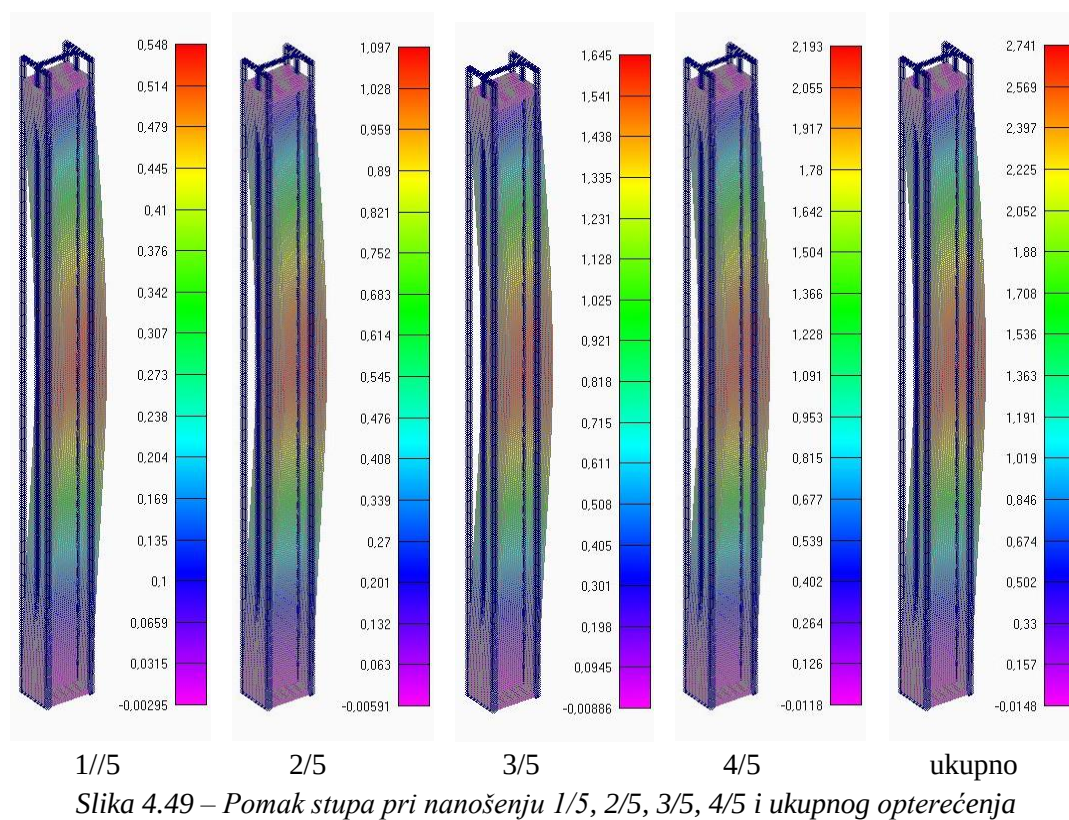
Slika 4.47 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

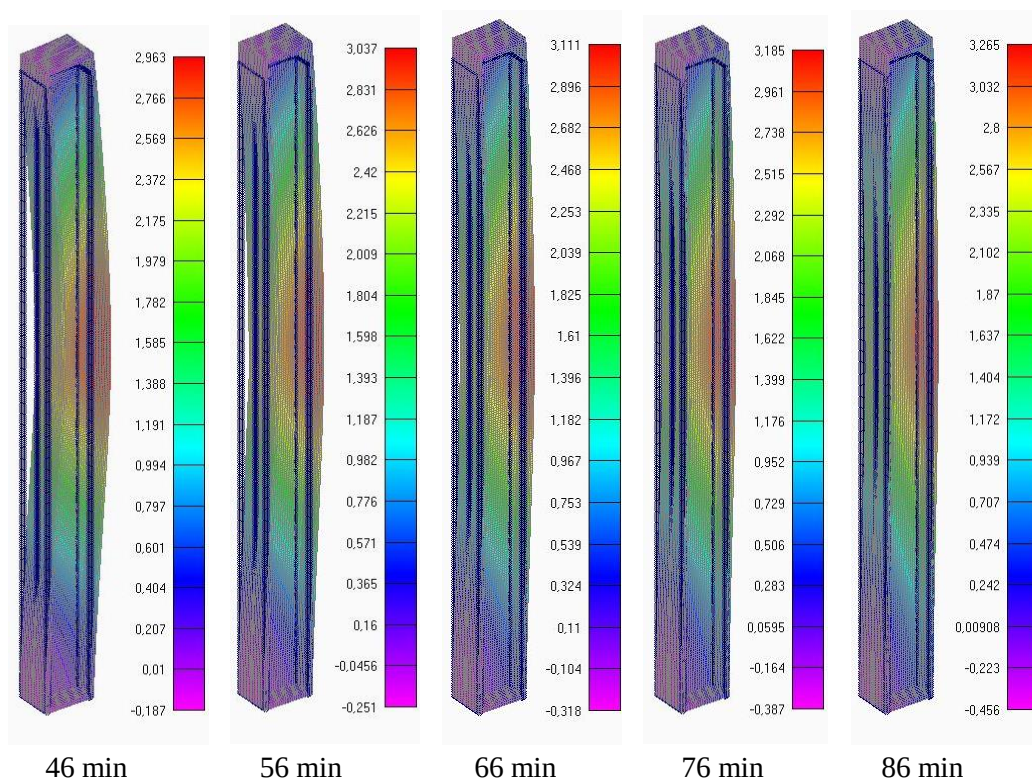


Slika 4.48 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 101, 105, 106 min grijanja brzinom 2,5°C/min

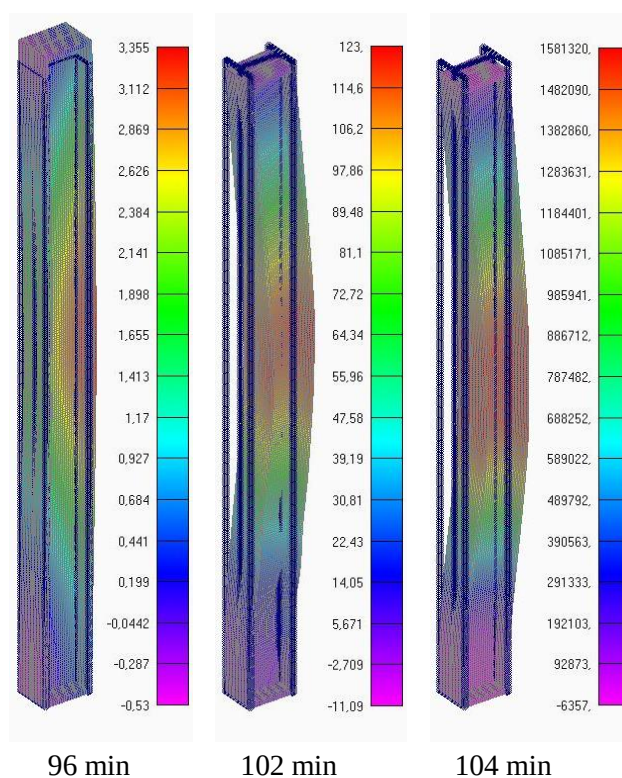
4.9 Rezultati za MODEL 2 – bez utjecaja puzanja $F_3 = 610 \text{ kN}$

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



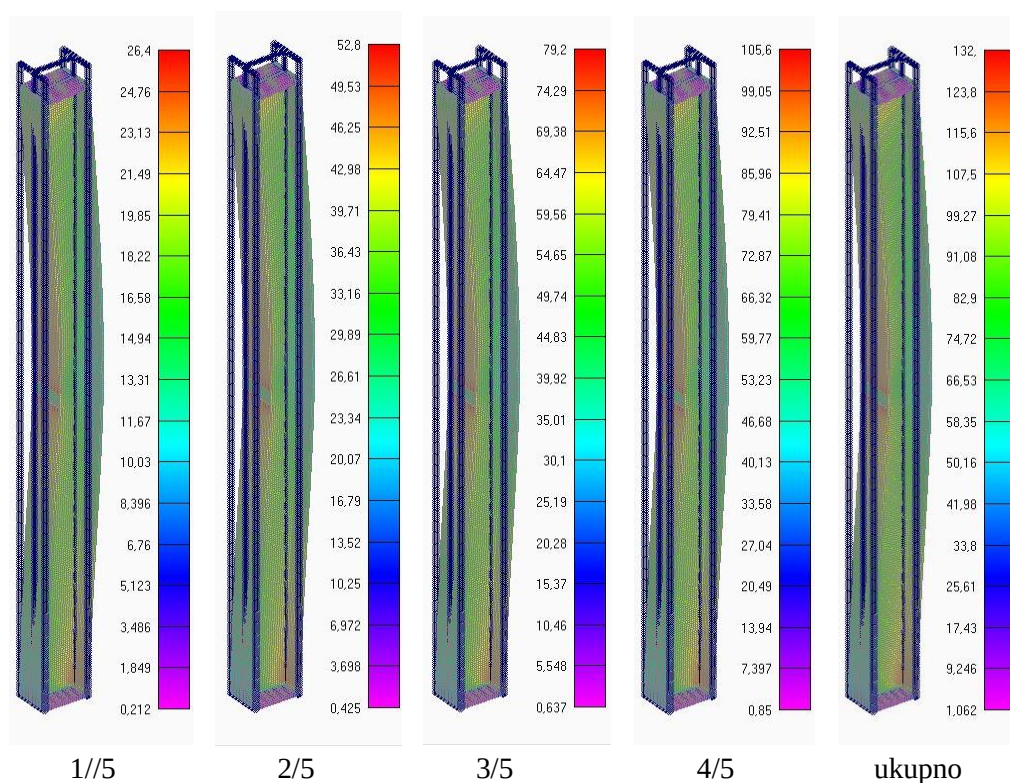


Slika 4.51 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

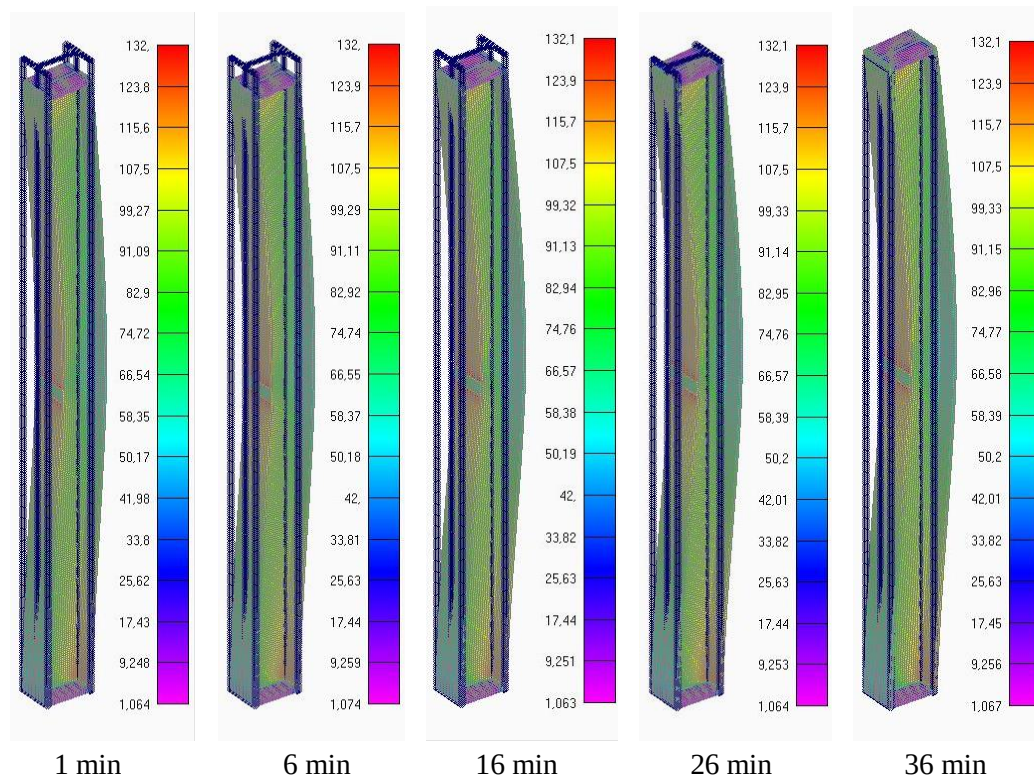


Slika 4.52 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96, 102, 104 min grijanja brzinom 2,5°C/min

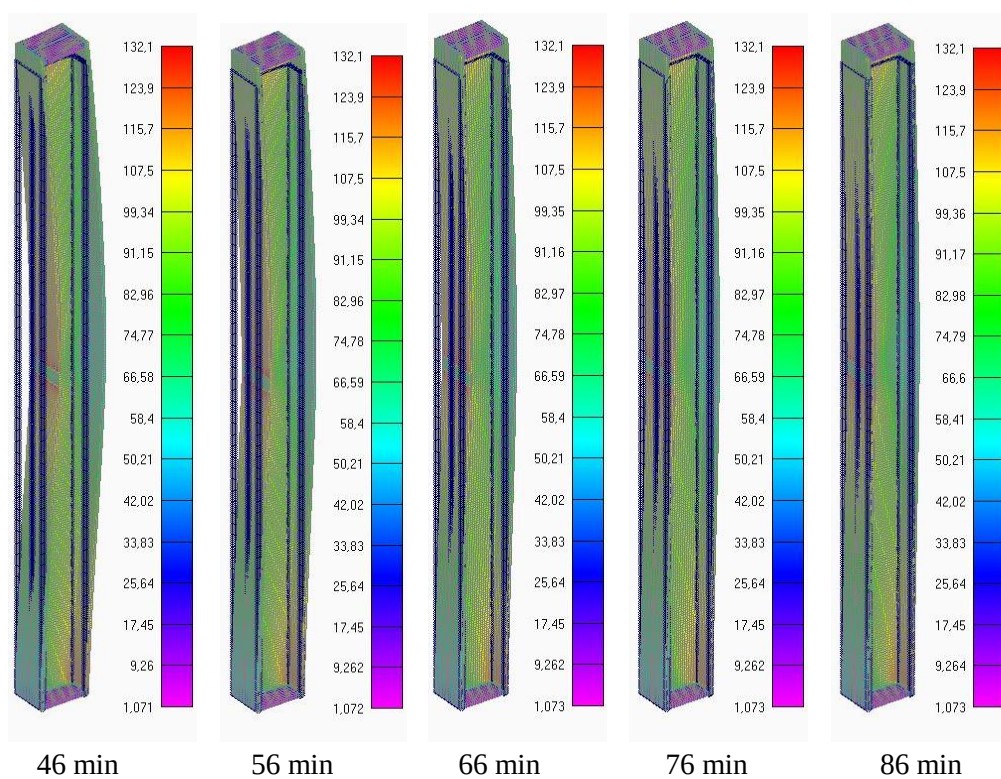
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



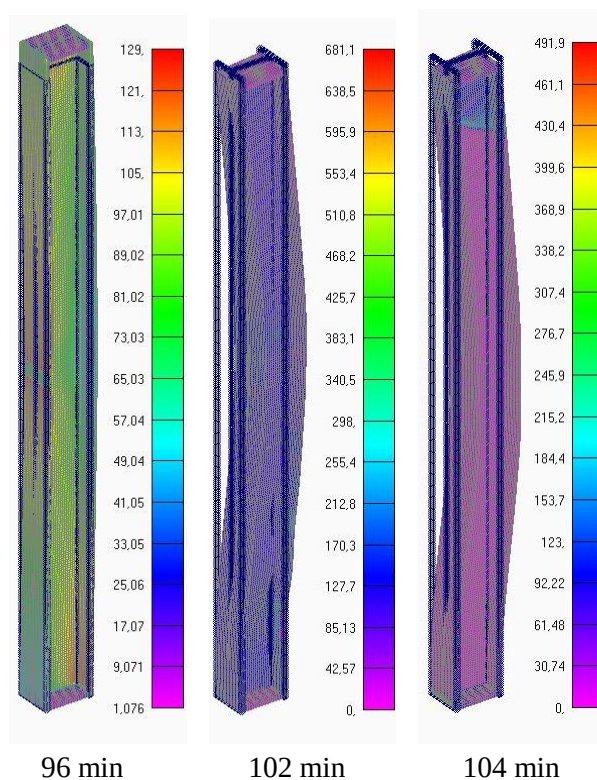
Slika 4.53 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.54 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



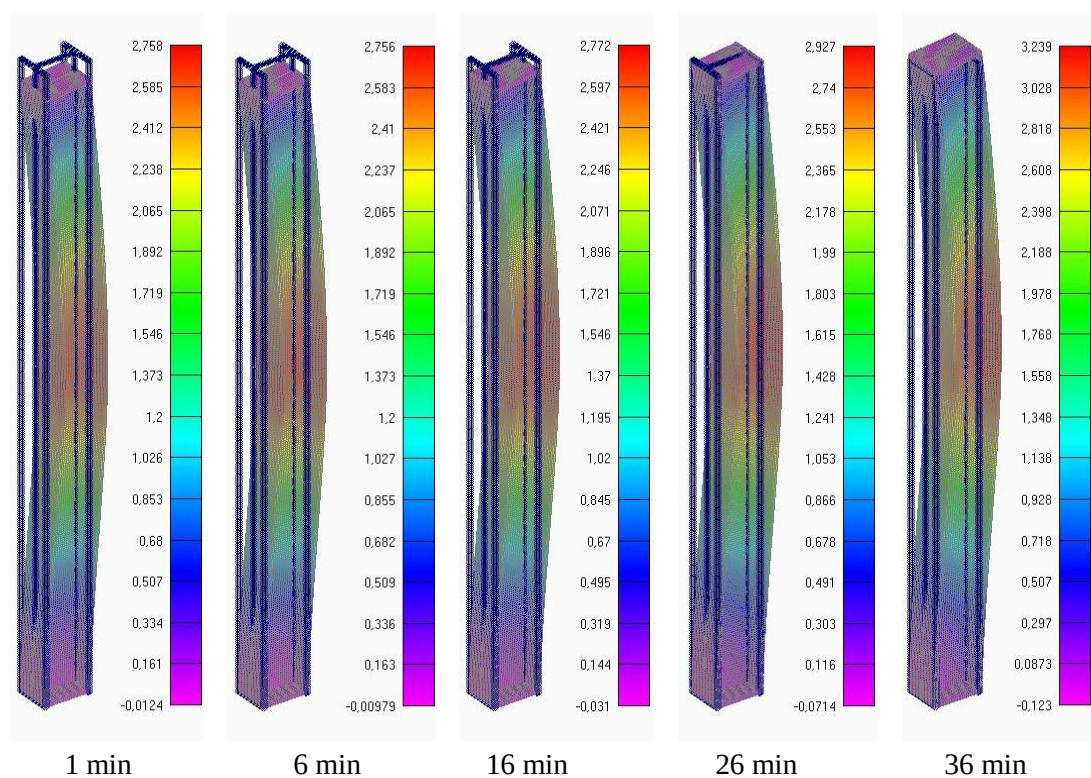
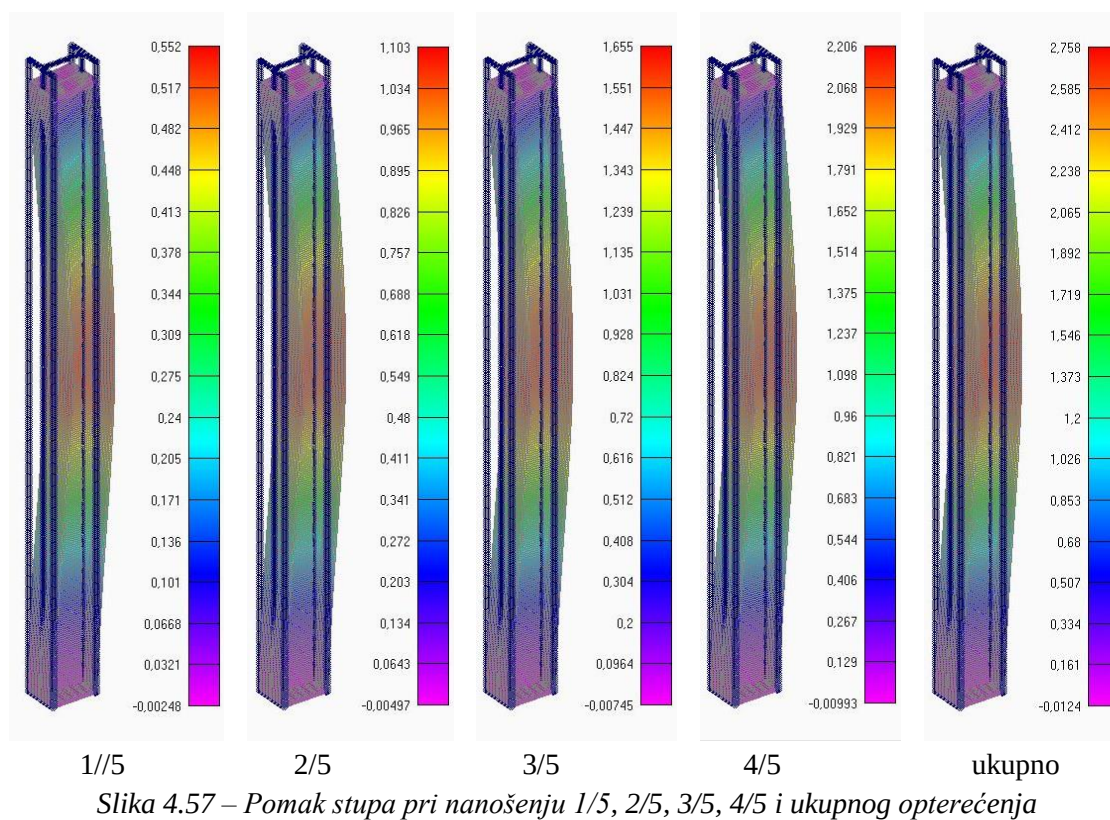
Slika 4.55 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

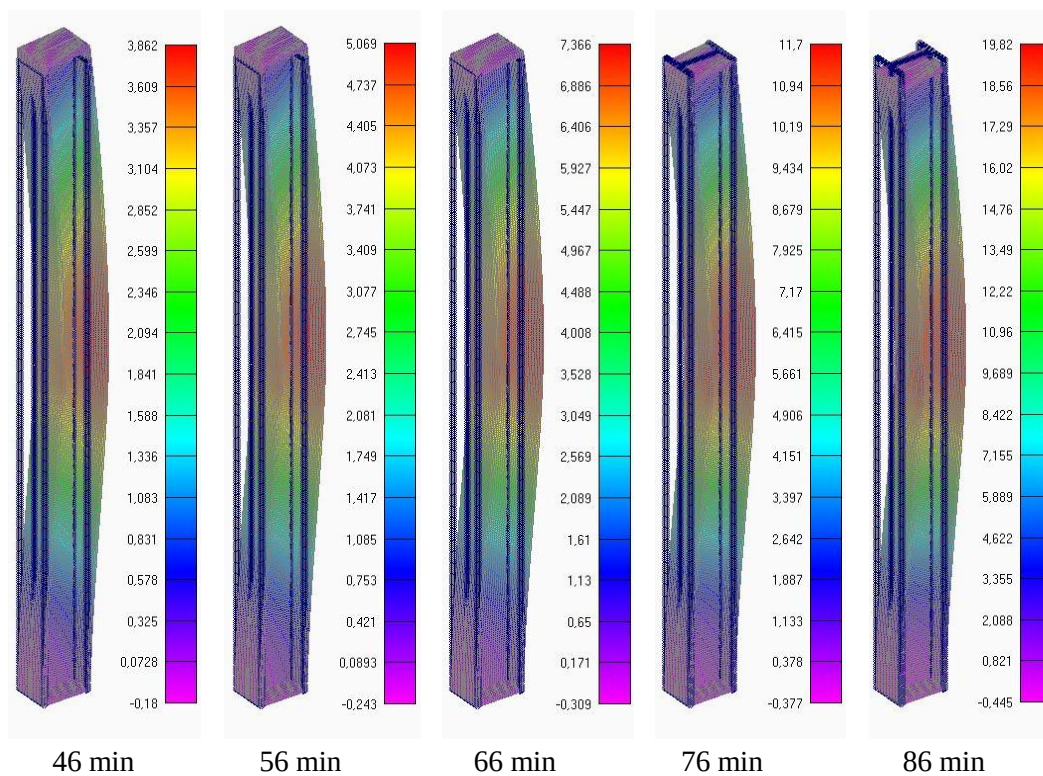


Slika 4.56 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 102, 104 min grijanja brzinom 2,5°C/min

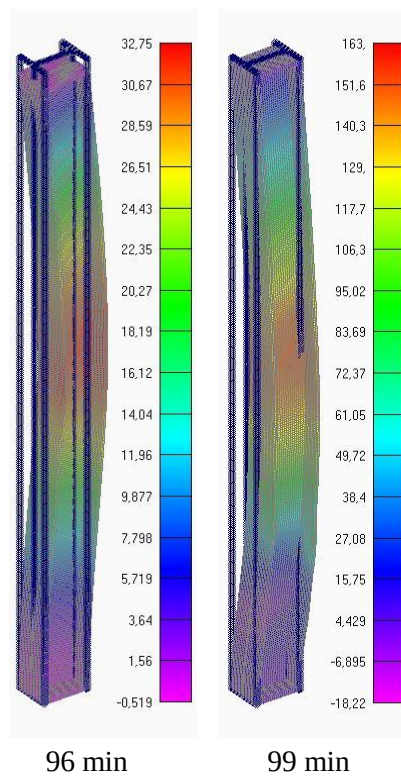
4.10 Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F1 = 488 \text{ kN}$

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



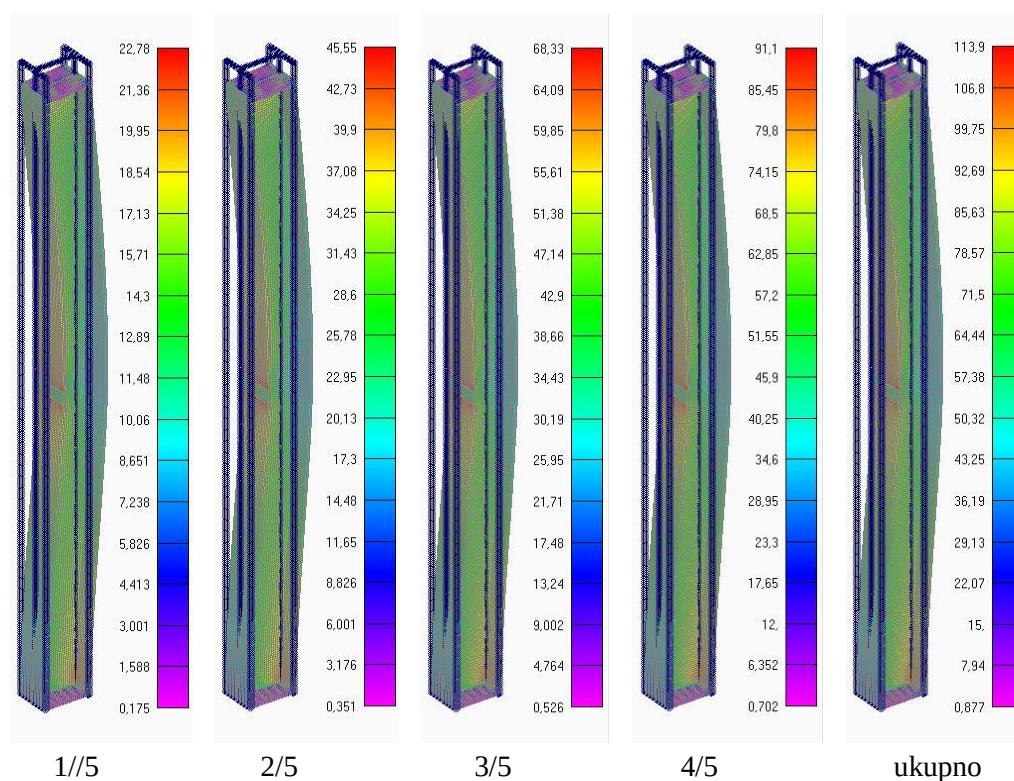


Slika 4.59 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

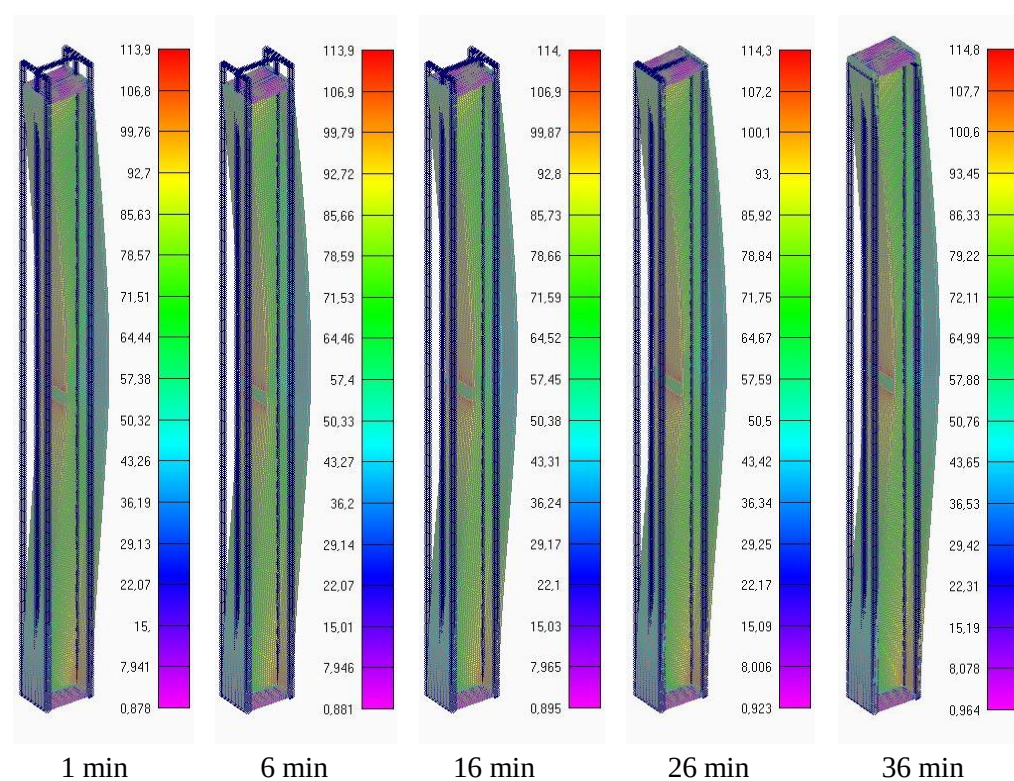


Slika 4.60 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96, 99 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

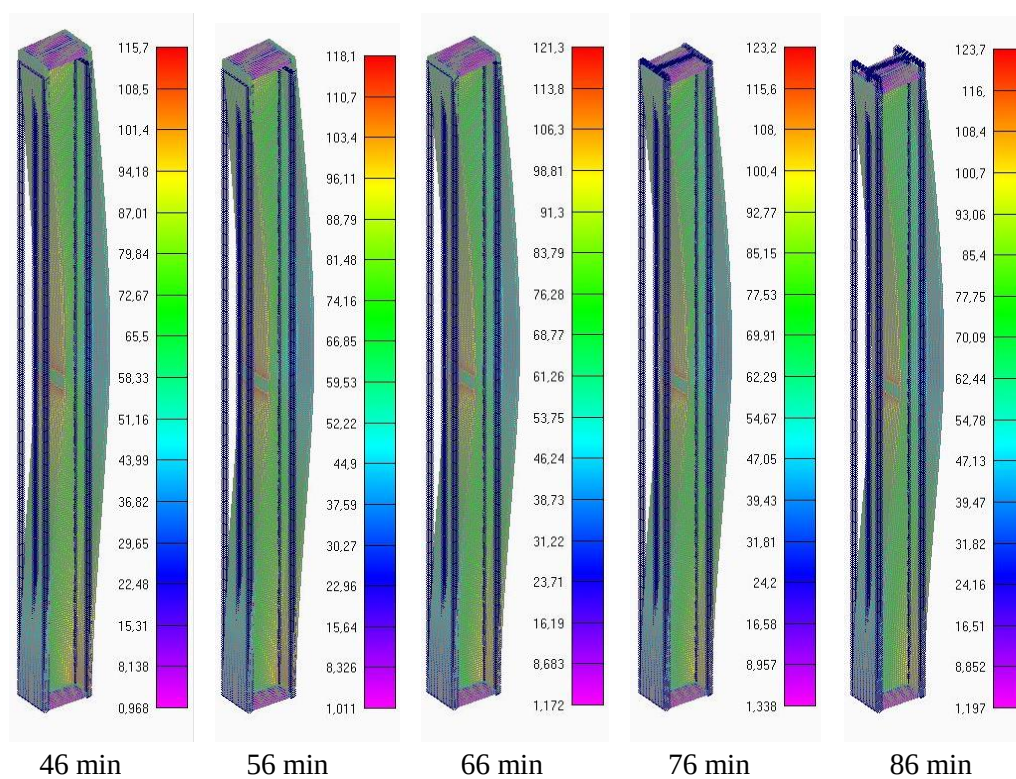
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



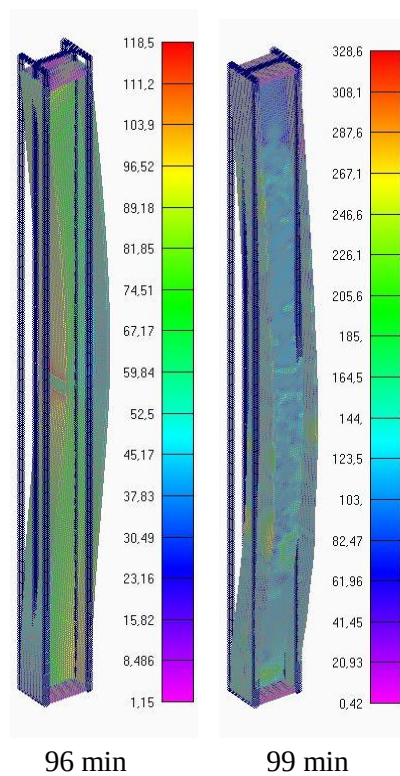
Slika 4.61 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.62 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



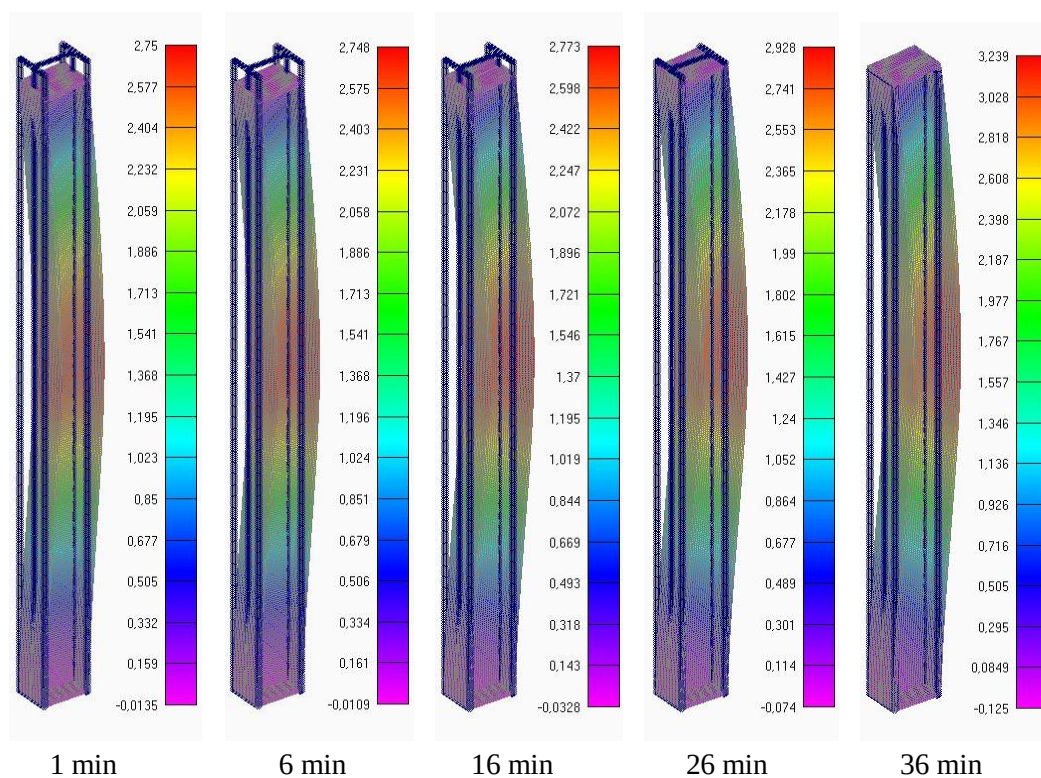
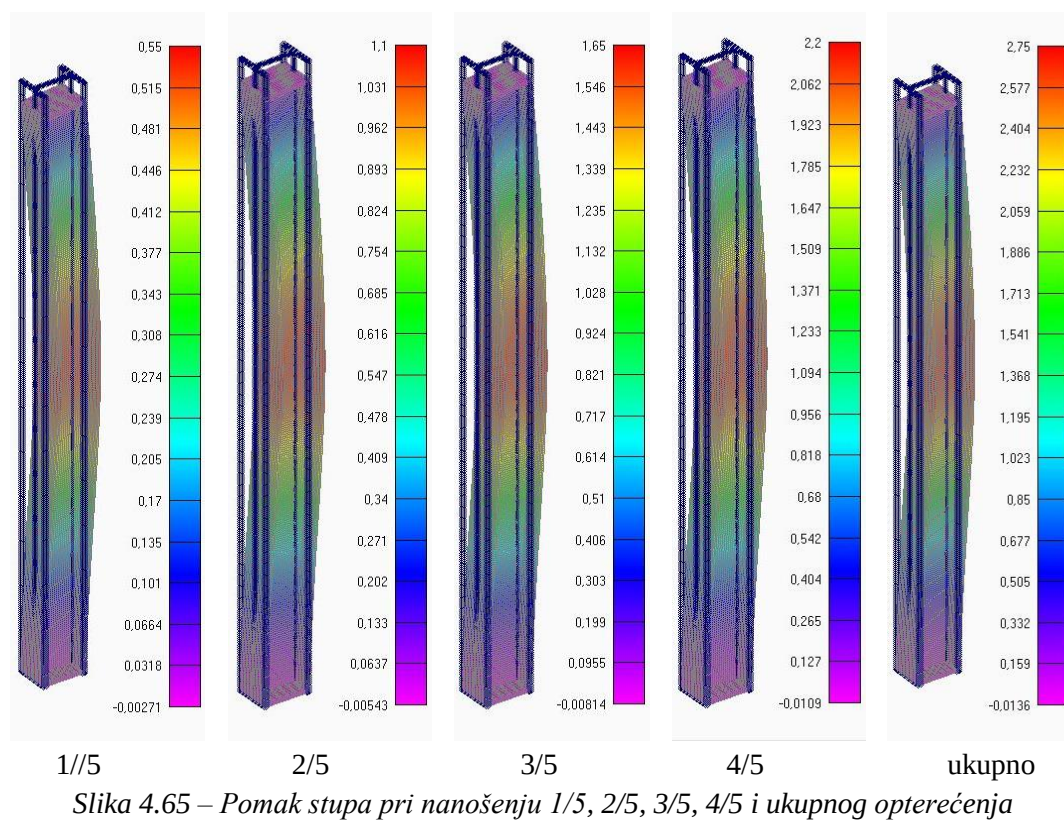
Slika 4.63 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

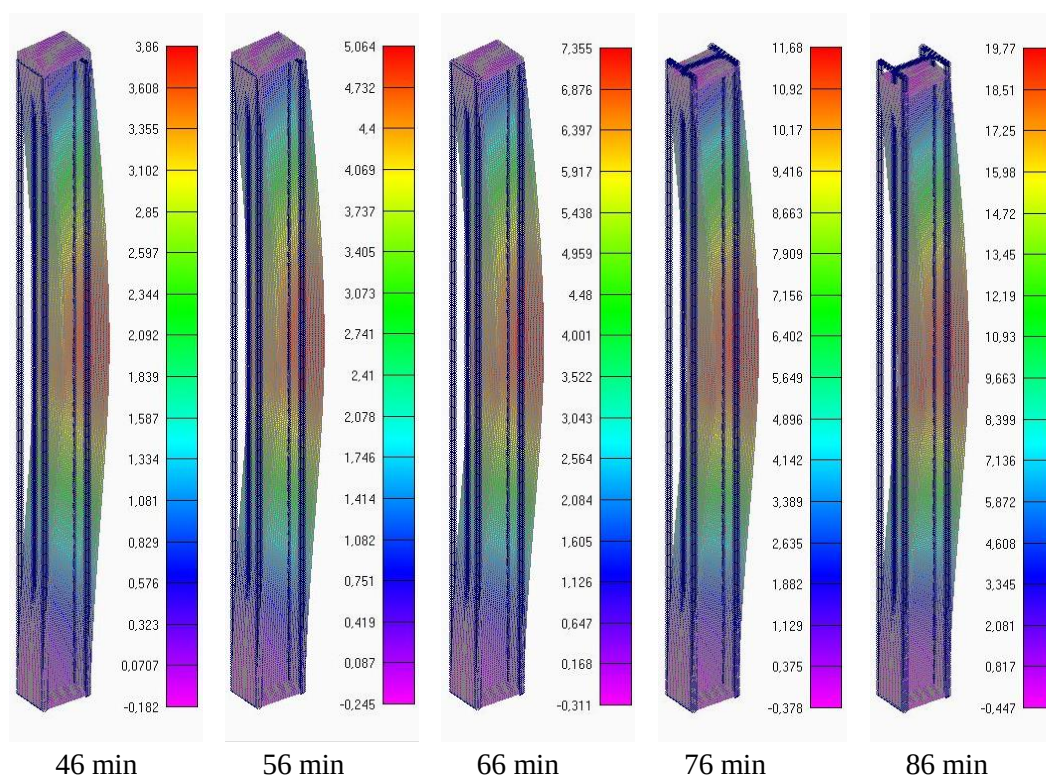


Slika 4.64 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 99 min grijanja brzinom 2,5°C/min

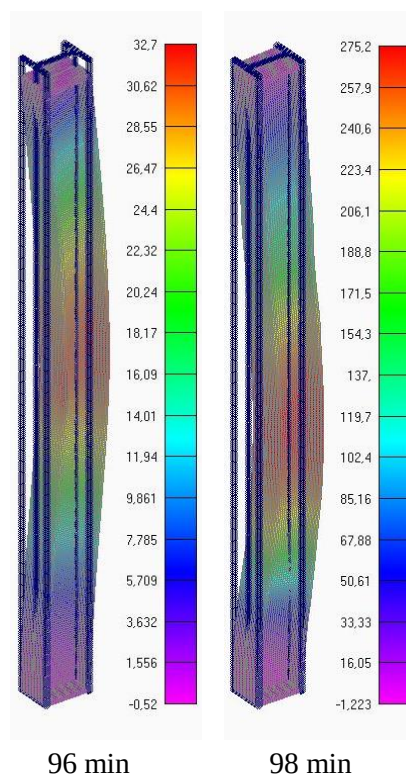
4.11 Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F_2 = 549 \text{ kN}$

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



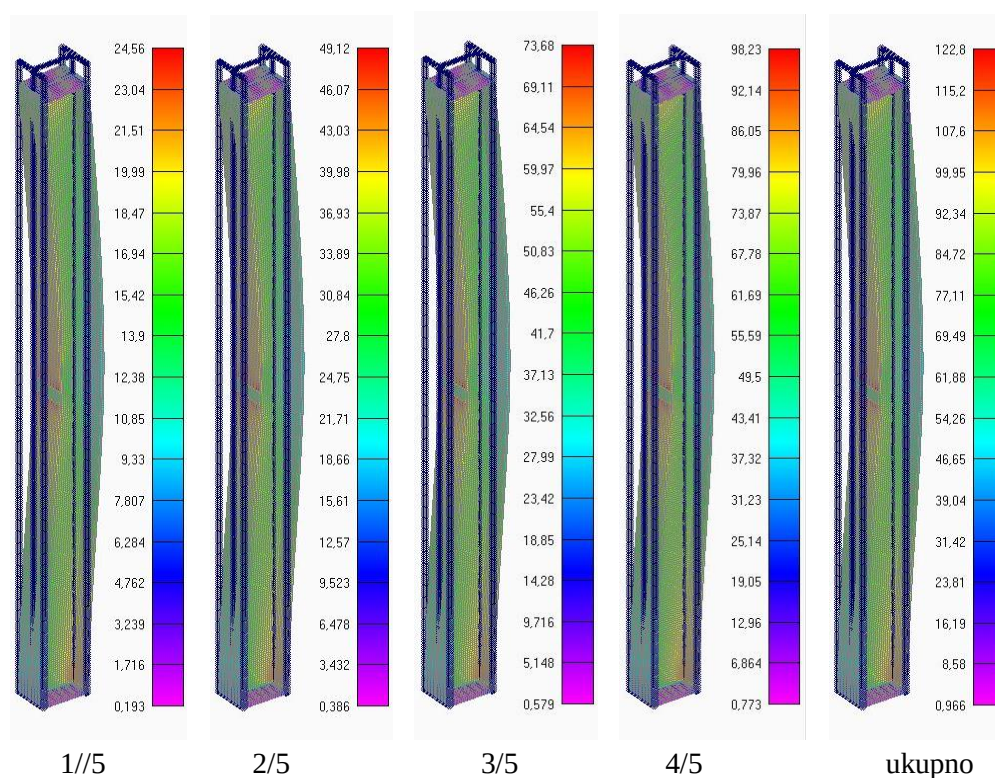


Slika 4.67 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

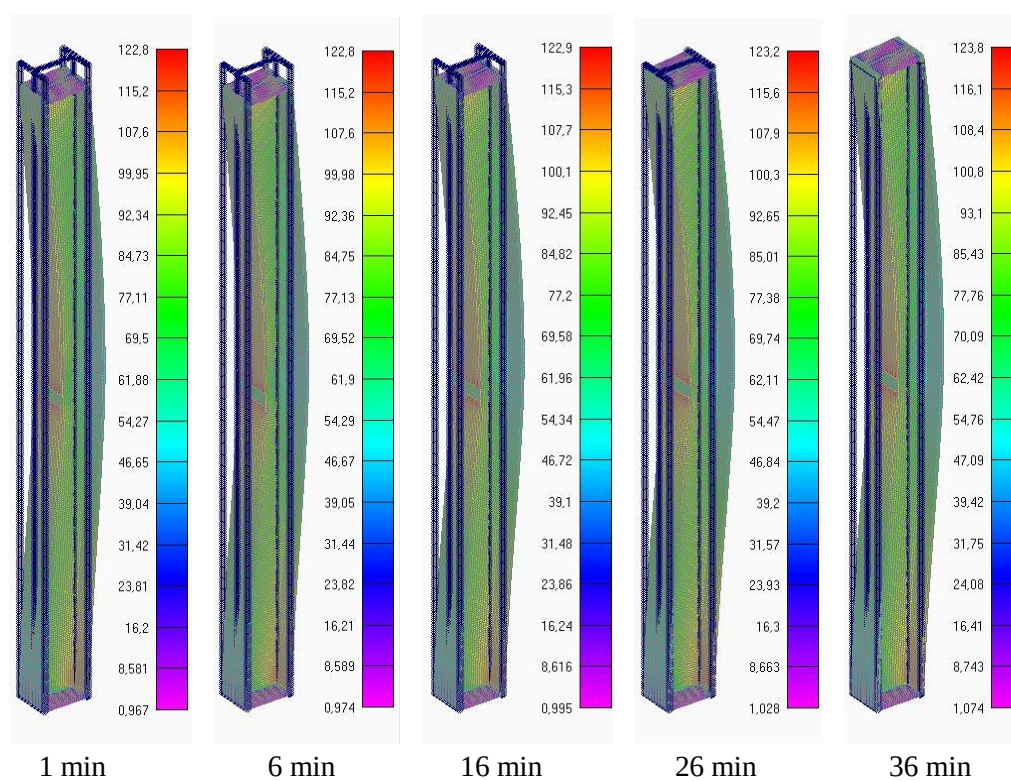


Slika 4.68 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96, 98 min grijanja brzinom 2,5°C/min

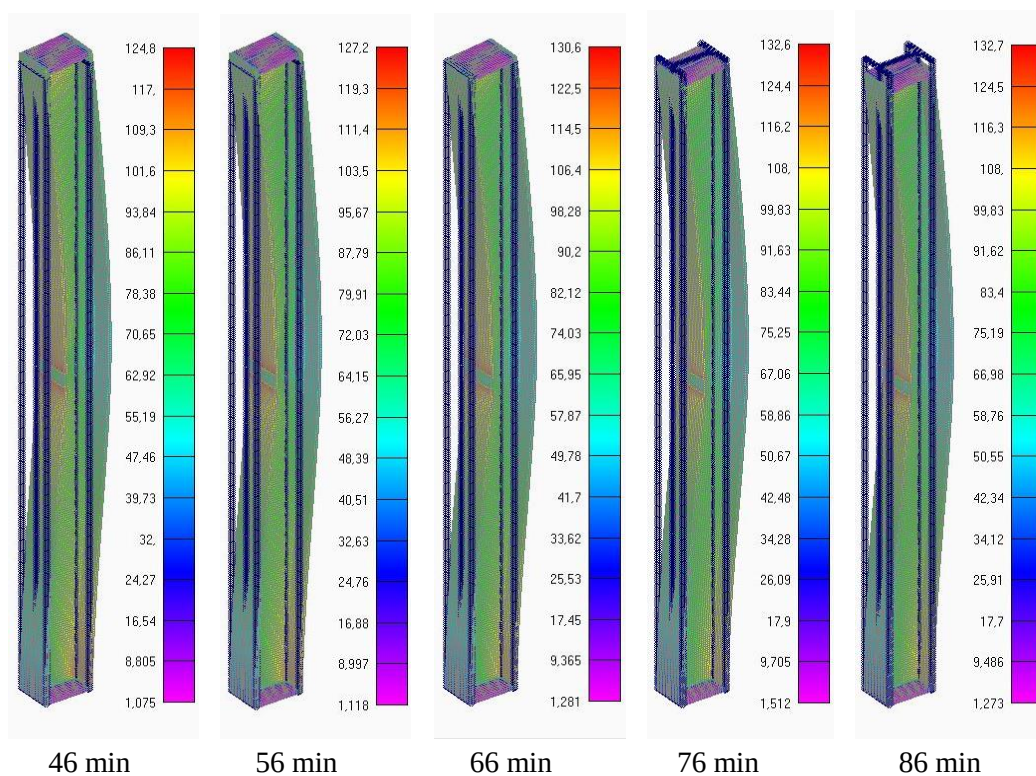
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



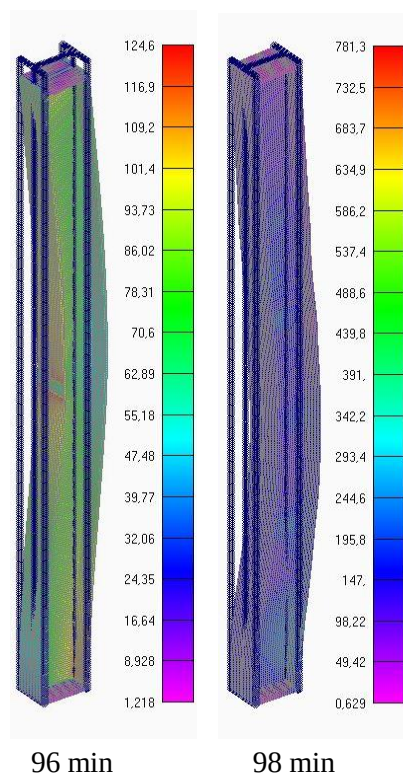
Slika 4.69 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.70 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



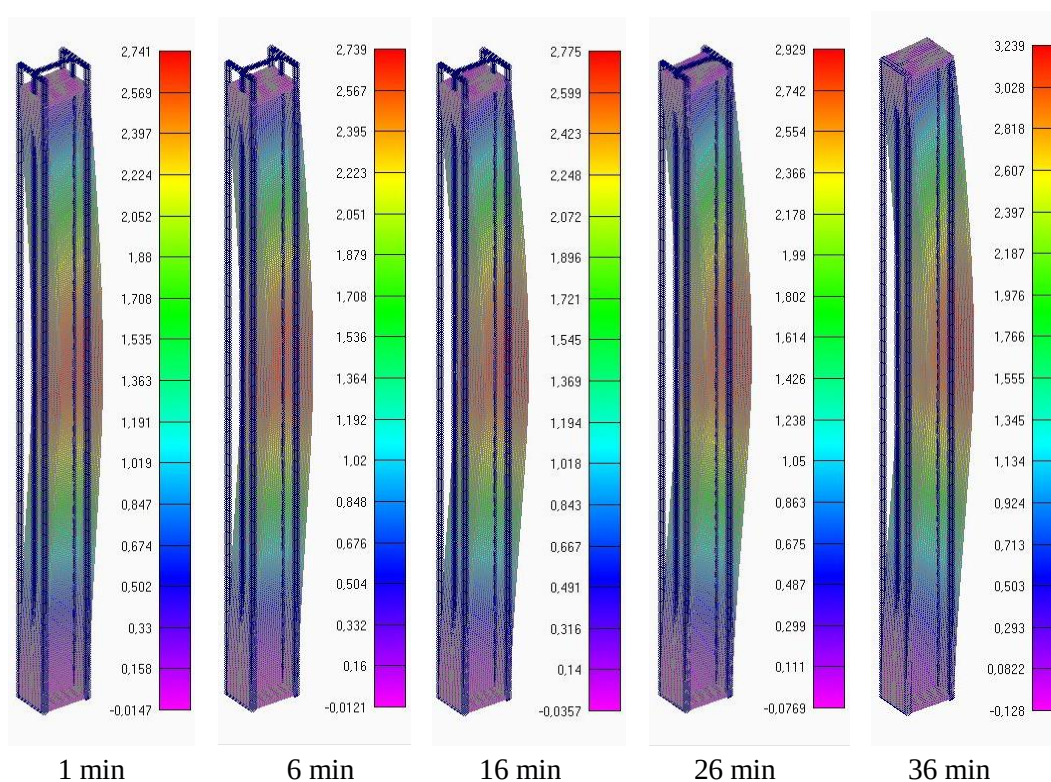
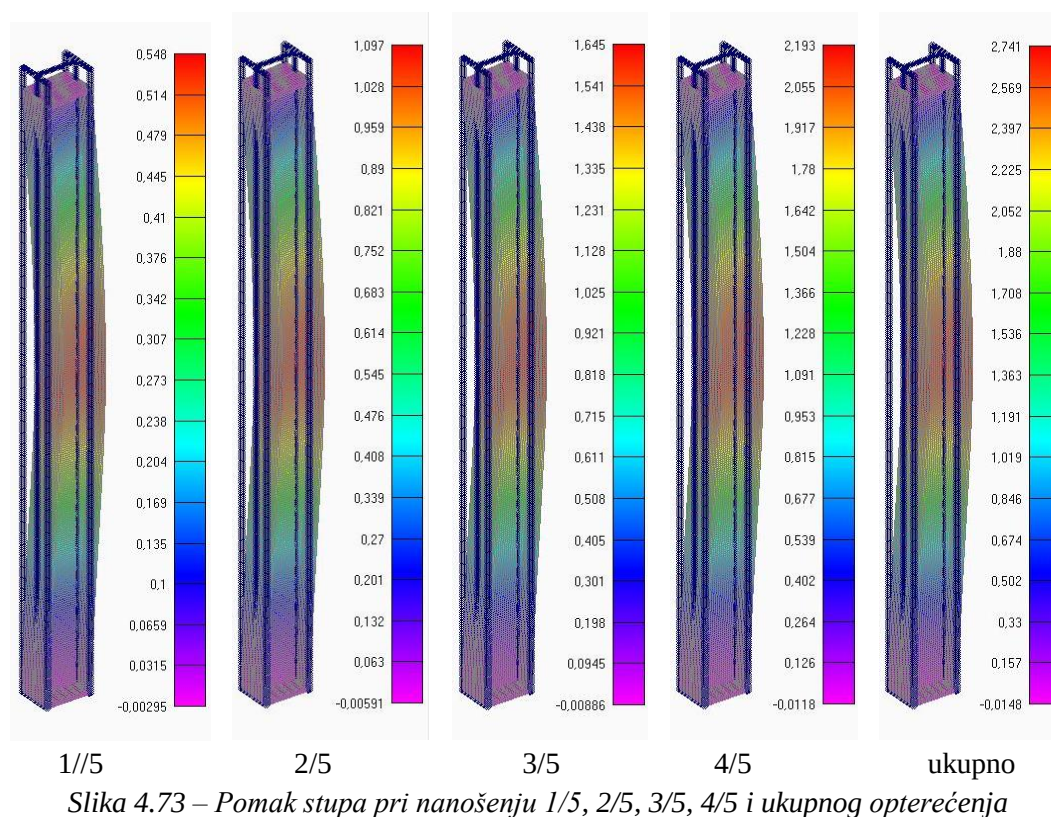
Slika 4.71 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min



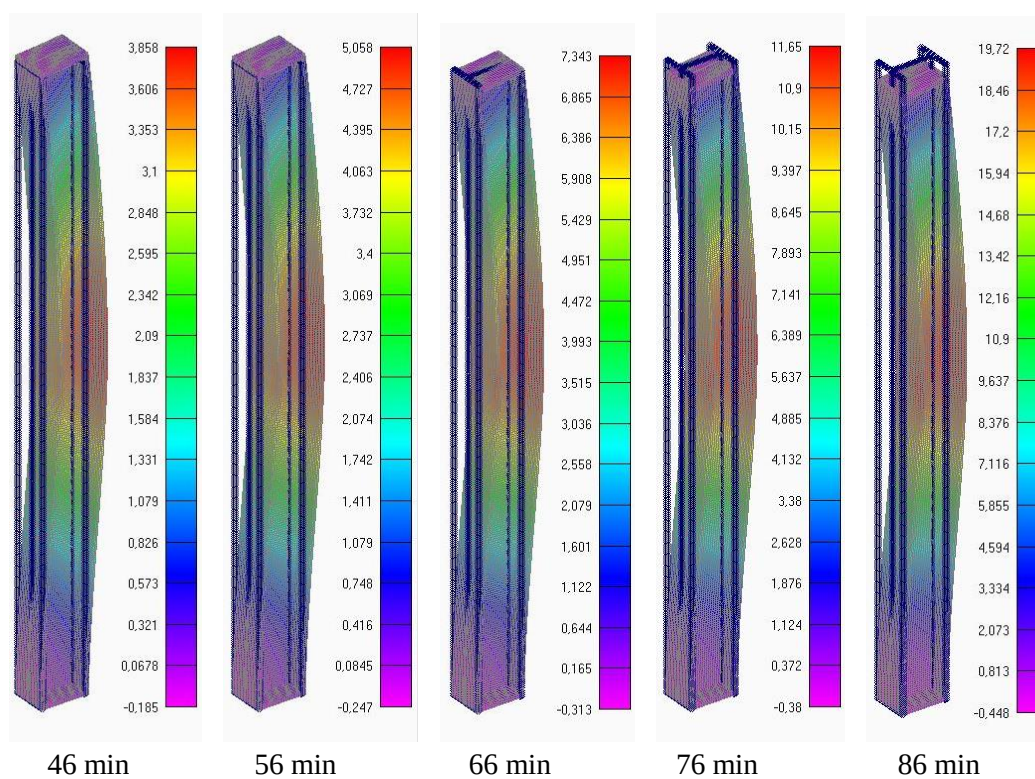
Slika 4.72 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 98 min grijanja brzinom 2,5°C/min

4.12 Rezultati za MODEL 2 – sa utjecajem puzanja $F_3 = 610 \text{ kN}$

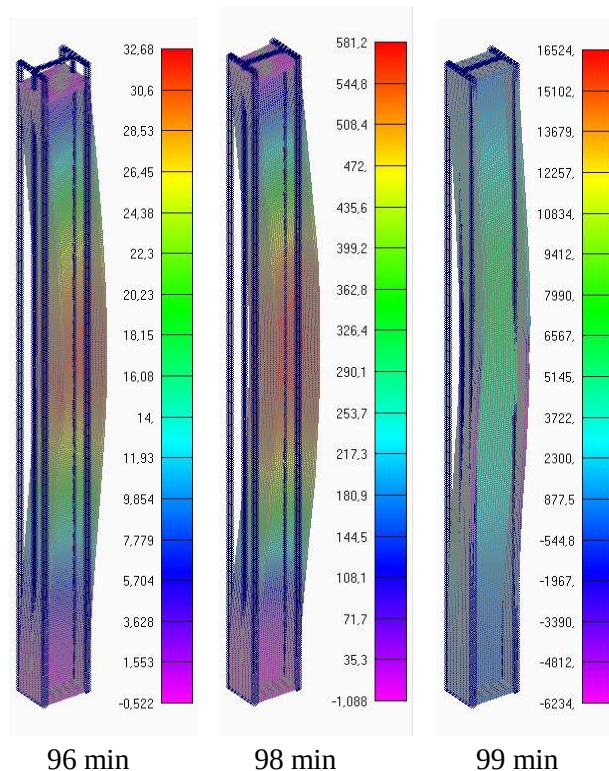
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 4.74 – Pomak stupa nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom $2,5^\circ\text{C/min}$

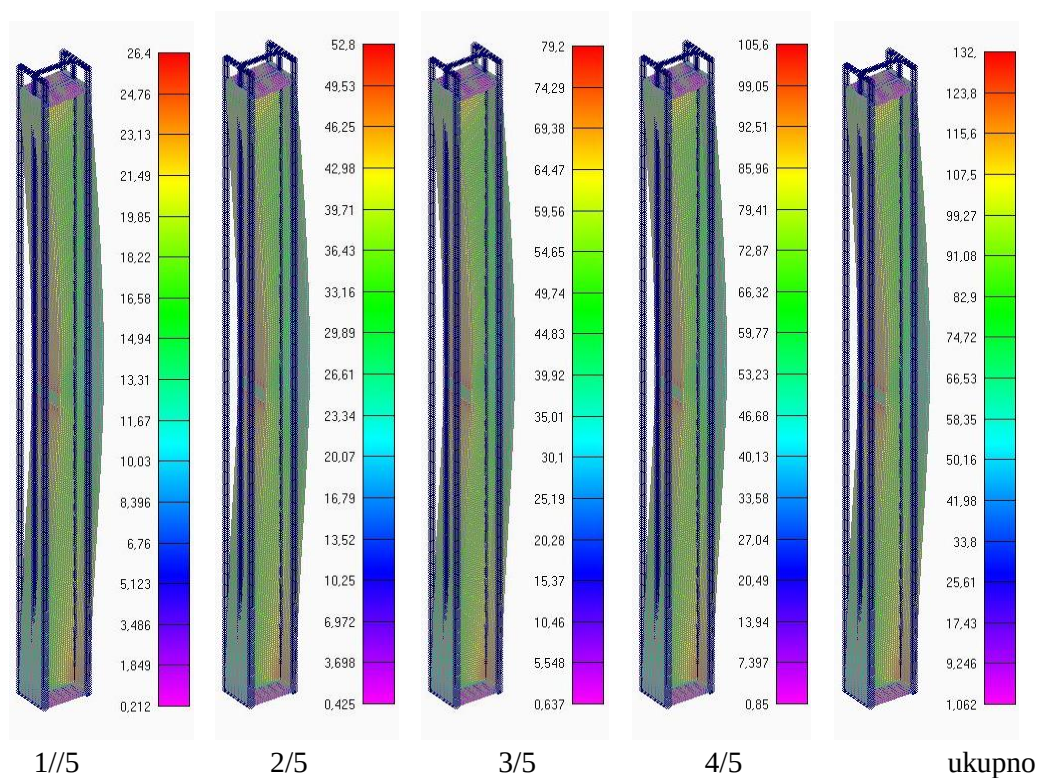


Slika 4.75 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

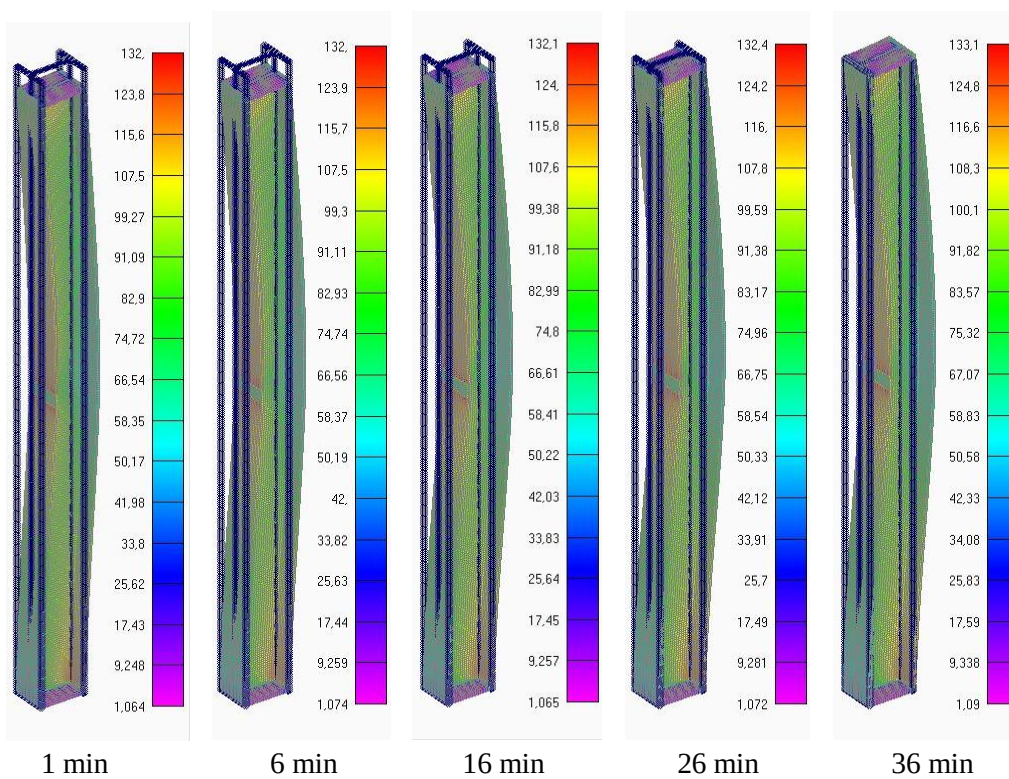


Slika 4.76 – Pomak stupa nakon nanesenog opterećenja i 96, 98, 99 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

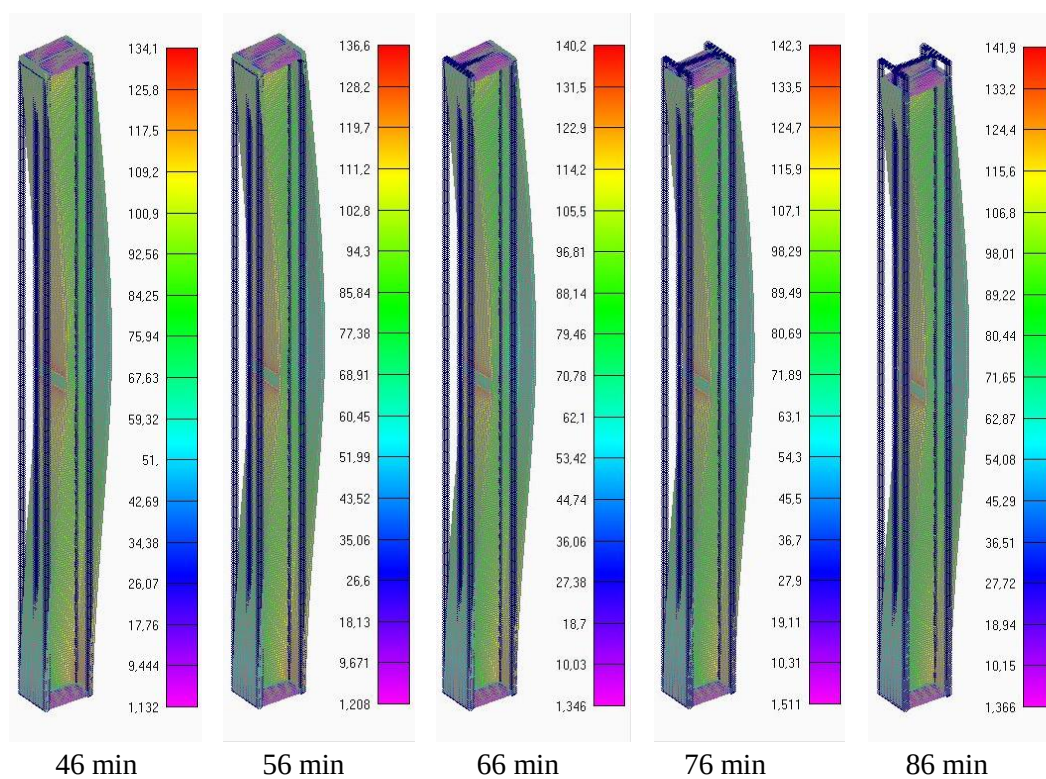
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



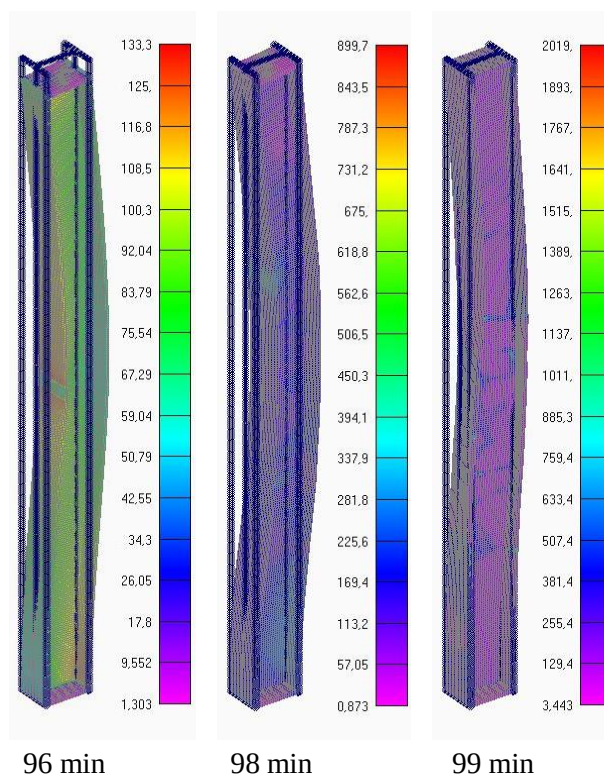
Slika 4.77 – Naprezanje u stupu pri nanošenju 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 i ukupnog opterećenja



Slika 4.78 – Naprezanje u stupu nakon nanosenog opterećenja i 1, 6, 16, 26, 36 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 4.79 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 46, 56, 66, 76, 86 min grijanja brzinom 2,5°C/min

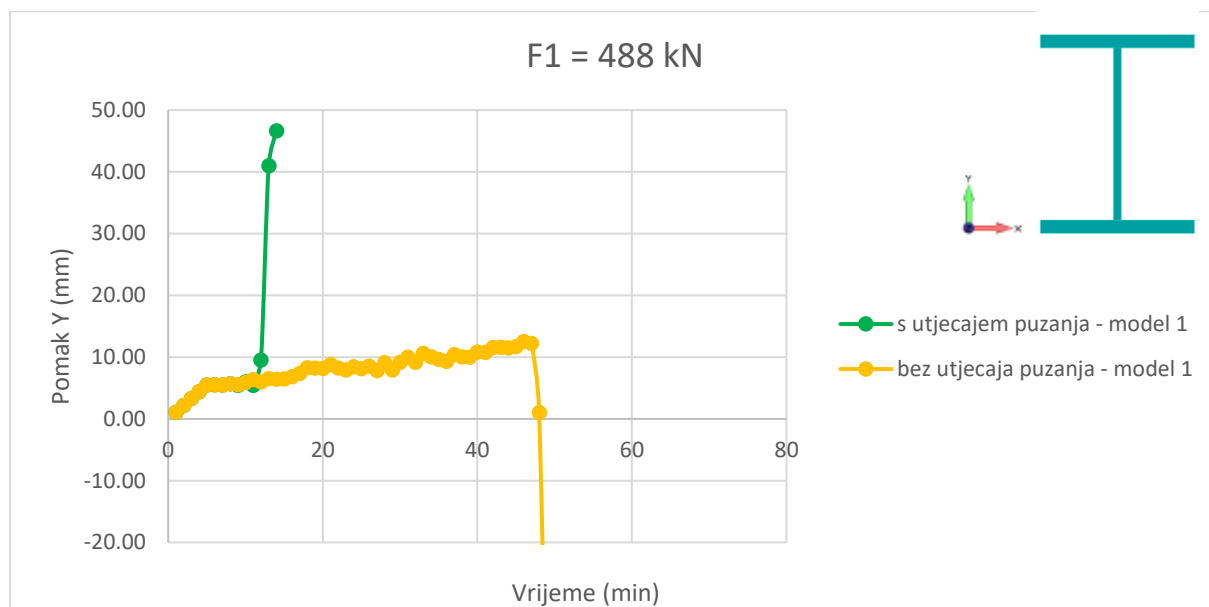


Slika 4.80 – Naprezanje u stupu nakon nanesenog opterećenja i 96, 98, 99 min grijanja brzinom 2,5°C/min

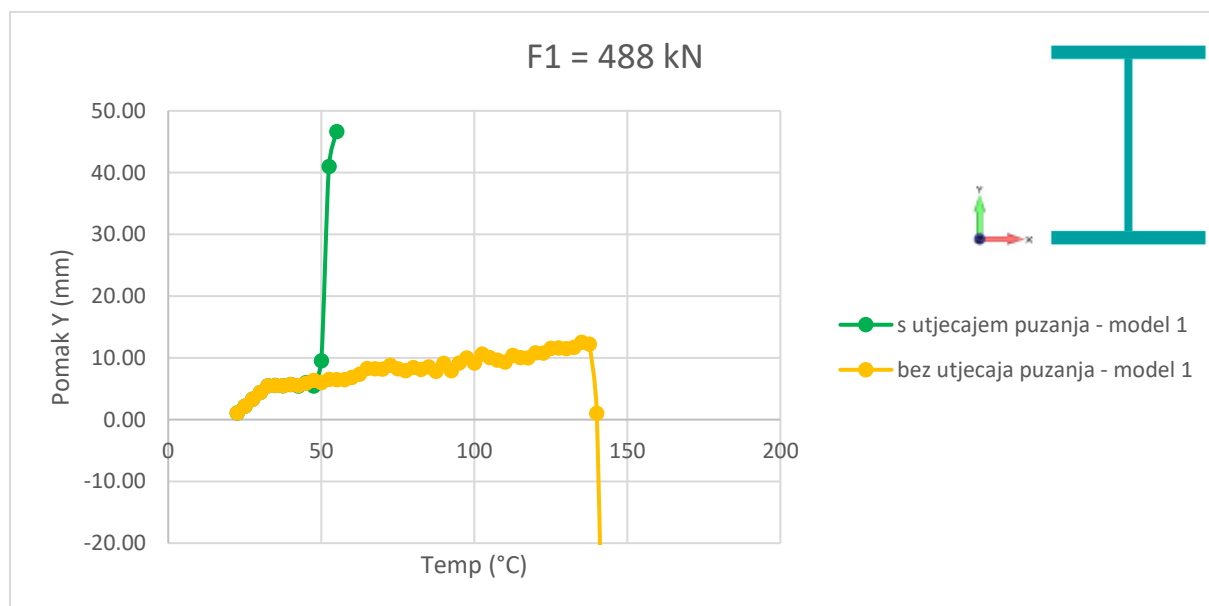
5 USPOREDBA REZULTATA ZA NESTACIONARNE SIMULACIJE

U sljedećim grafovima prikazan je utjecaj puzanja na aluminijski stup. Proveden je proračun sa utjecajem i bez utjecaja puzanja u ovisnosti o temperaturi i vremenu.

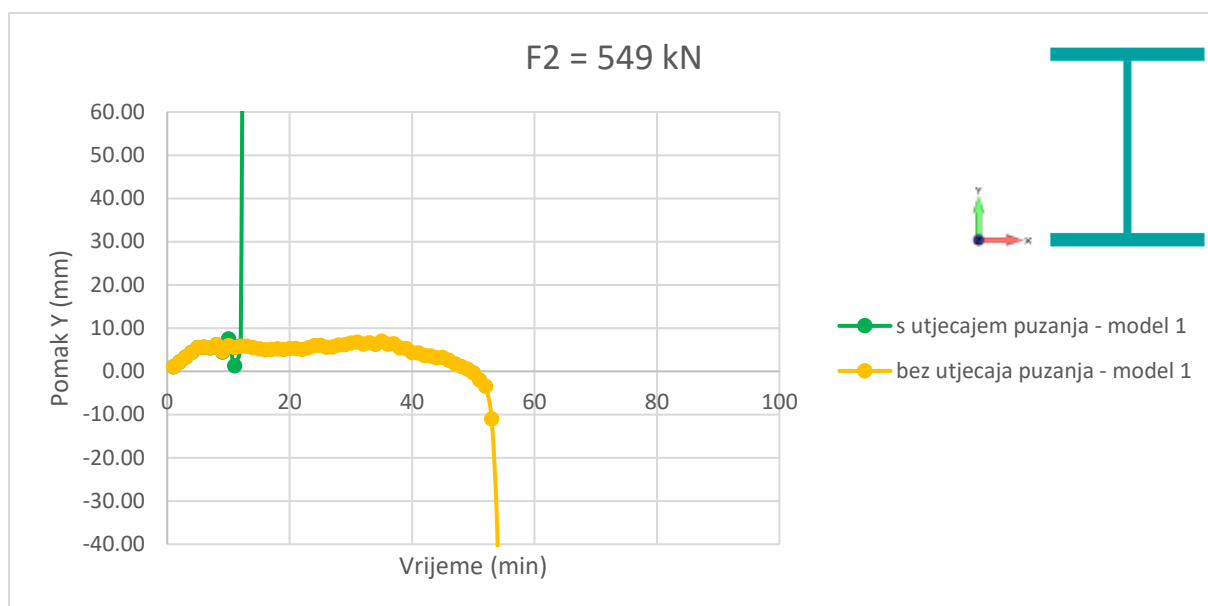
5.1 Rezultati modela 1 u smjeru osi Y



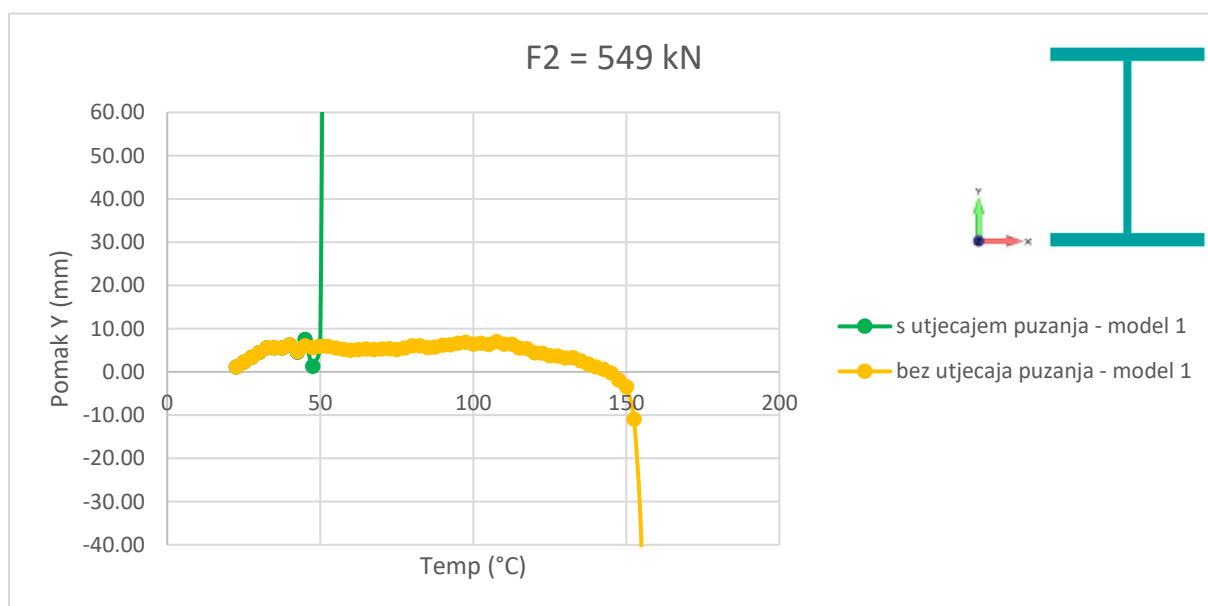
Slika 5.1 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



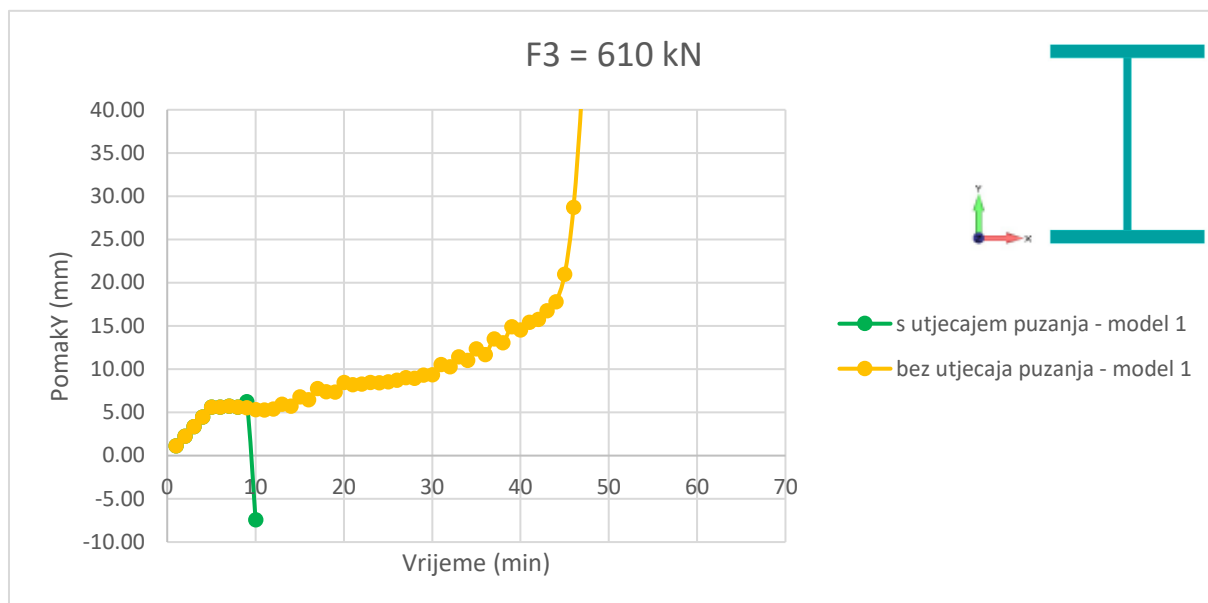
Slika 5.2 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi



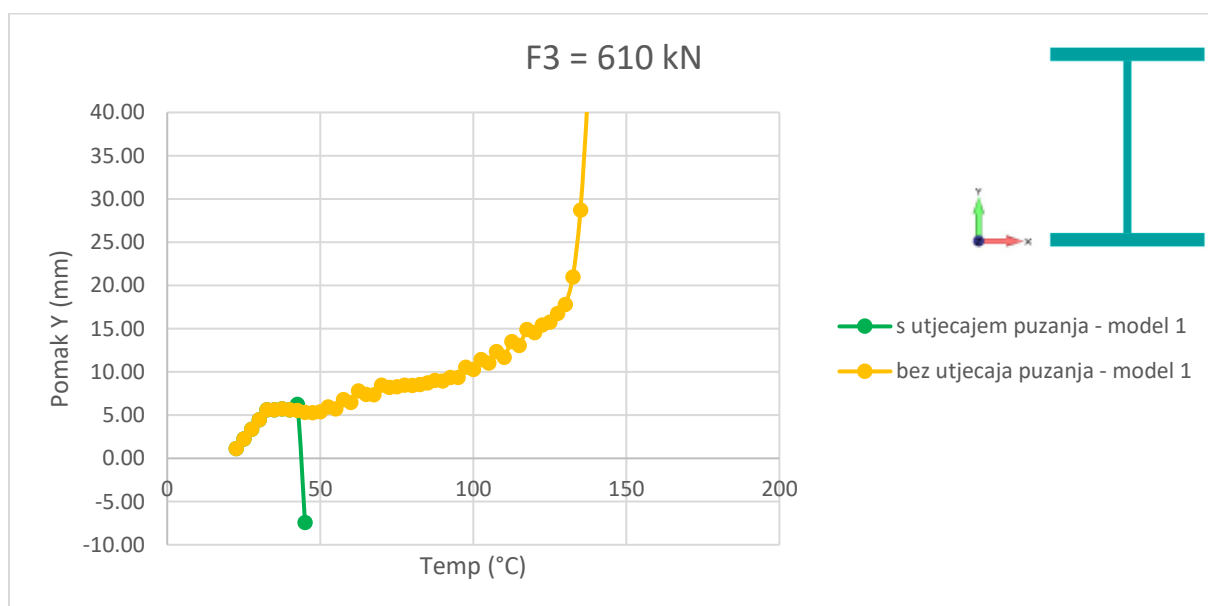
Slika 5.3 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



Slika 5.4 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi

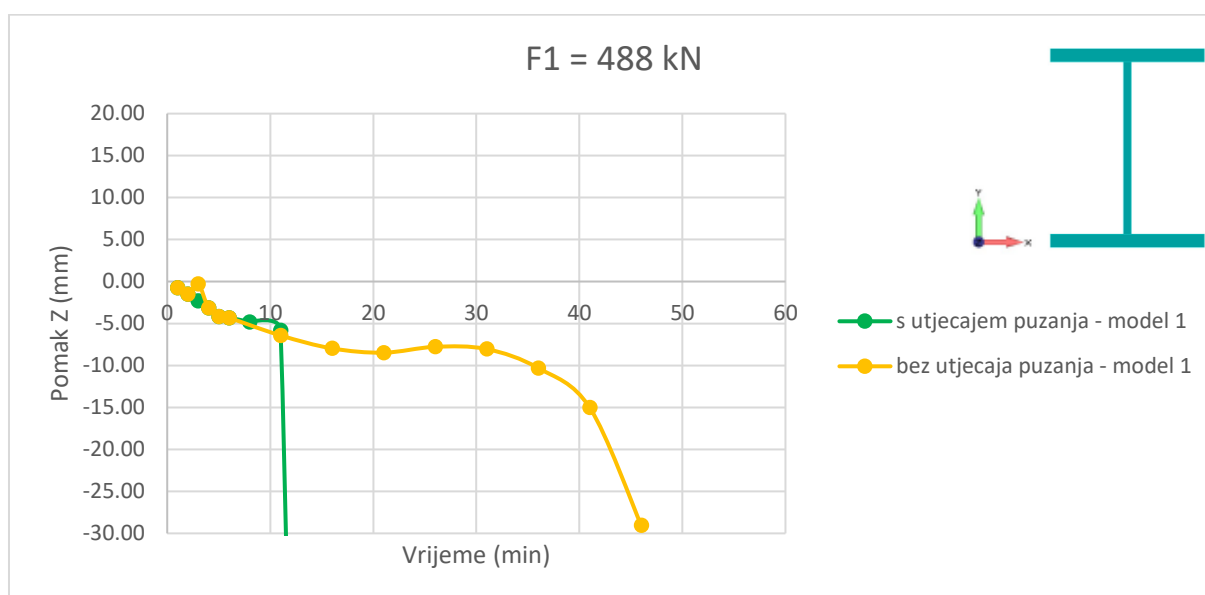


Slika 5.5 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

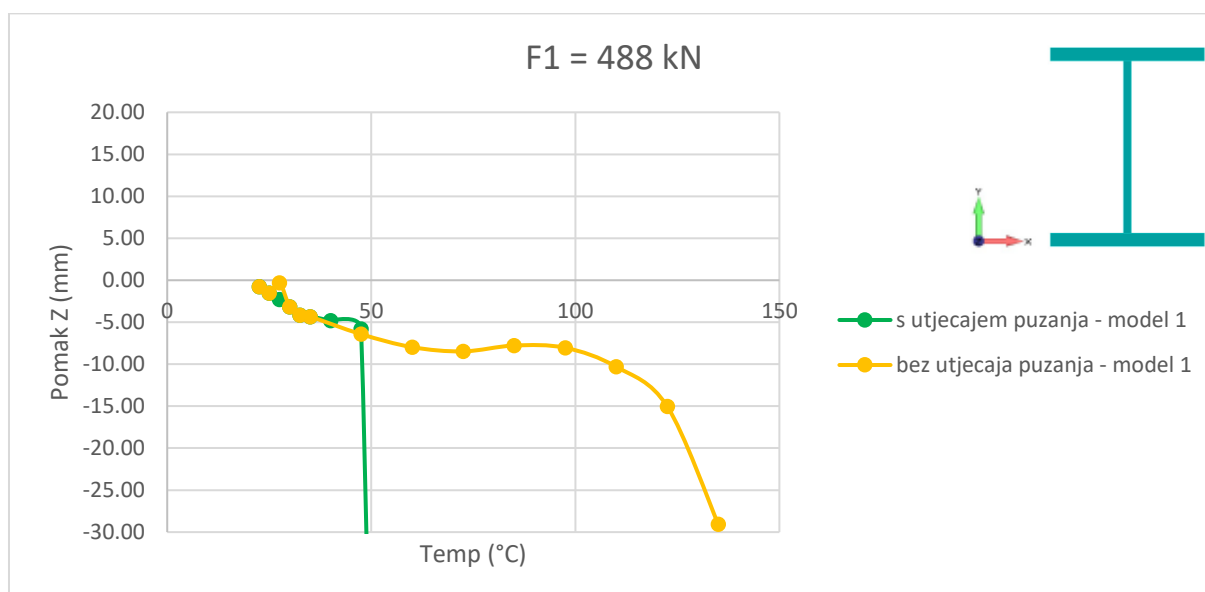


Slika 5.6 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi

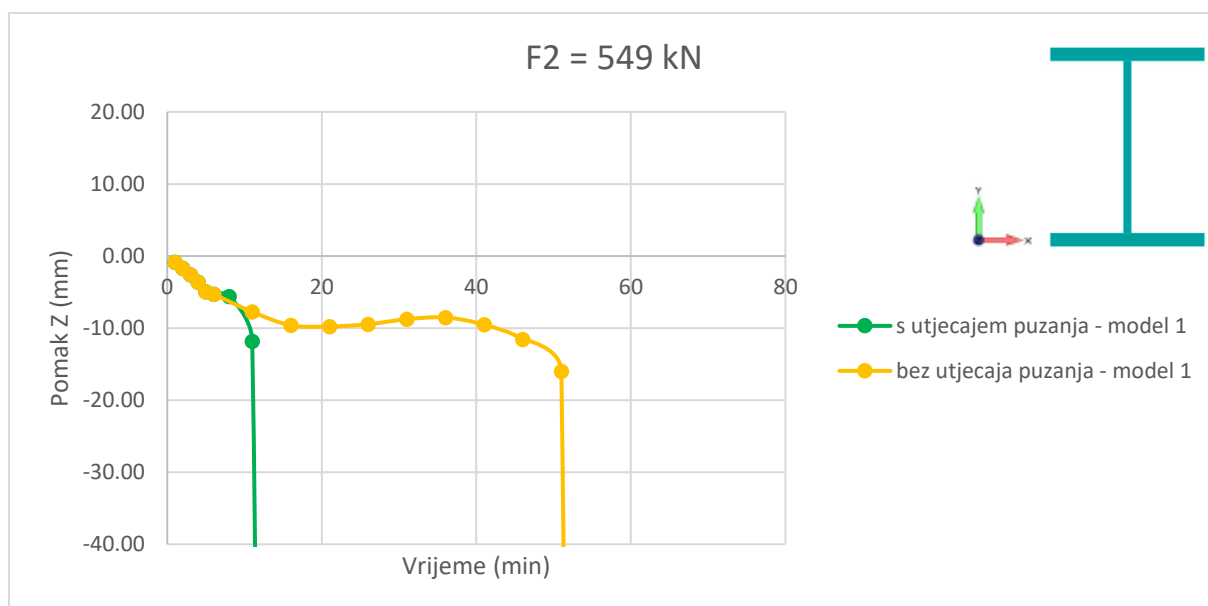
5.2 Rezultati modela 1 u smjeru osi Z



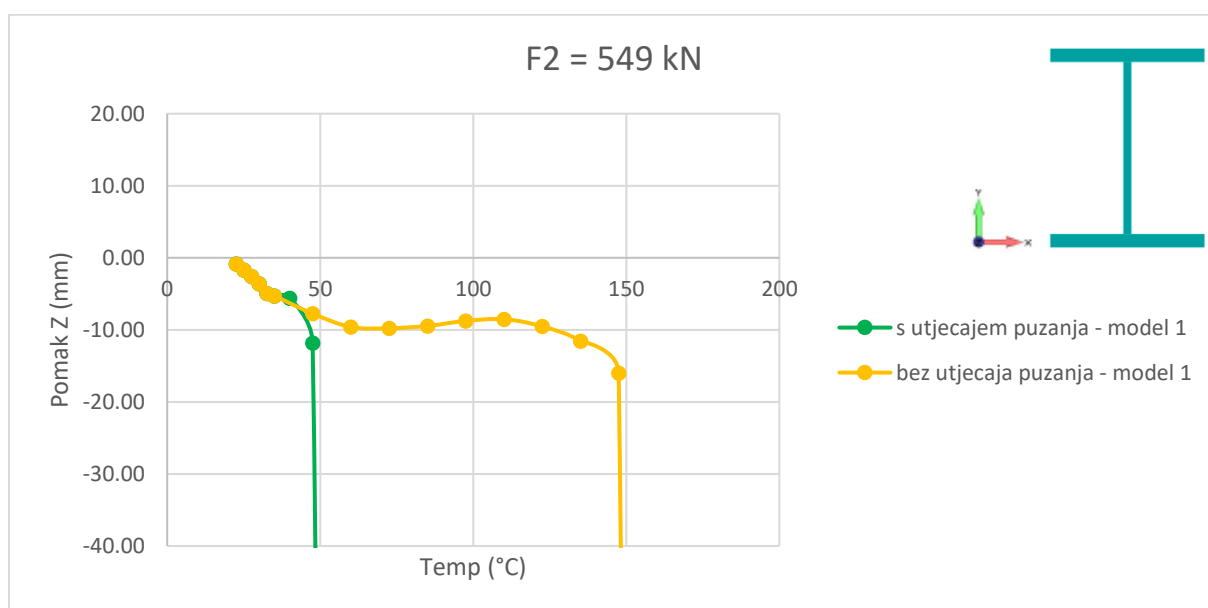
Slika 5.7 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 5.8 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o temperaturi

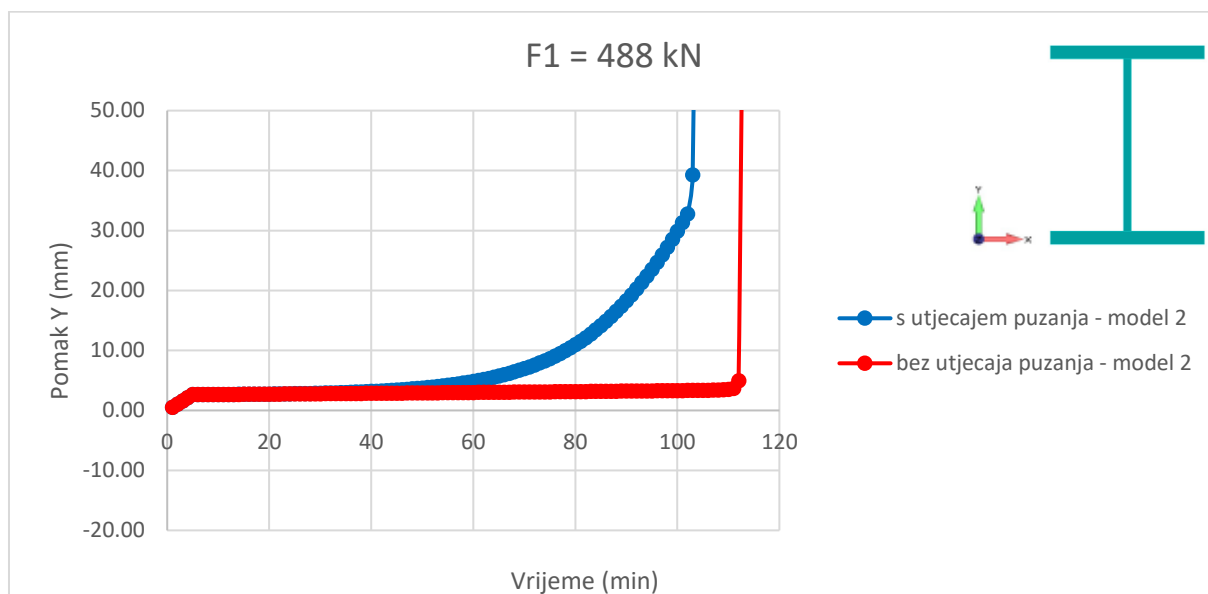


Slika 5.9 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu

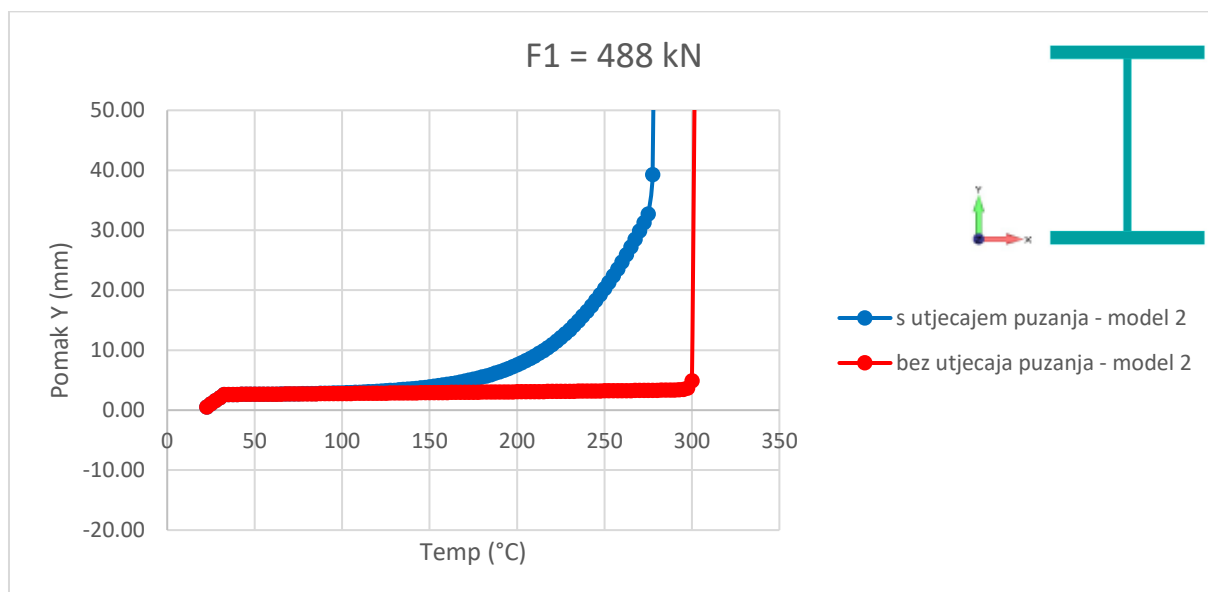


Slika 5.10 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o temperaturi

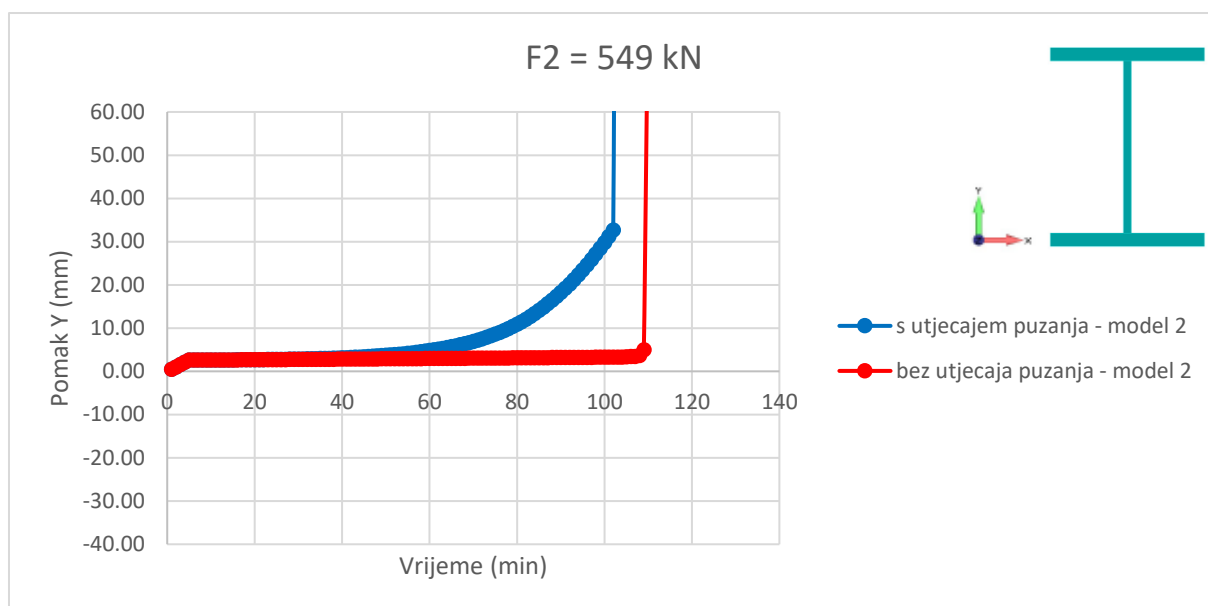
5.3 Rezultati modela 2 u smjeru osi Y



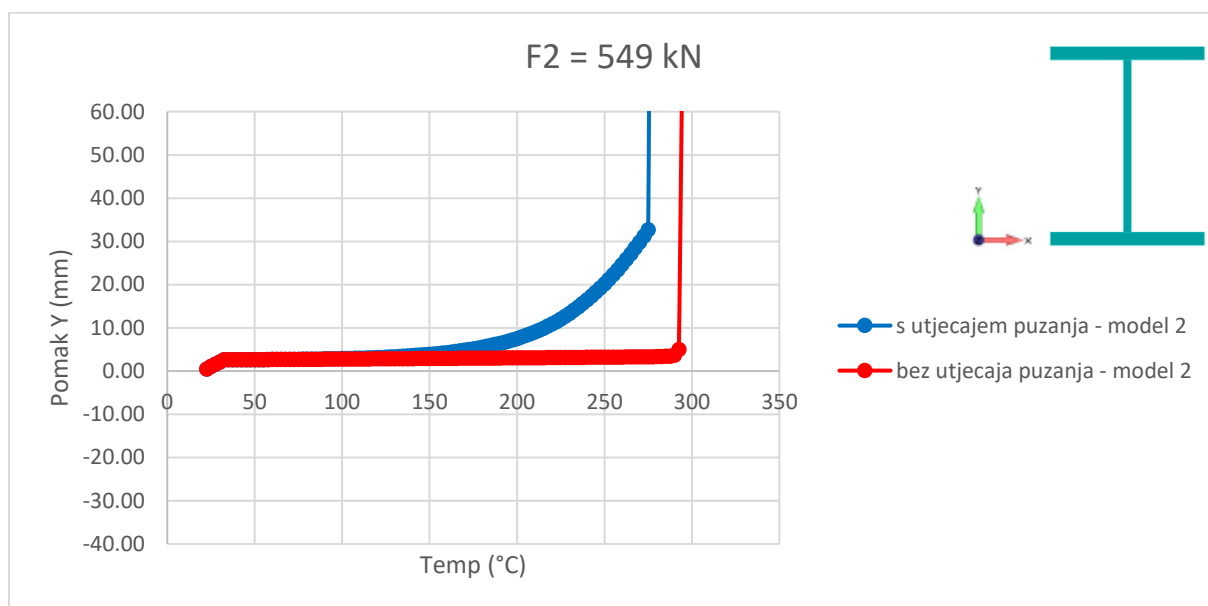
Slika 5.11 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



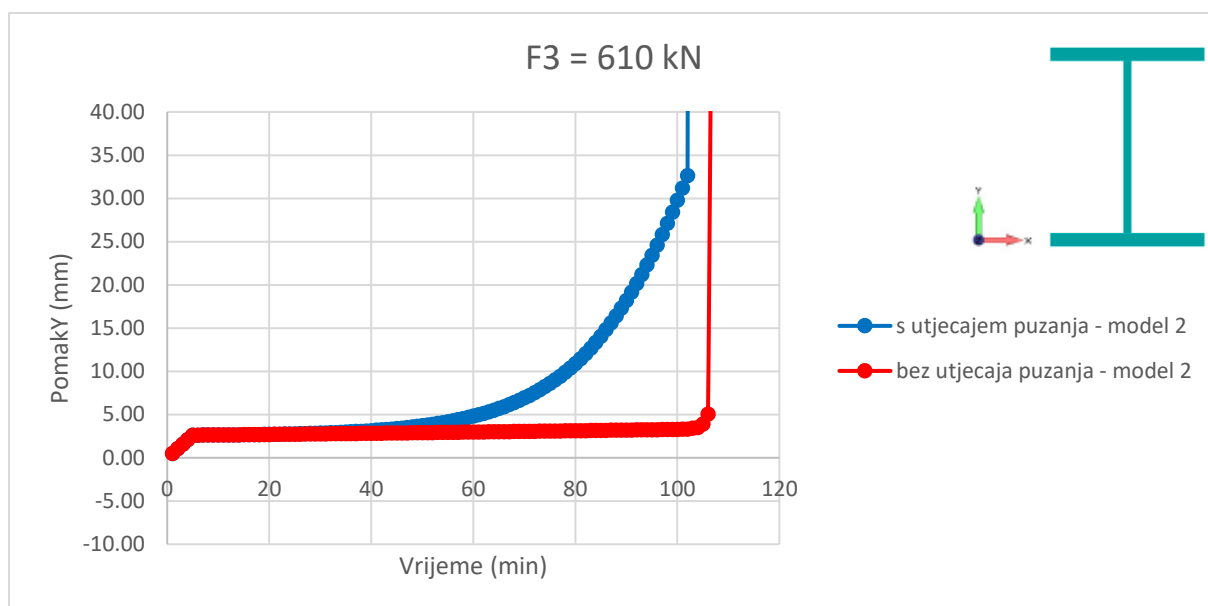
Slika 5.12 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi



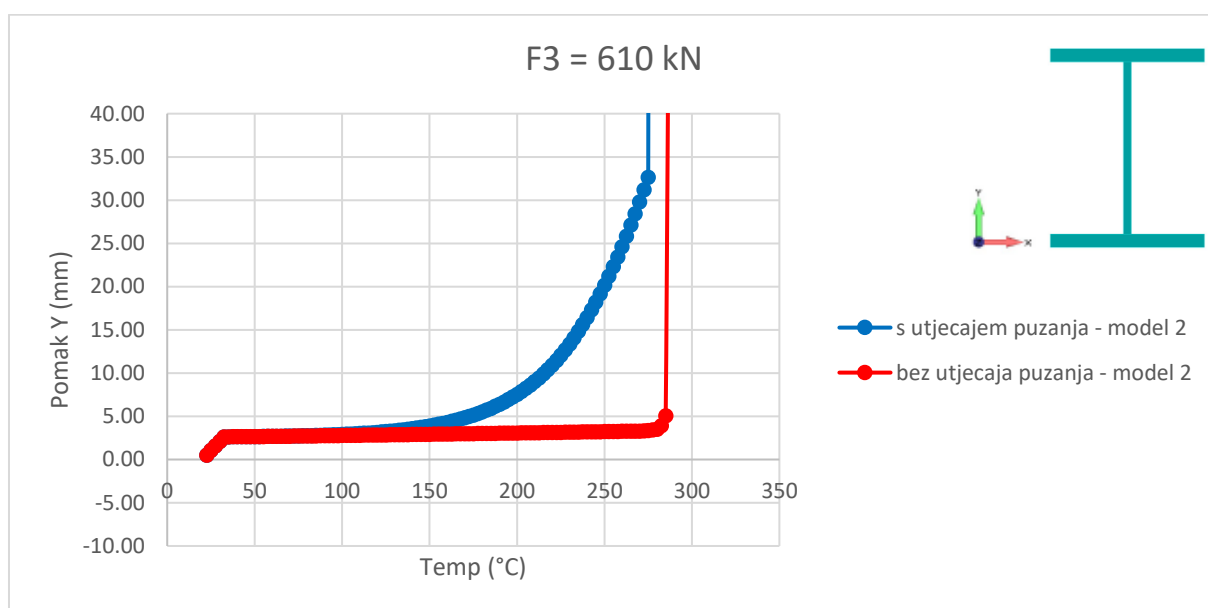
Slika 5.13 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



Slika 5.14 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi

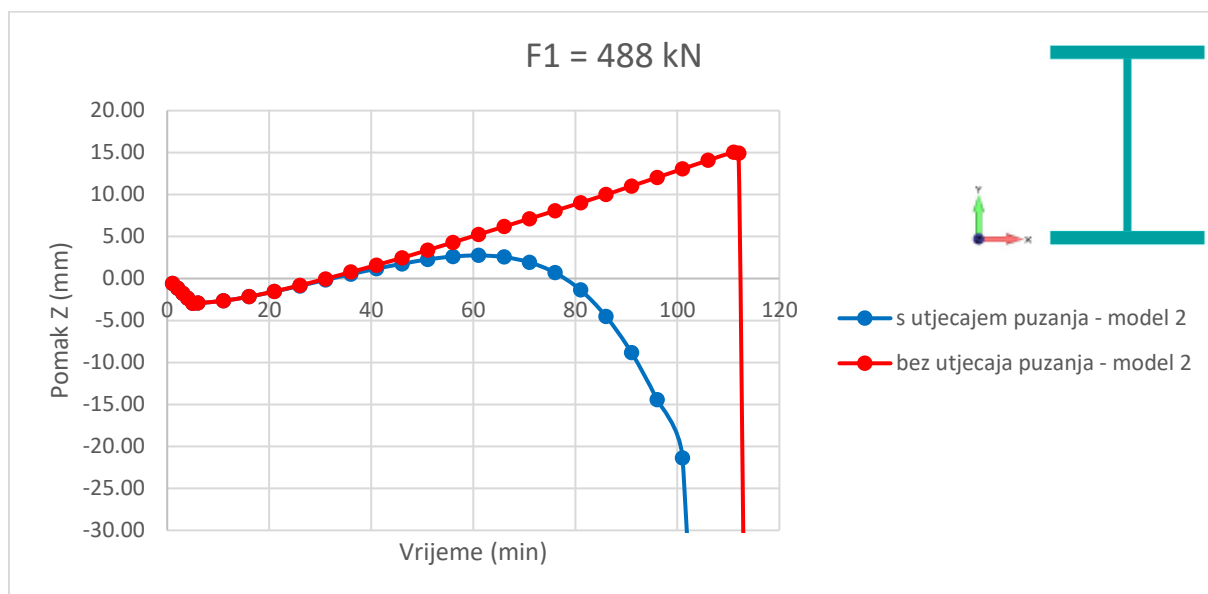


Slika 5.15 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

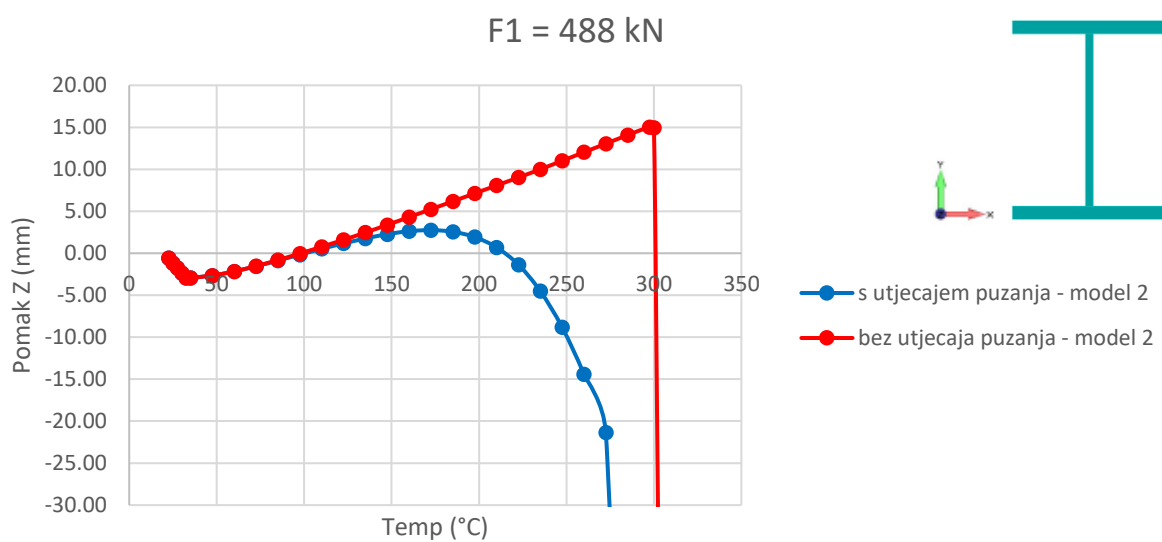


Slika 5.16 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o temperaturi

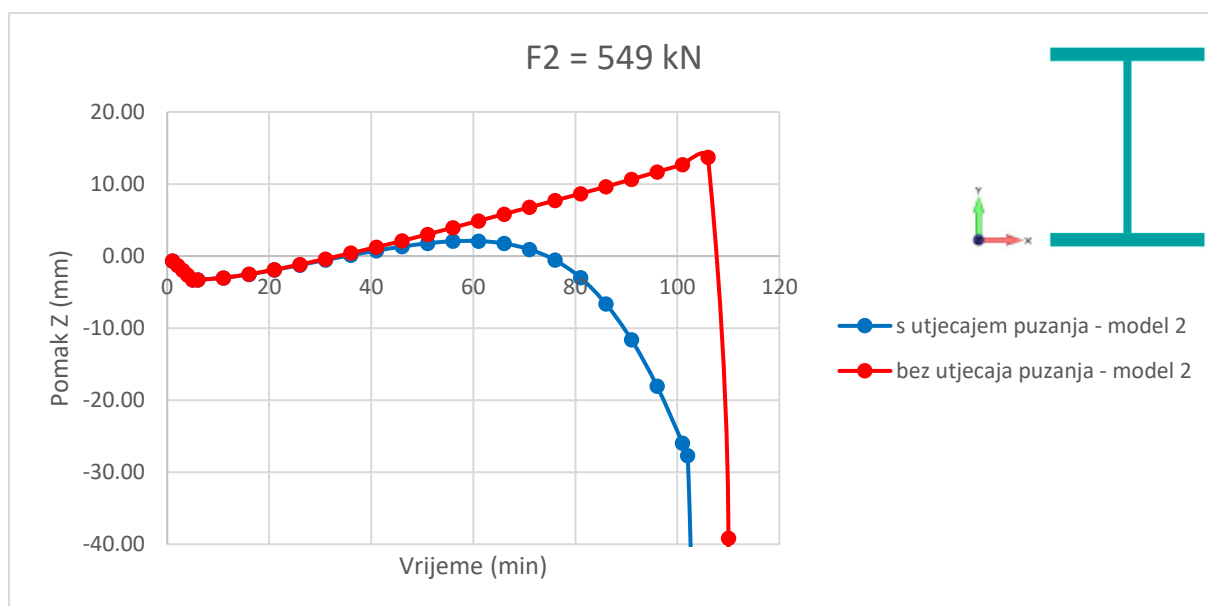
5.4 Rezultati modela 2 u smjeru osi Z



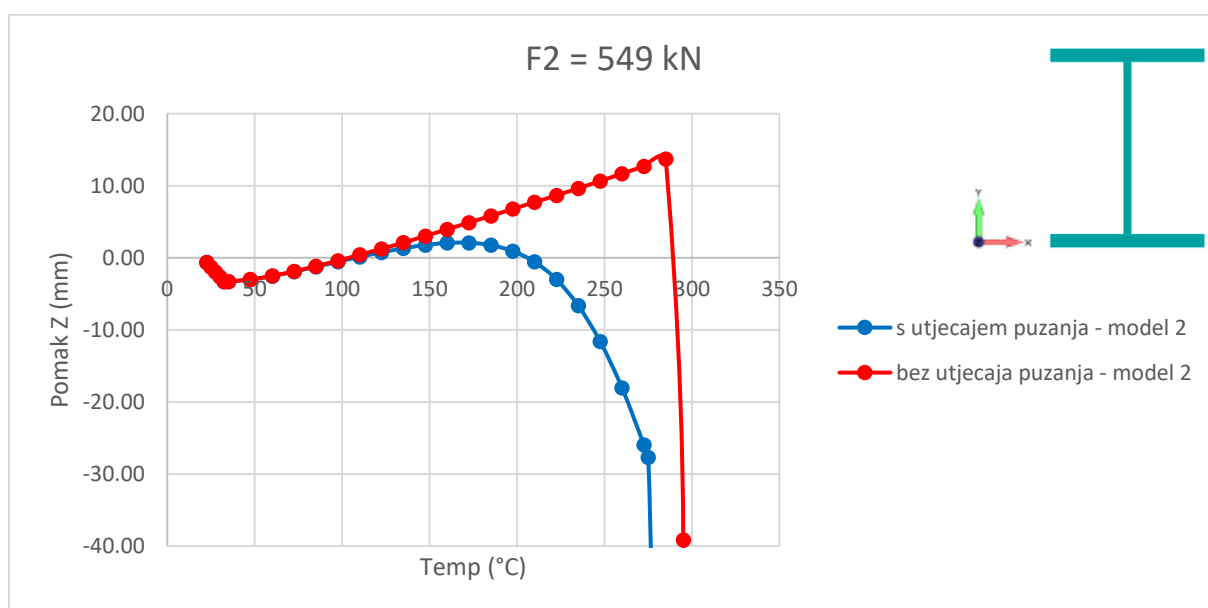
Slika 5.17 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



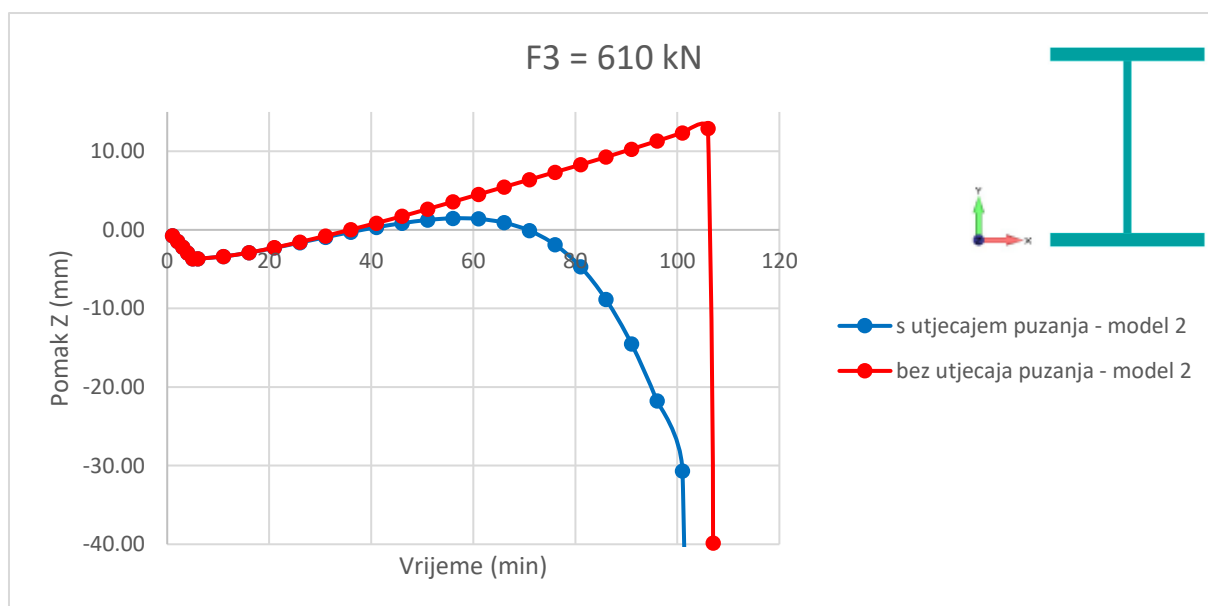
Slika 5.18 Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o temperaturi



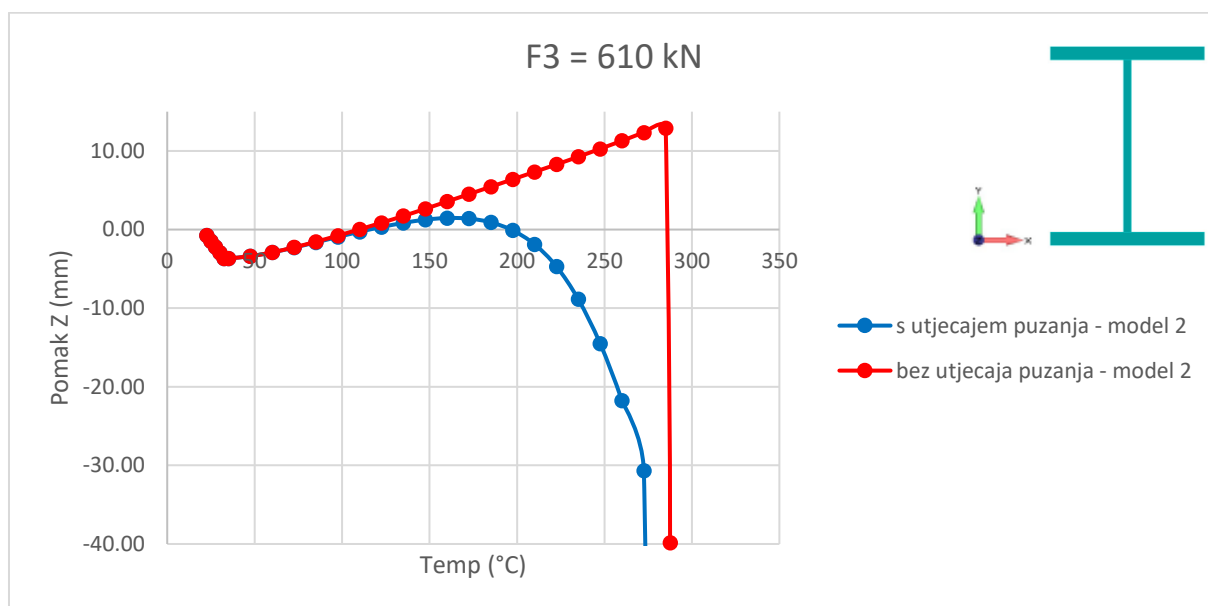
Slika 5.19 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 5.20 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o temperaturi



Slika 5.21 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 5.22 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o temperaturi

ZAKLJUČAK: Iz grafova se vidi da utjecaj puzanja smanjuje kritičnu temperaturu i kritično vrijeme koje stup može nositi zadano opterećenje u usporedbi kad puzanje nije uzeto u obzir. Isto tako vidi se da postoje velike razlike u rezultatima ovisno o načinu pridržanja (aluminij je dosta mekan materijal i dolazi do velikih lokalnih deformacija ovisno o načinu pridržanja).

6 REZULTATI PRORAČUNA – STACIONARNE SIMULACIJE

Kod stacionarnih simulacija prvo se zagrijava stup do prethodno određene temperature te se onda nanosi opterećenje a temperatura se održava konstantnom.

Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, pa je stoga određeno da svaki korak predstavlja 1 min.

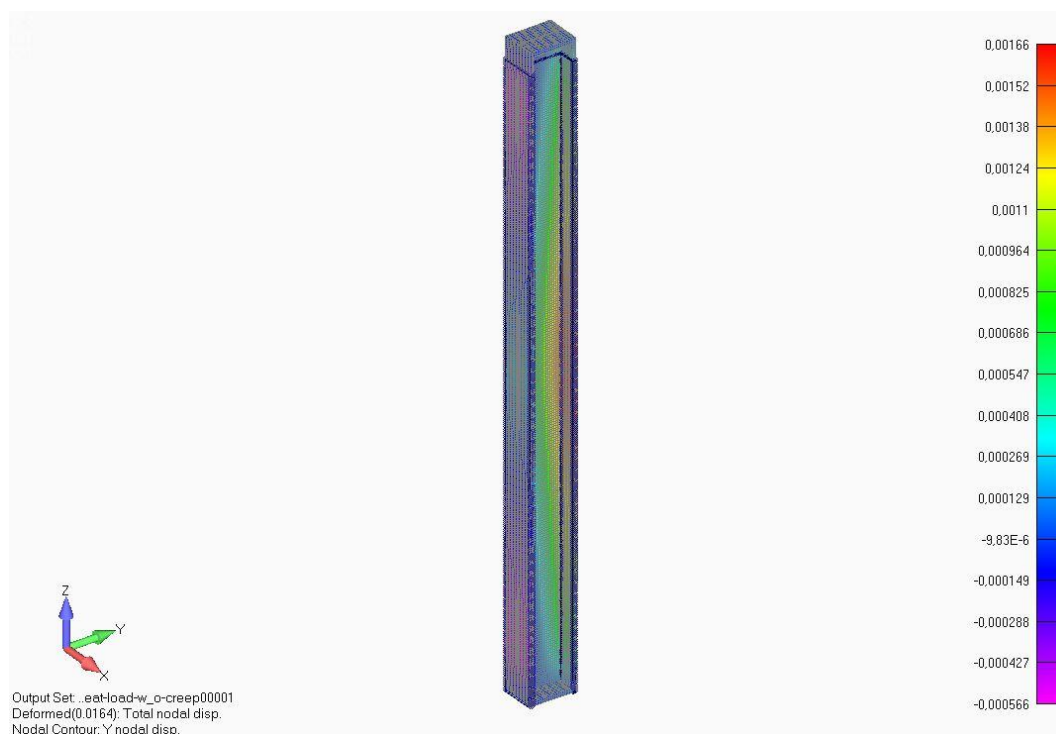
Prikazani pomaci su u Y smjeru i iznosi su u mm.

Prikazana naprezanja su von Mises naprezanja u N/mm^2

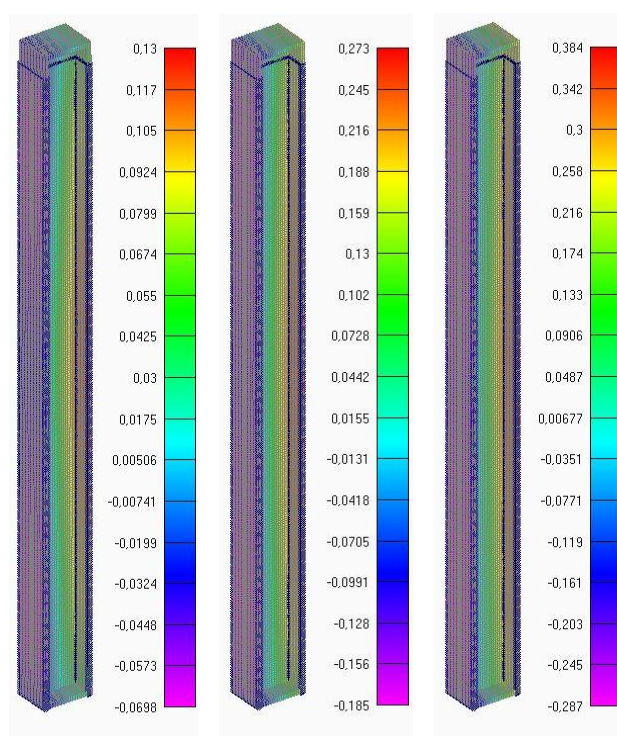
6.1 Rezultati za MODEL 1 – Test 1 – bez puzanja

Test 1: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sila u smjeru stupa iznosi $420,0\text{ kN}$, a poprečna iznosi $48,0\text{ kN}$. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.1 – Pomak stupa nakon 1 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

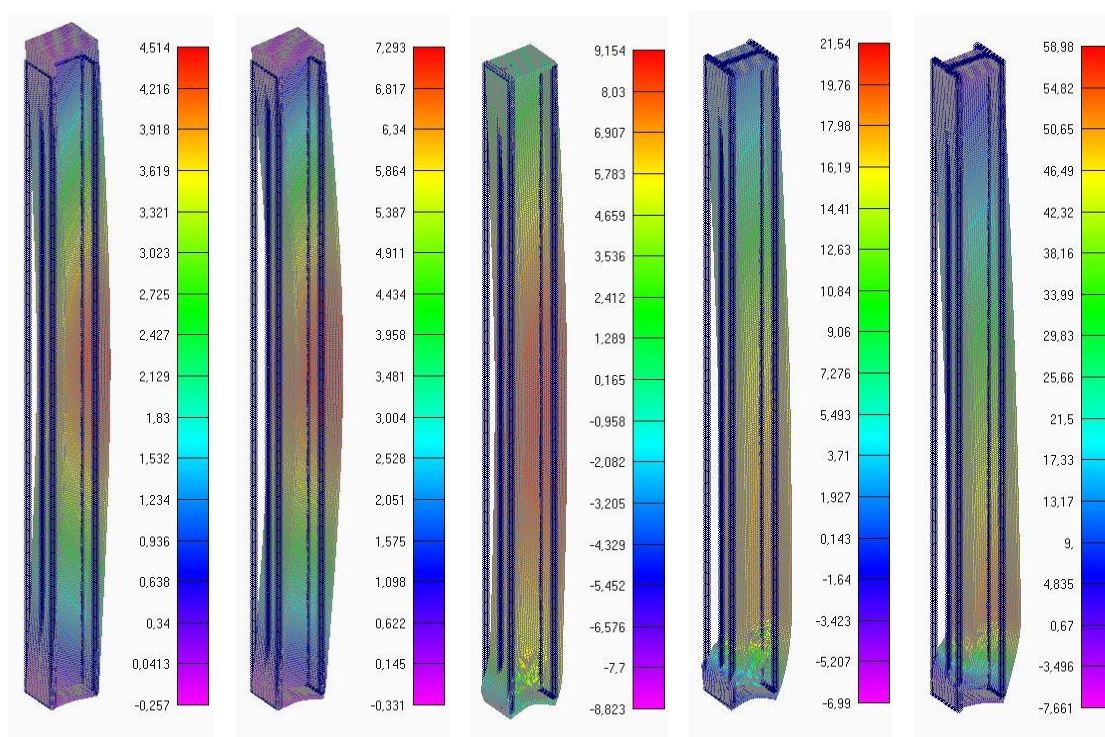


21 min

41 min

56 min = 160°C

Slika 6.2 – Pomak stupa nakon 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



160°C+3/5

160°C+ukupno

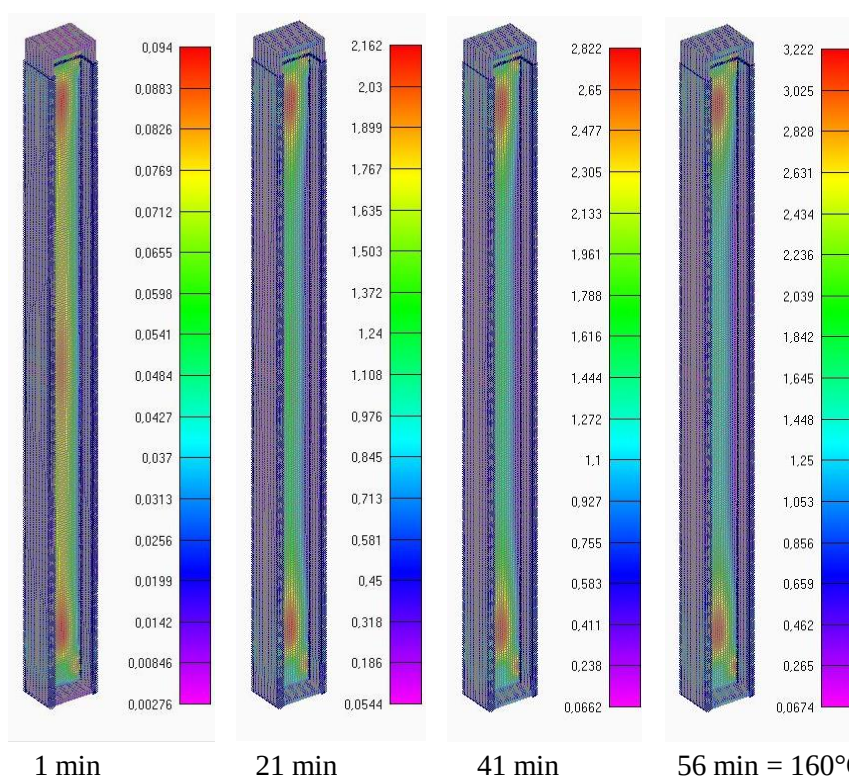
opt+20min

opt+30min

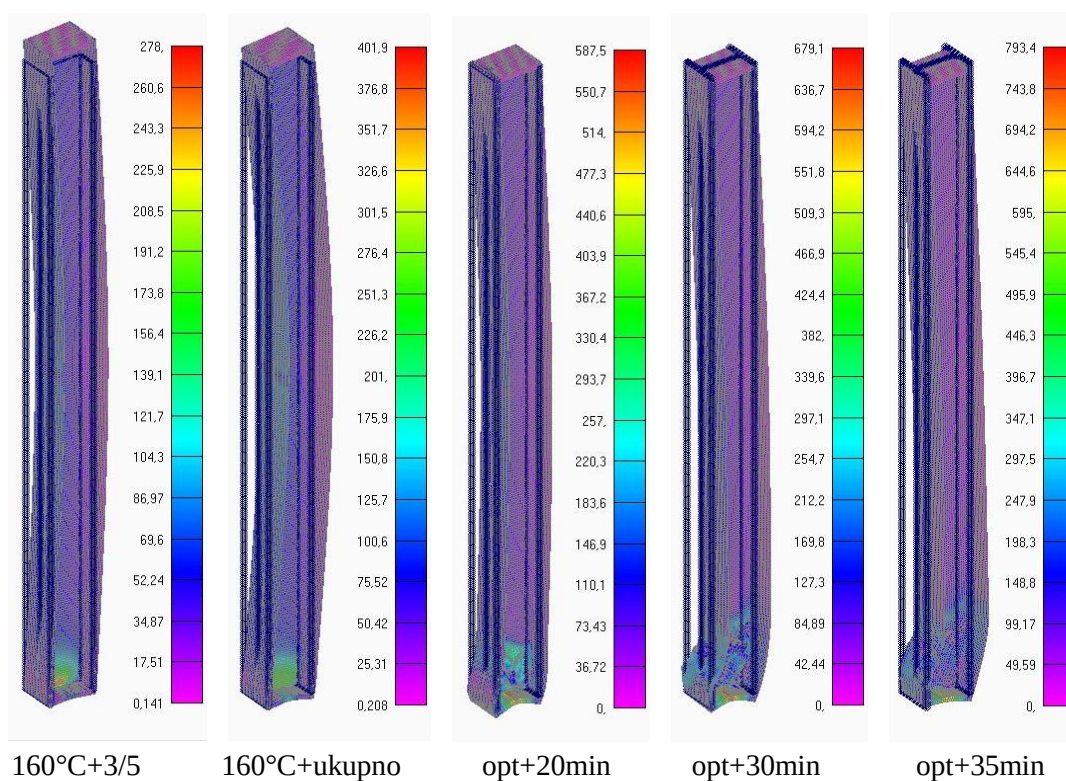
opt+35min

Slika 6.3 – Pomak srupa nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 30, 35 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.4 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

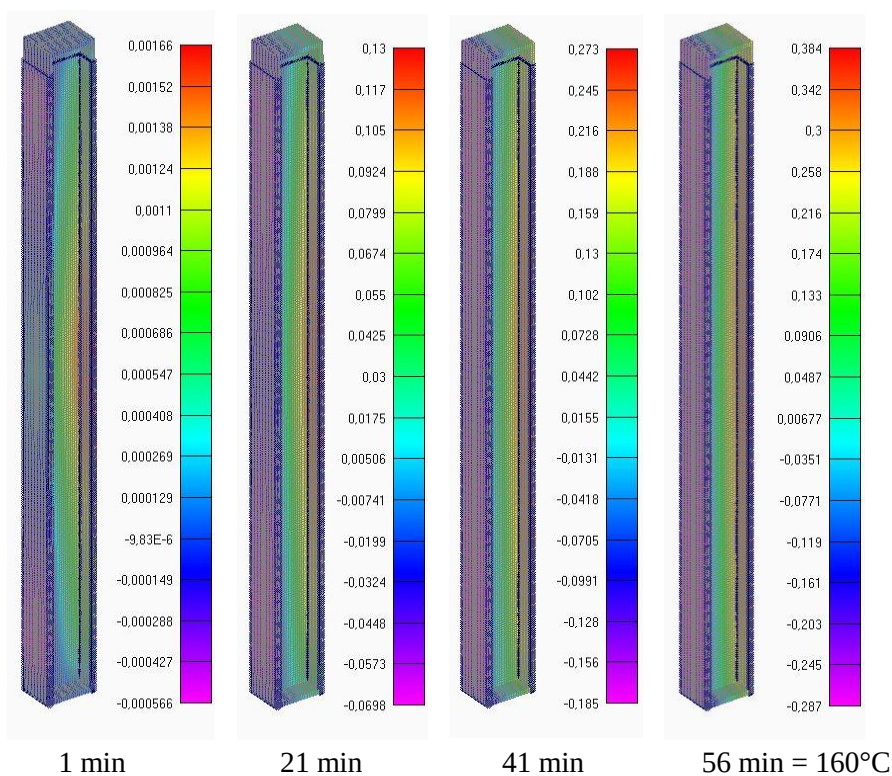


Slika 6.5 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 30, 35 min

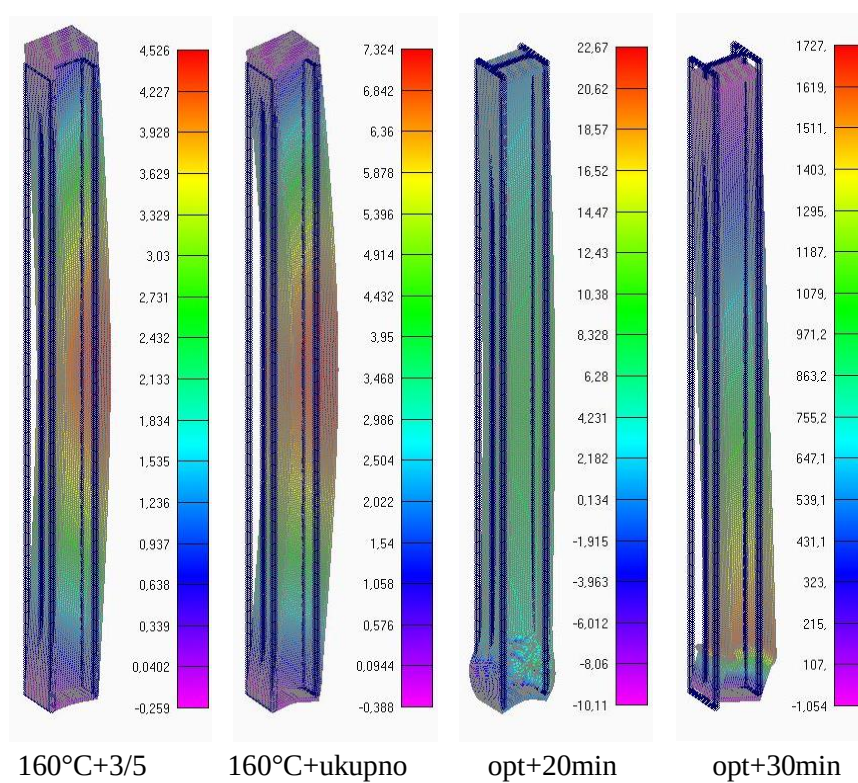
6.2 Rezultati za MODEL 1 – Test 2 – bez puzanja

Test 2: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 457,5 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

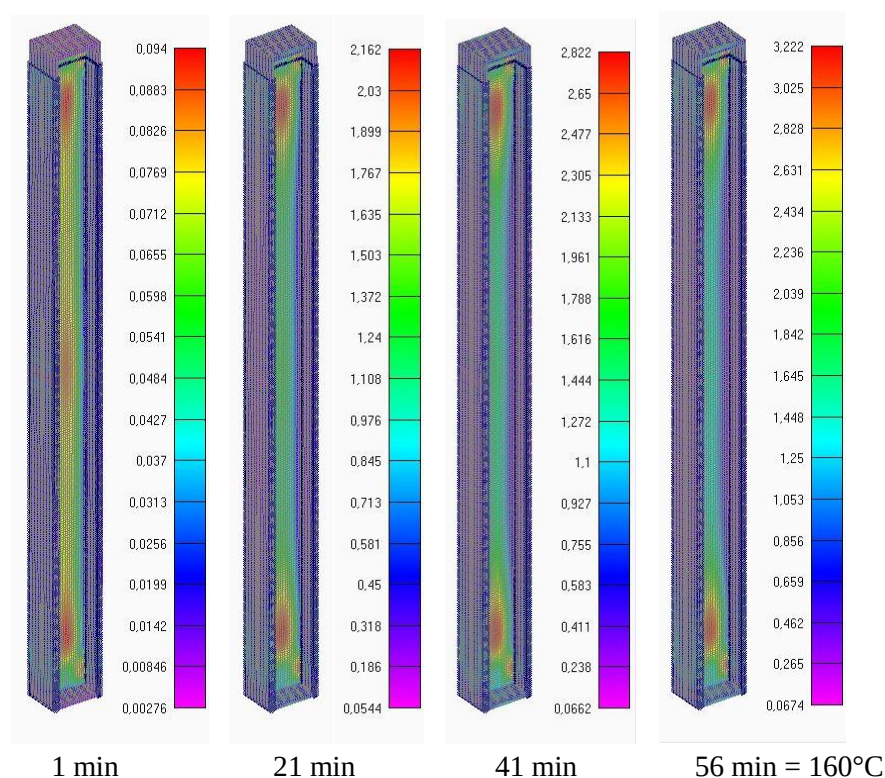


Slika 6.6 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

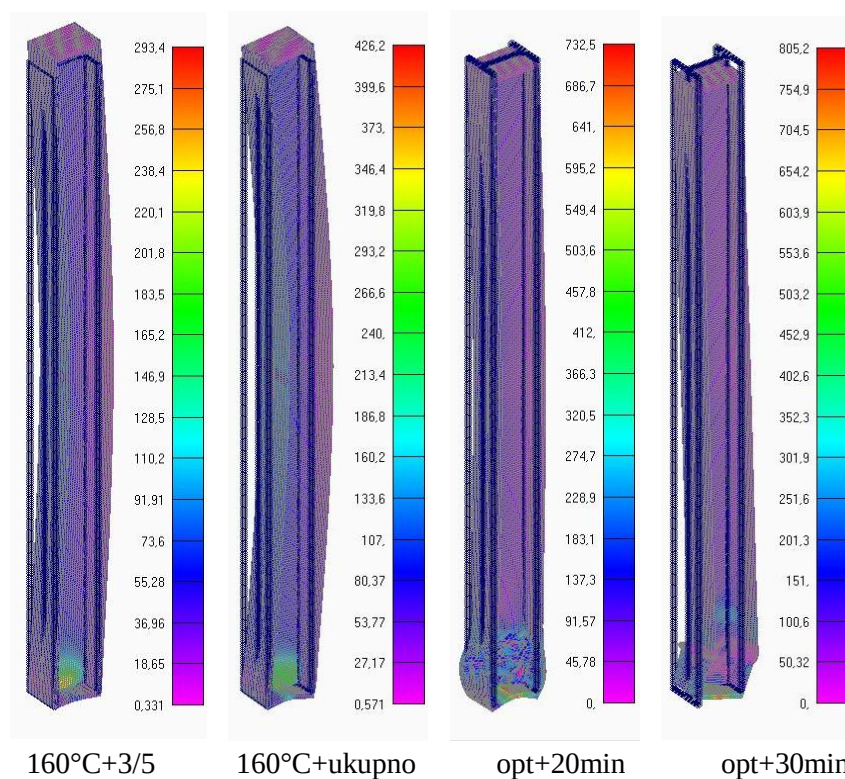


Slika 6.7 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 30 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.8 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

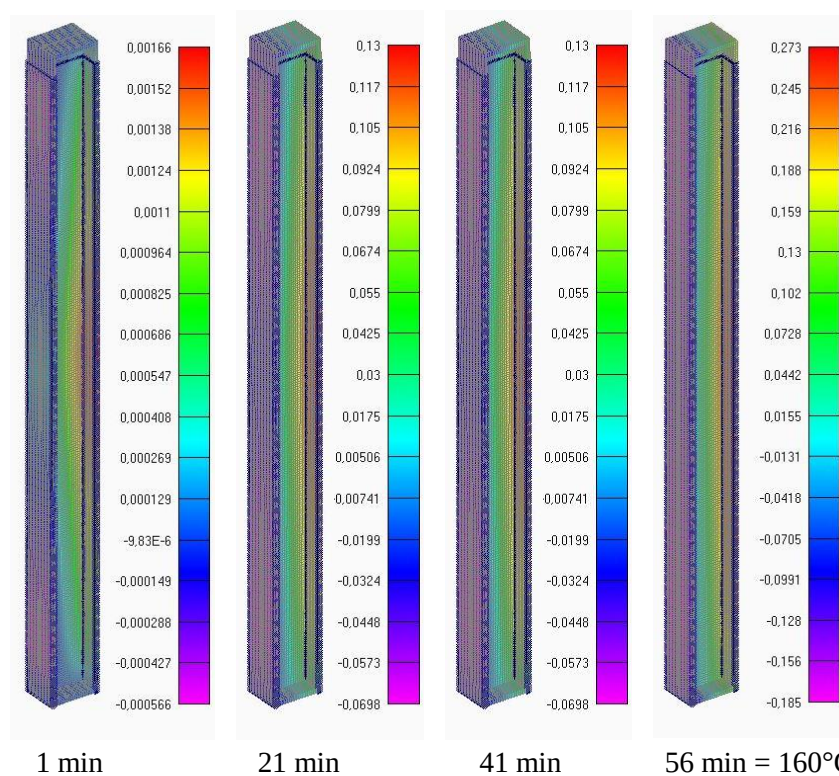


Slika 6.9 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 30 min

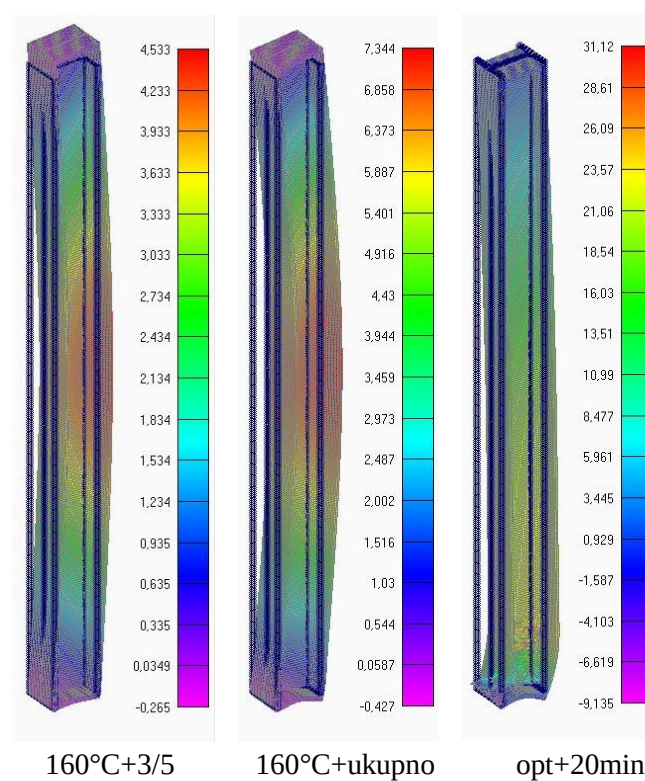
6.3 Rezultati za MODEL 1 – Test 3 – bez puzanja

Test 3: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 475,8 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

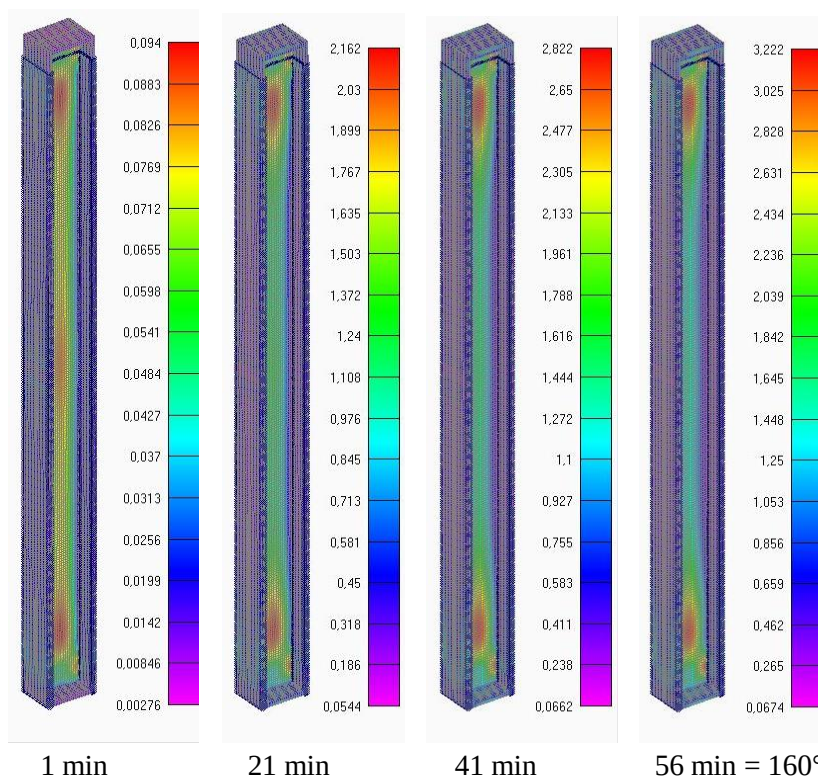


Slika 6.10 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

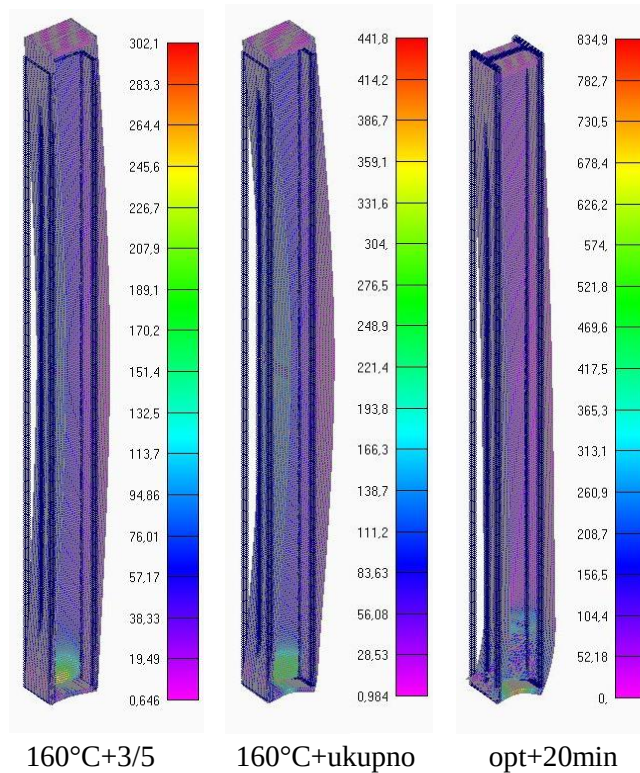


Slika 6.11 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.12 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

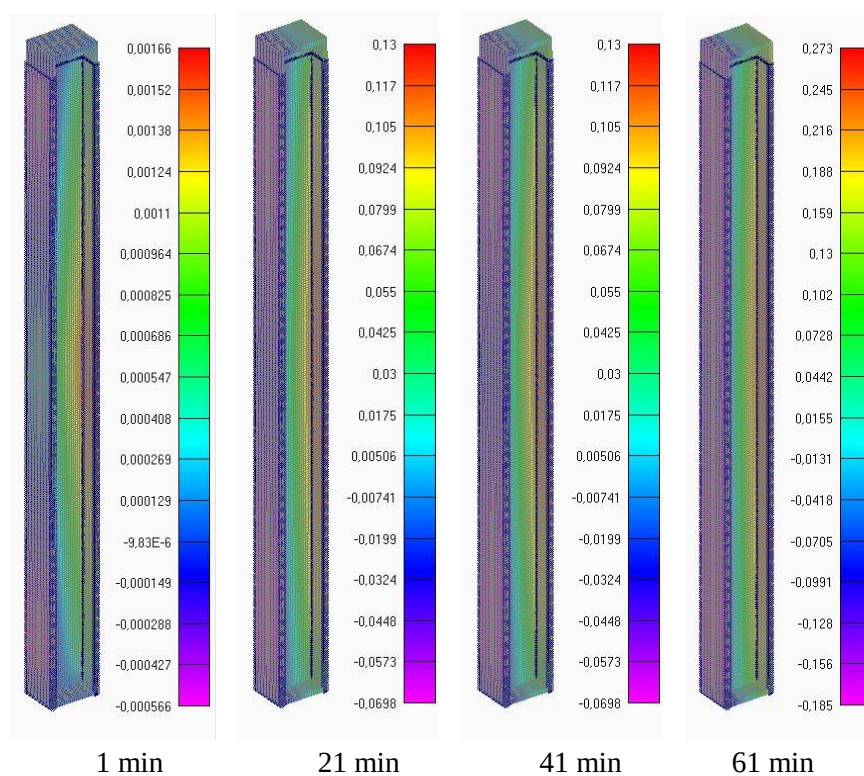


Slika 6.13 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20 min

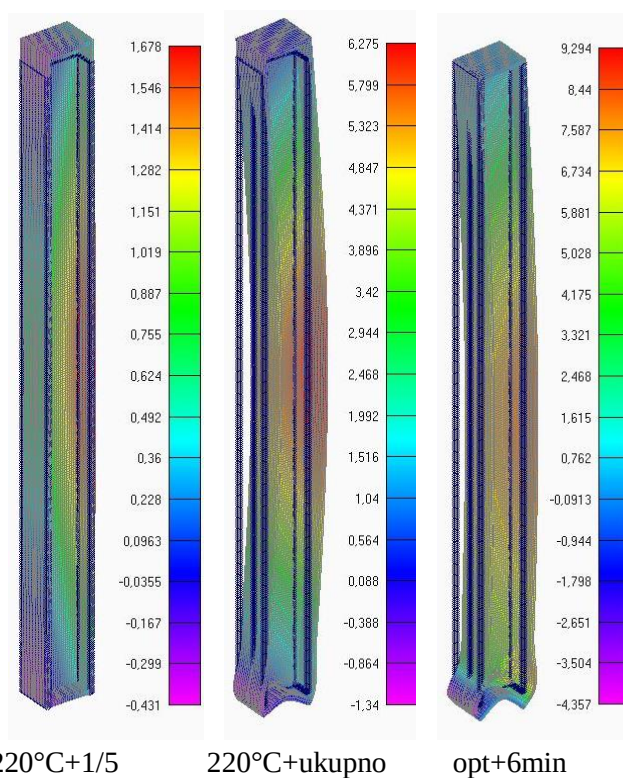
6.4 Rezultati za MODEL 1 – Test 4 – bez puzanja

Test 4: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 220°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 573,4 kN, a poprečna iznosi 37,7 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

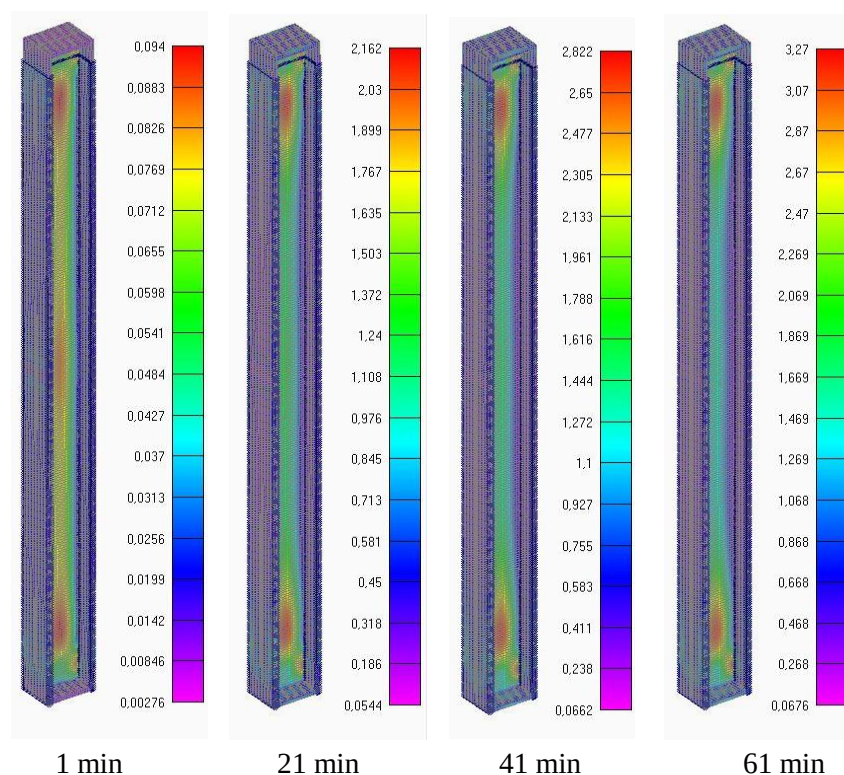


Slika 6.14 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

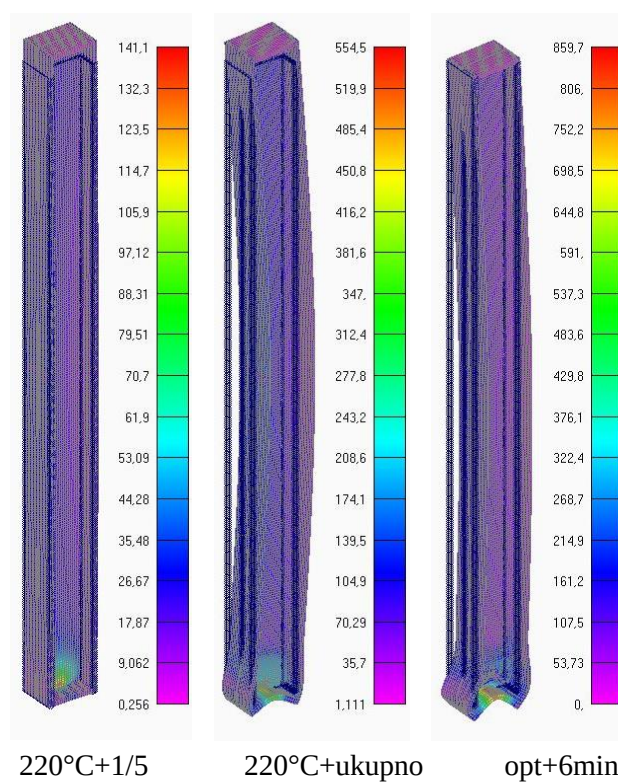


Slika 6.15 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.16 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

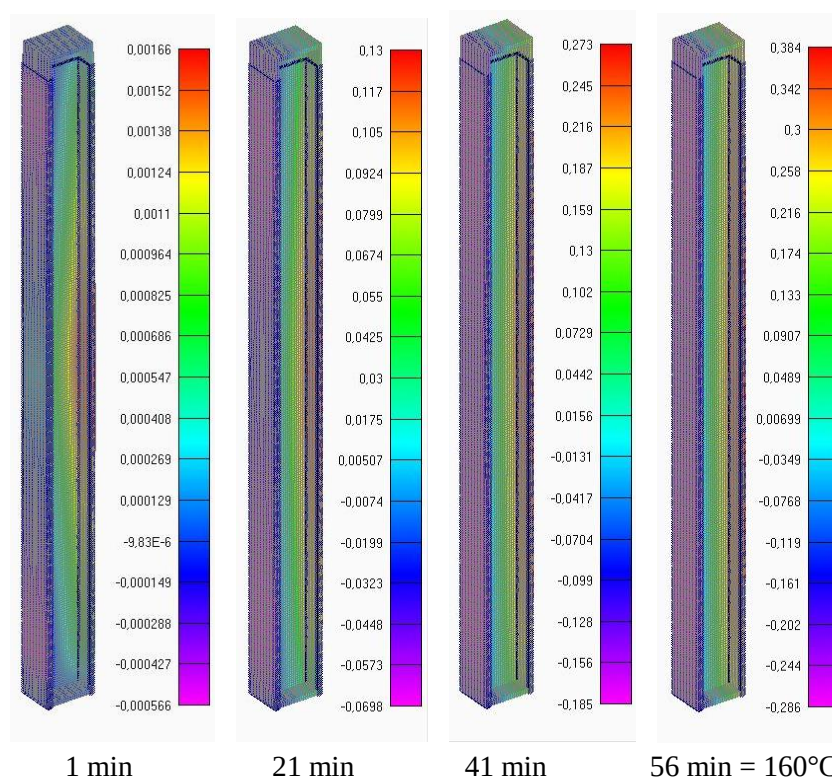


Slika 6.17 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6 min

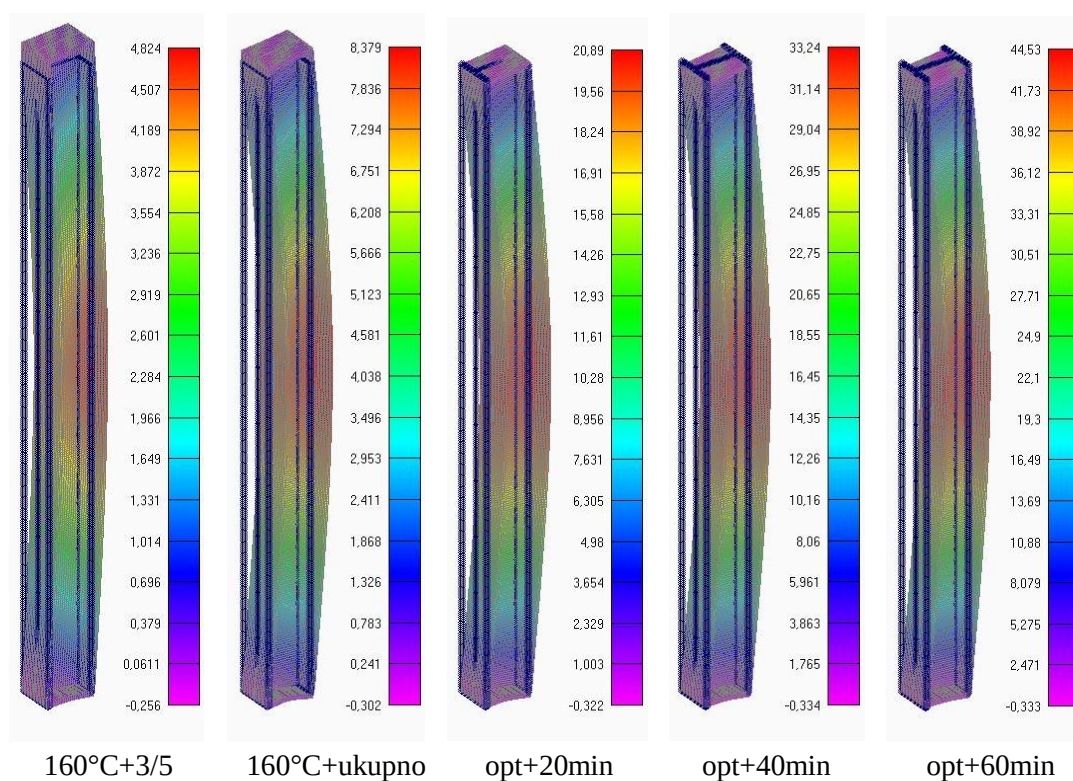
6.5 Rezultati za MODEL 1 – Test 1 – sa puzanjem

Test 1: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 420,0 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

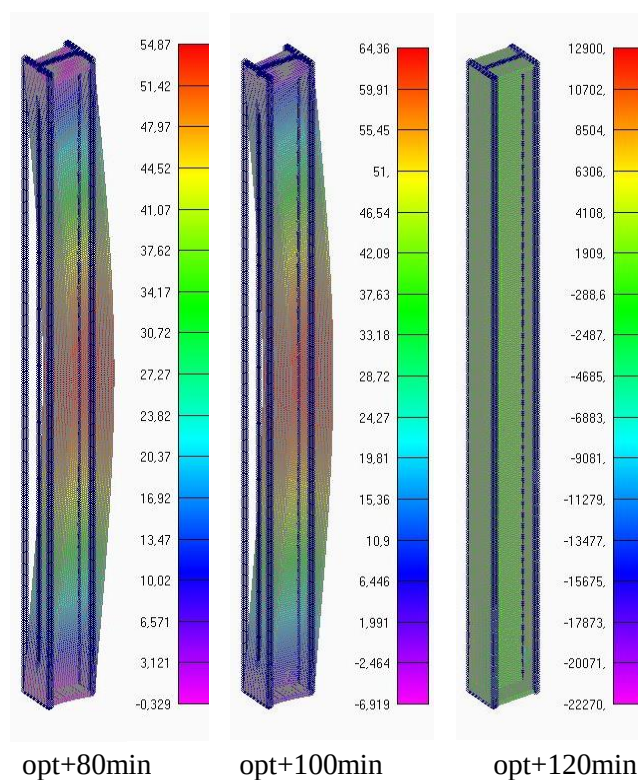
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.18 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

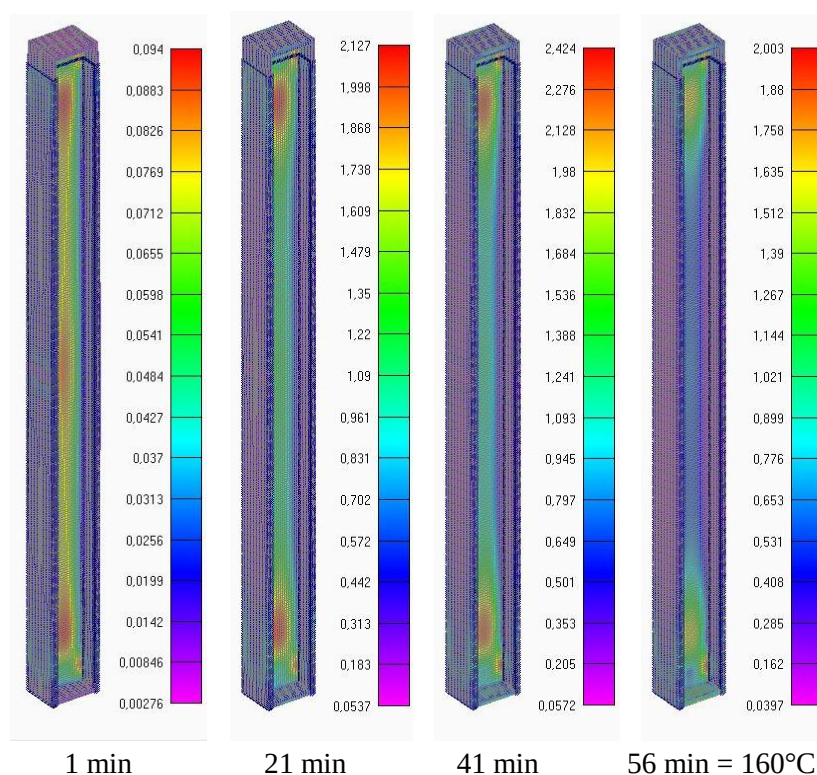


Slika 6.19 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

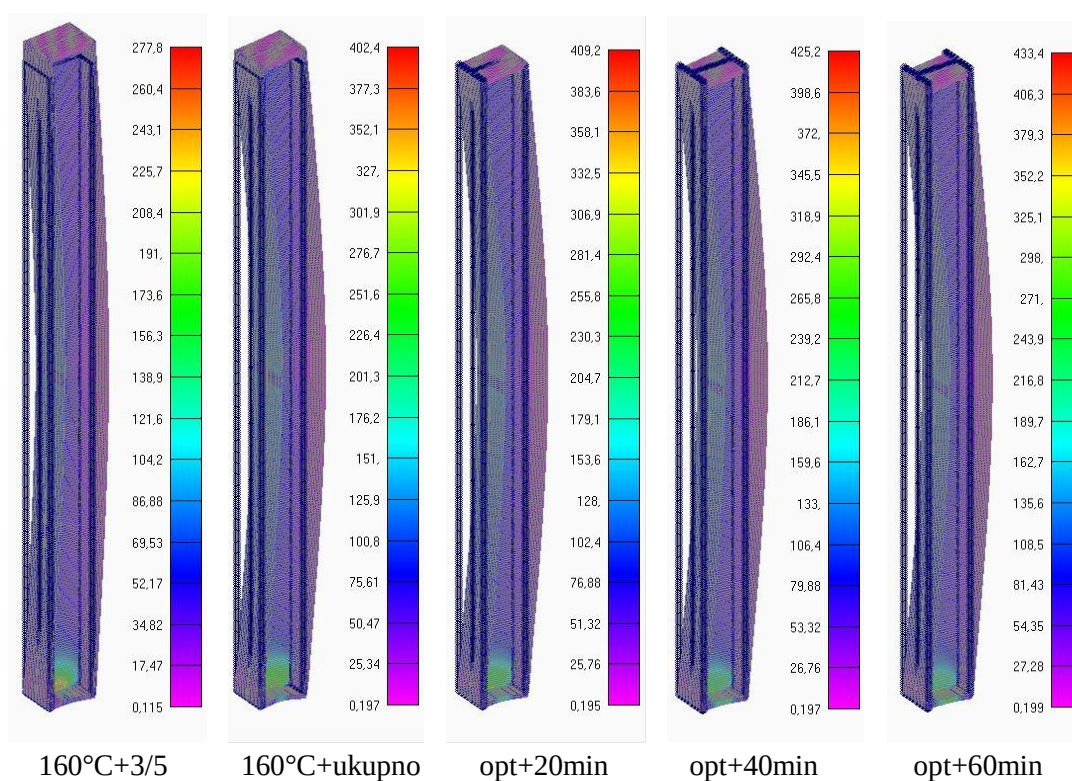


Slika 6.20 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 80, 100, 120 min

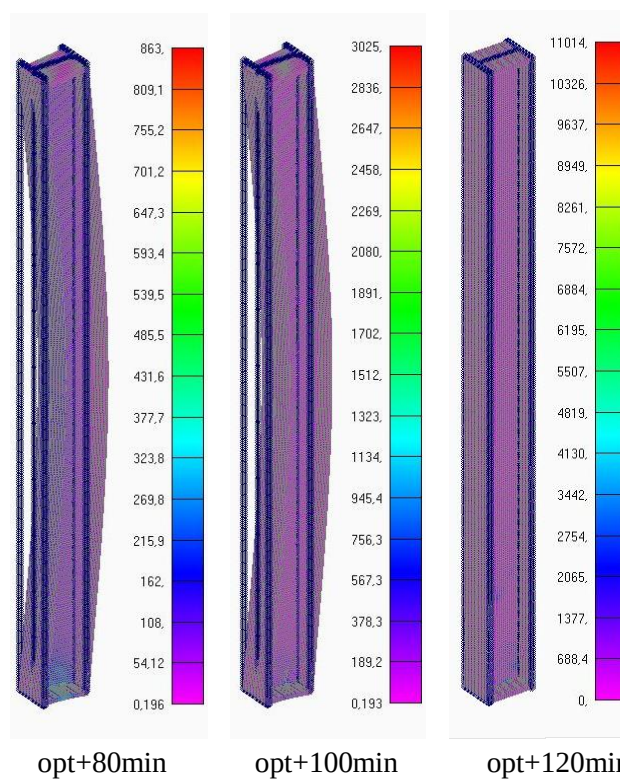
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.21 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 6.22 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

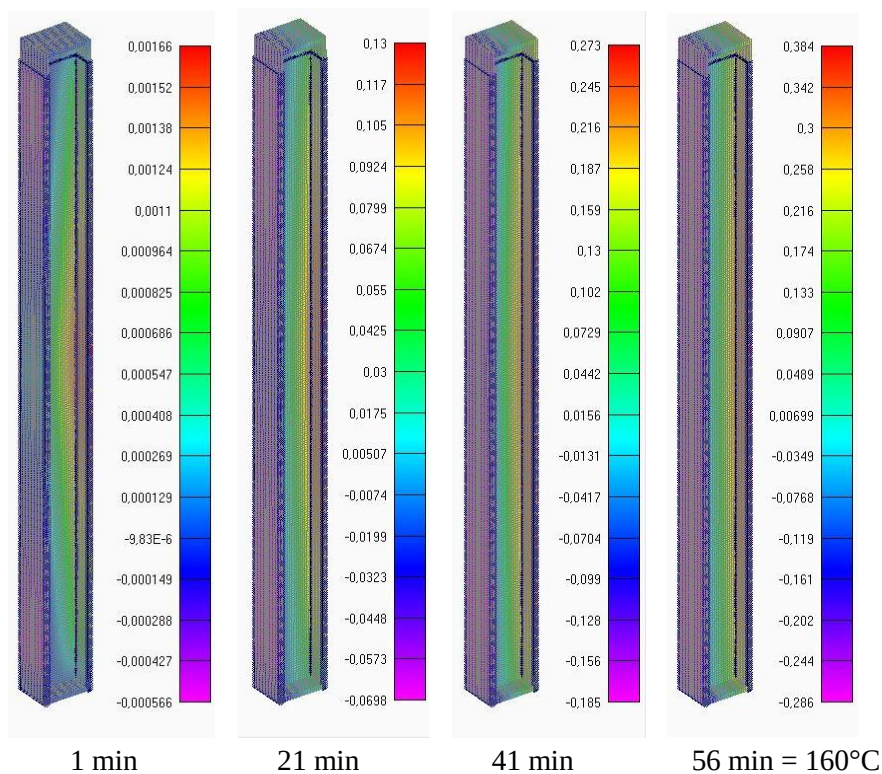


Slika 6.23 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 80, 100, 120 min

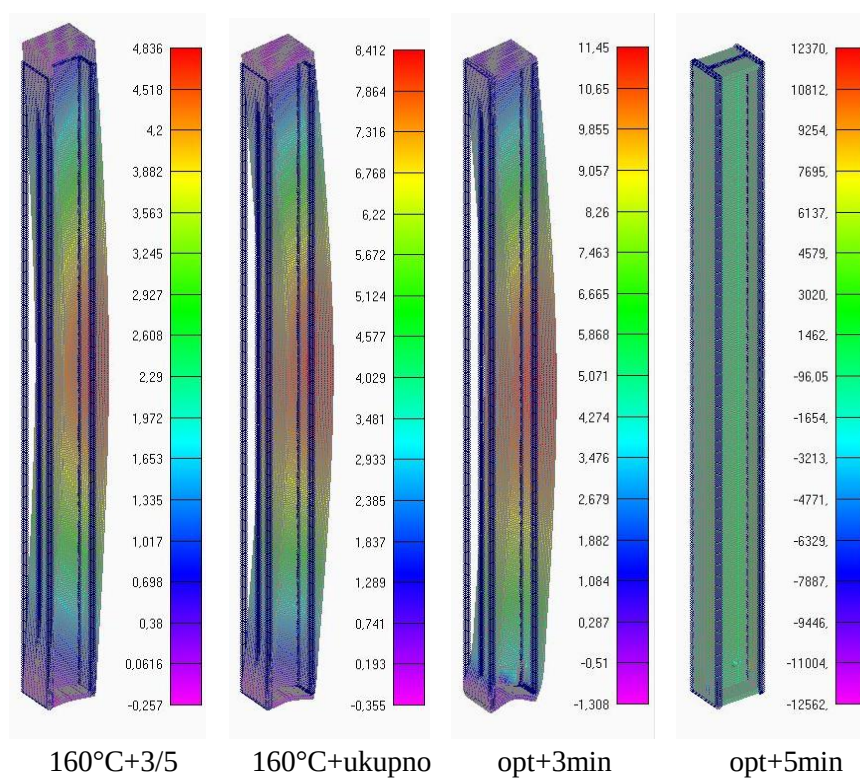
6.6 Rezultati za MODEL 1 – Test 2 – sa puzanjem

Test 2: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 457,5 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

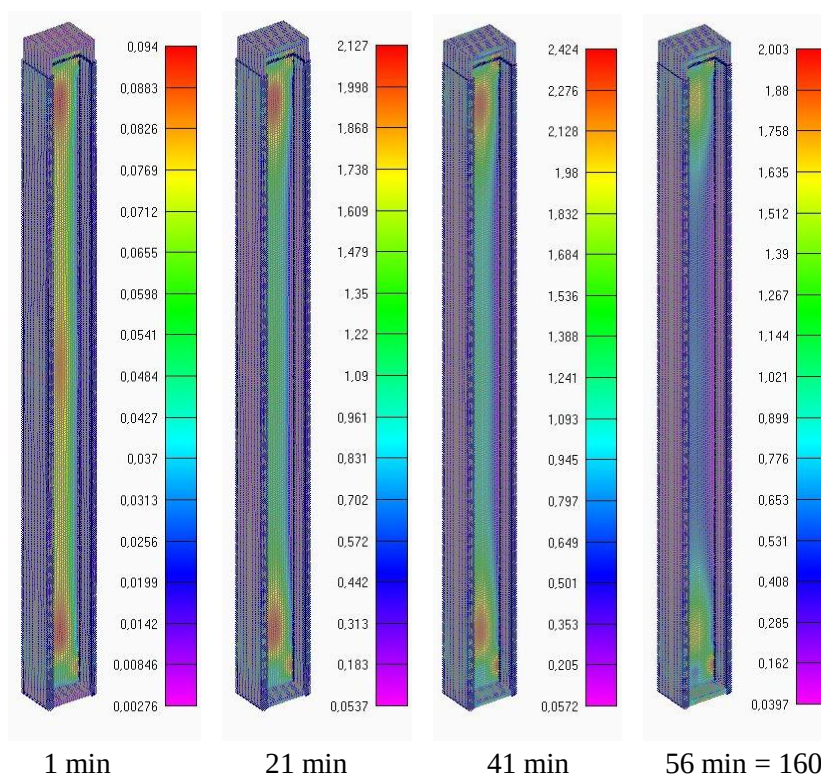


Slika 6.24 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

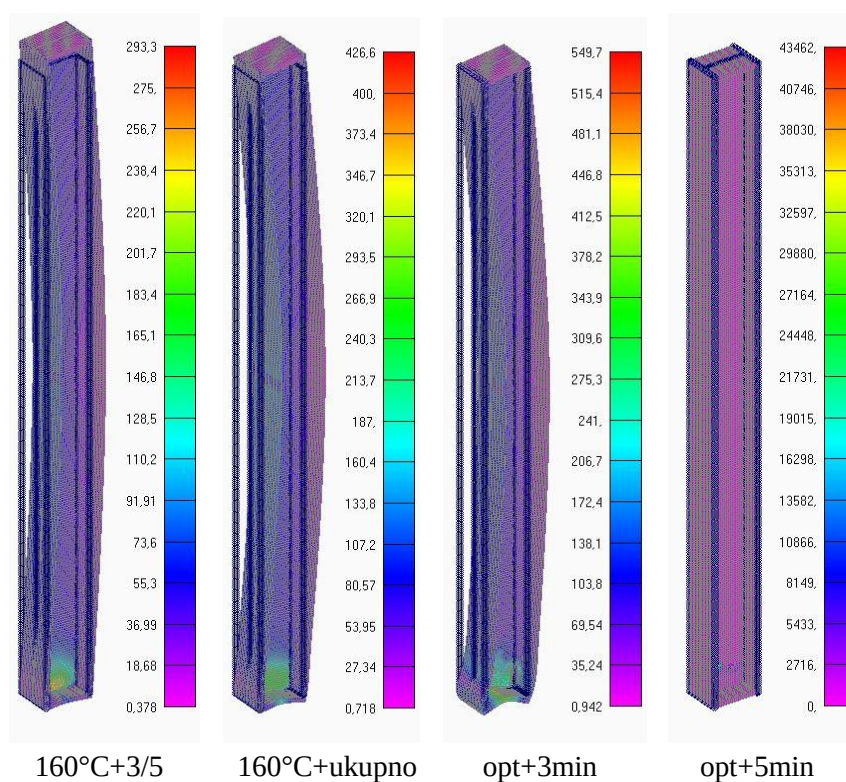


Slika 6.25 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 3, 5 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.26 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

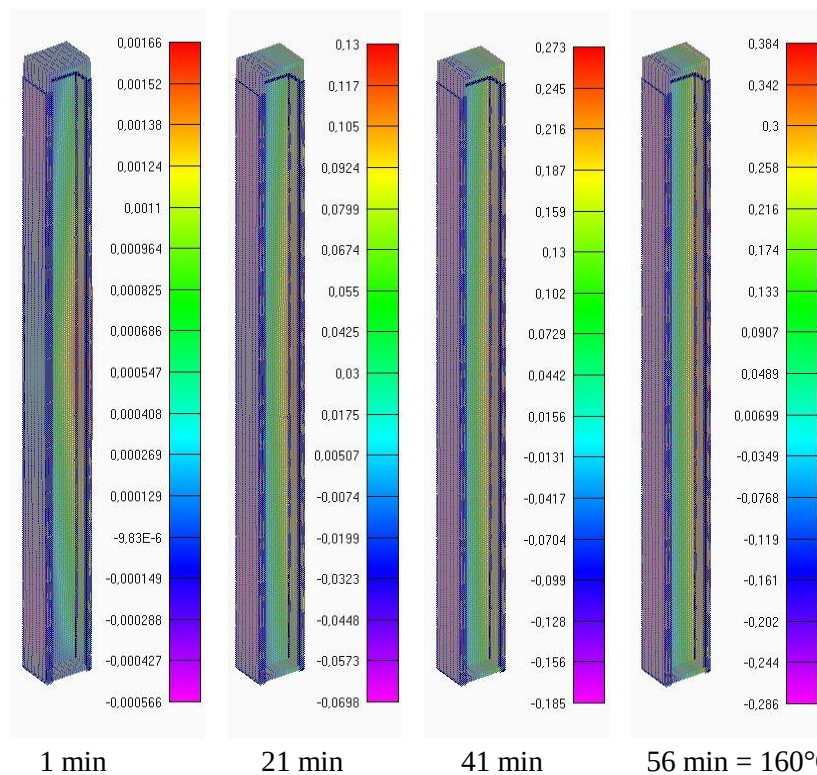


Slika 6.27 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 3, 5 min

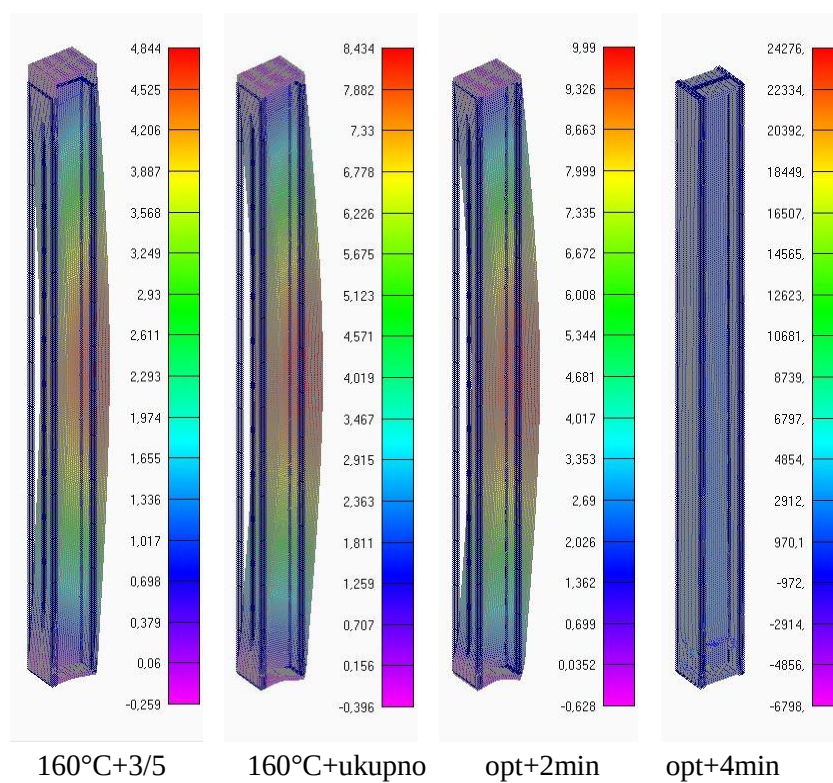
6.7 Rezultati za MODEL 1 – Test 3 – sa puzanjem

Test 3: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sila u smjeru stupa iznosi $475,8\text{ kN}$, a poprečna iznosi $48,0\text{ kN}$. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

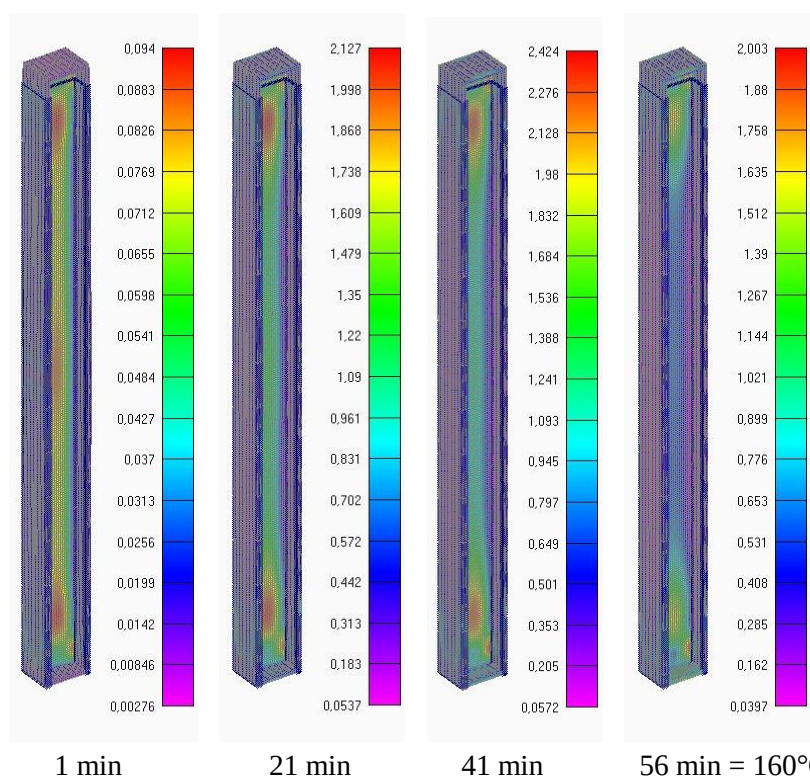


Slika 6.28 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

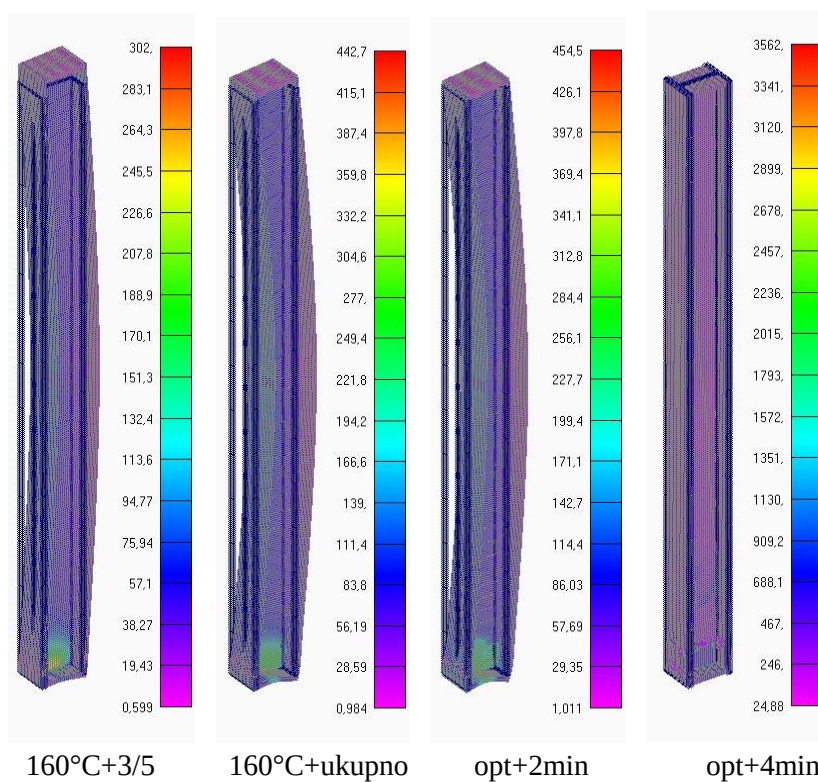


Slika 6.29 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 2, 4 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.30 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

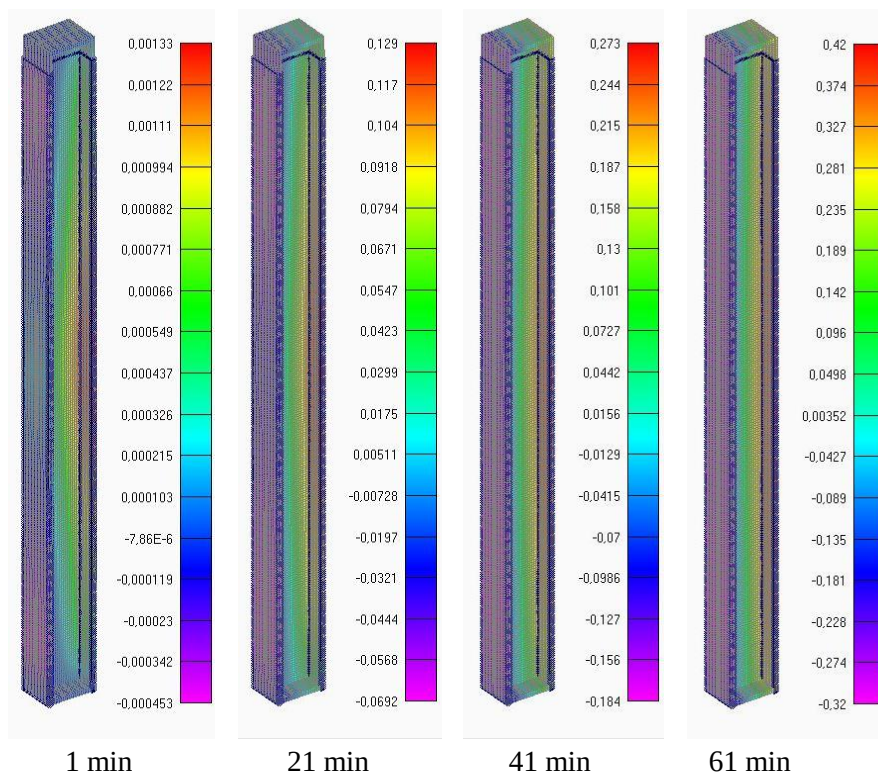


Slika 6.31 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 2, 4 min

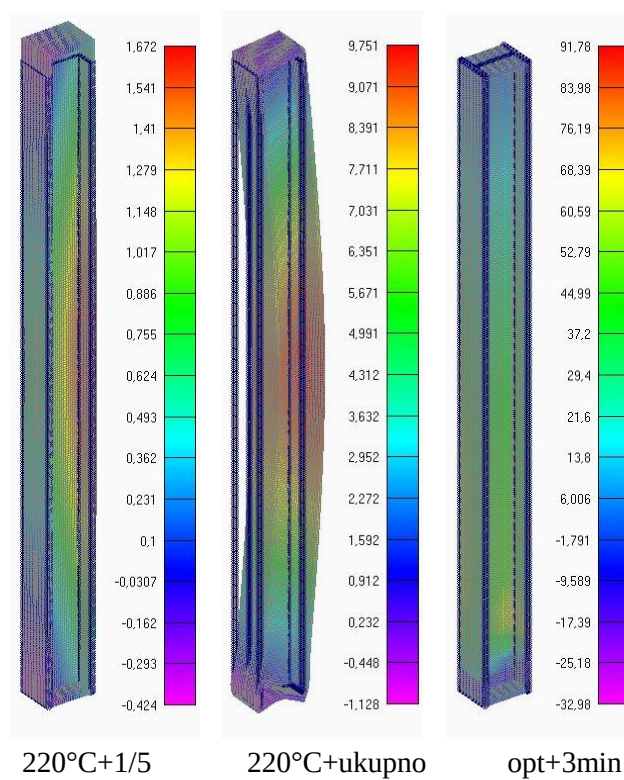
6.8 Rezultati za MODEL 1 – Test 4 – sa puzanjem

Test 4: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 220°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 573,4 kN, a poprečna iznosi 37,7 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

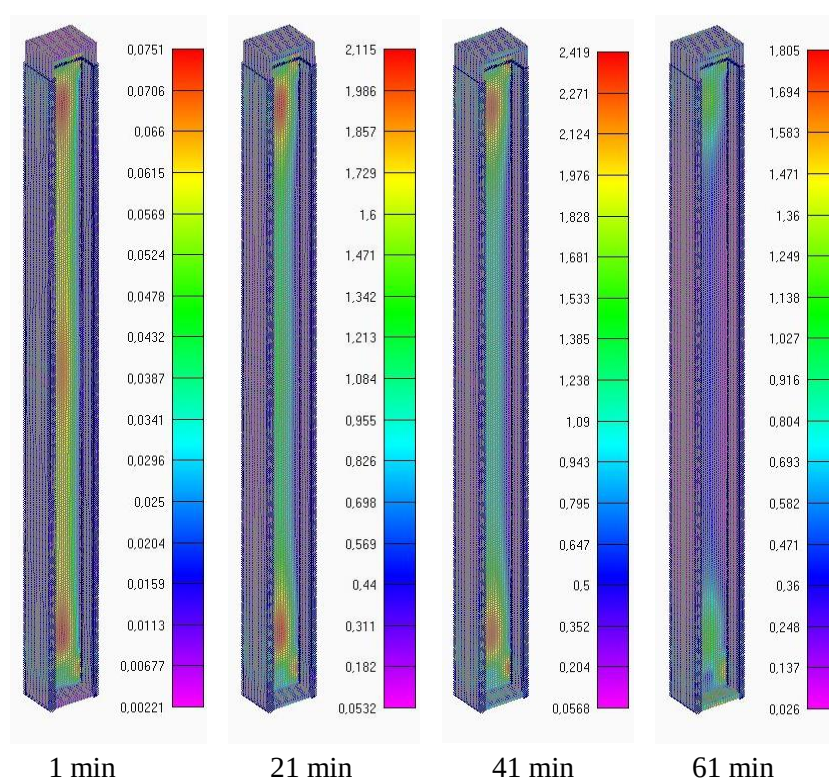


Slika 6.32 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

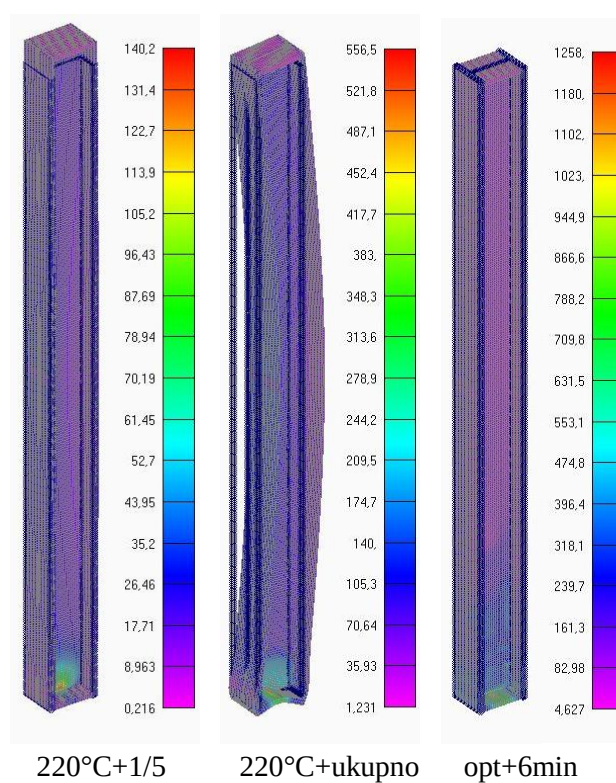


Slika 6.33 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 220°C i 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 3 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.34 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

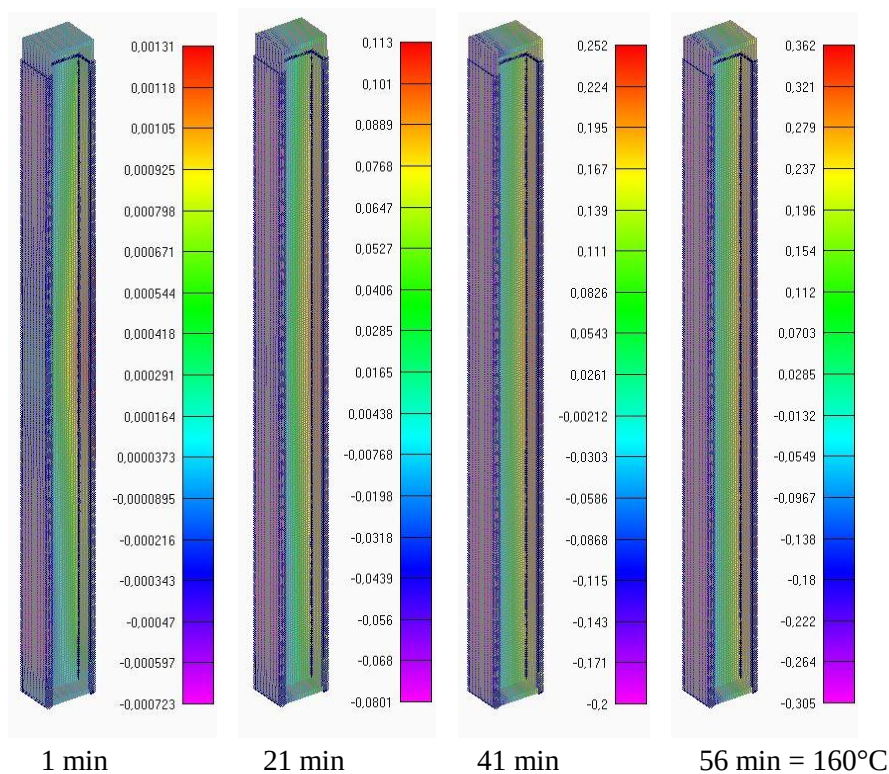


Slika 6.35 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6 min

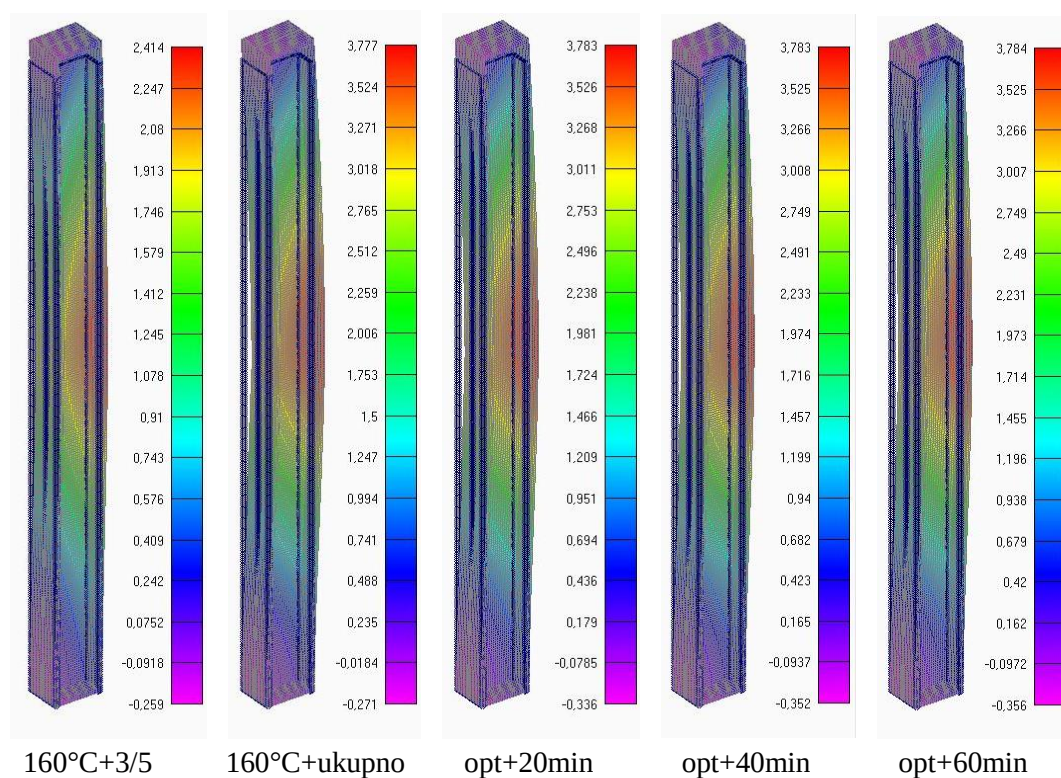
6.9 Rezultati za MODEL 2 – Test 1 – bez puzanja

Test 1: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 420,0 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

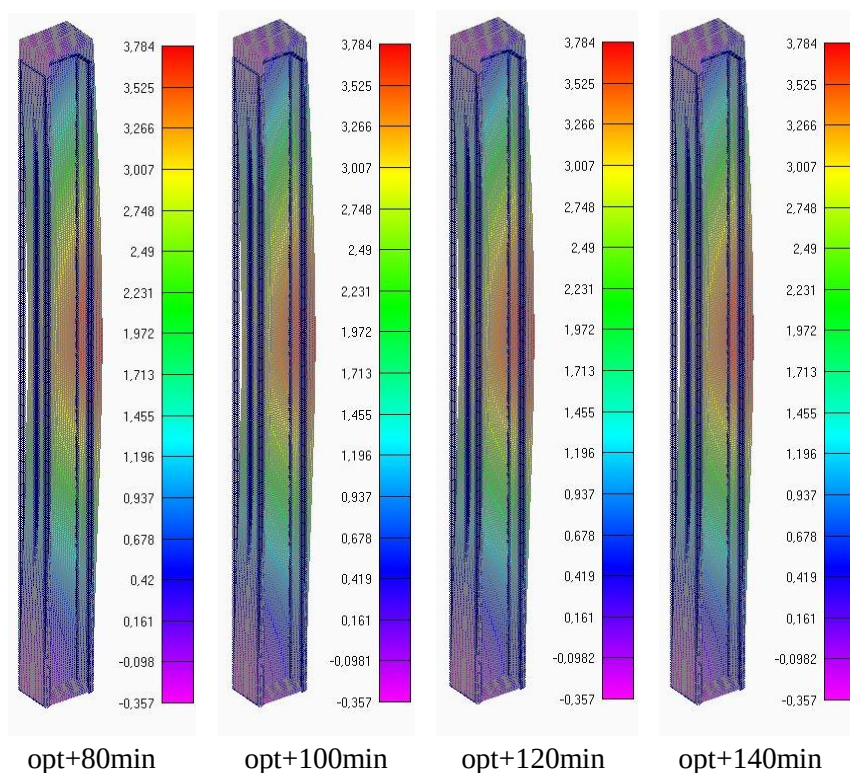
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.36 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

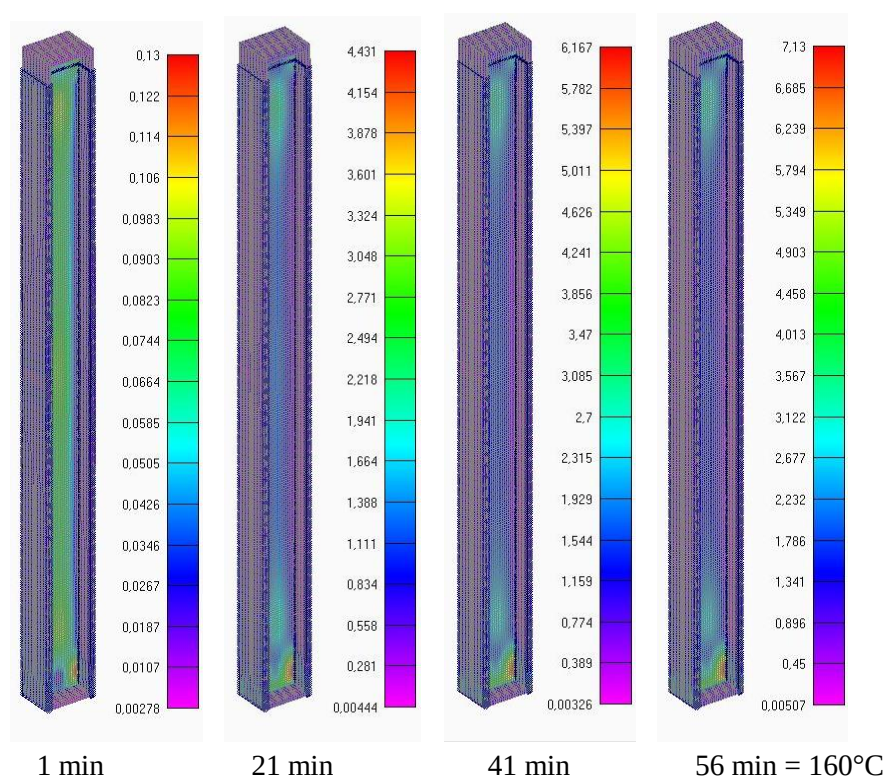


Slika 6.37 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

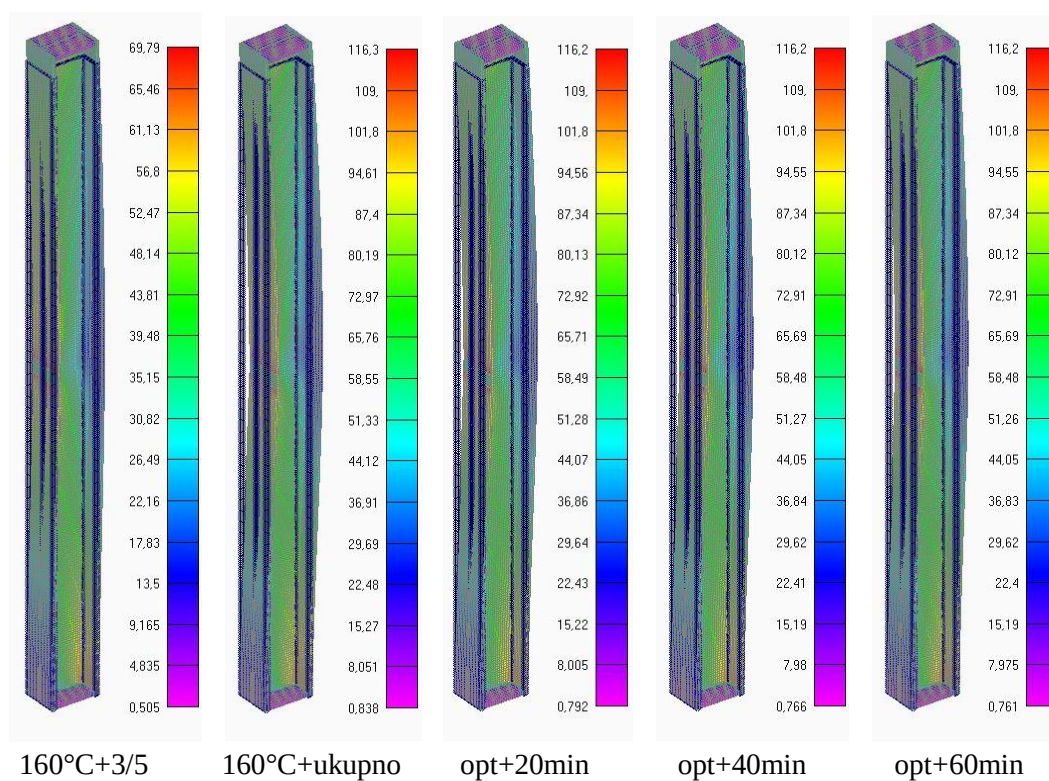


Slika 6.38 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 80, 100, 120, 140 min

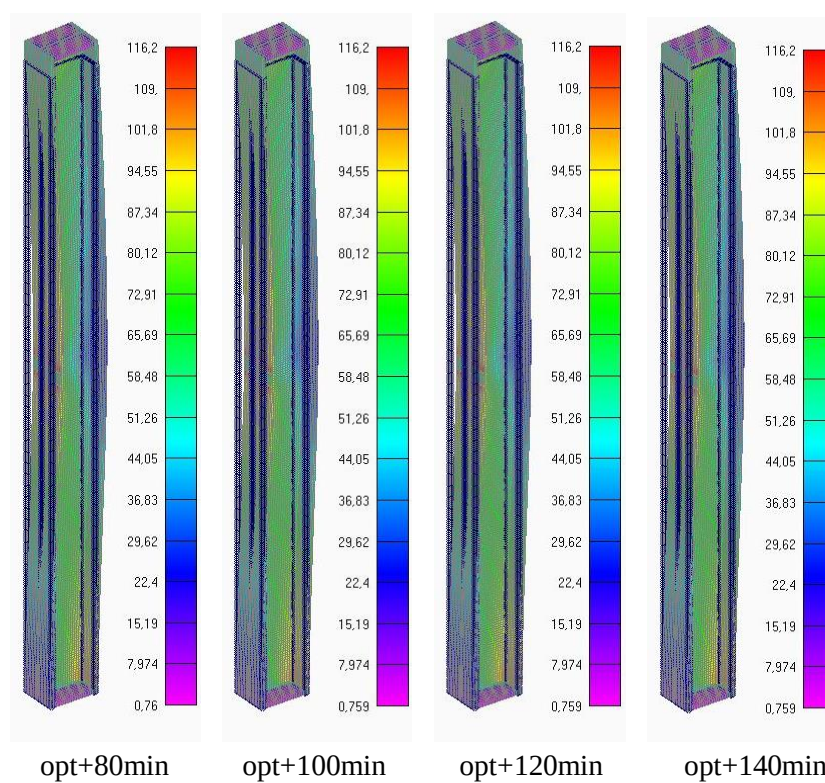
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.39 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 6.40 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

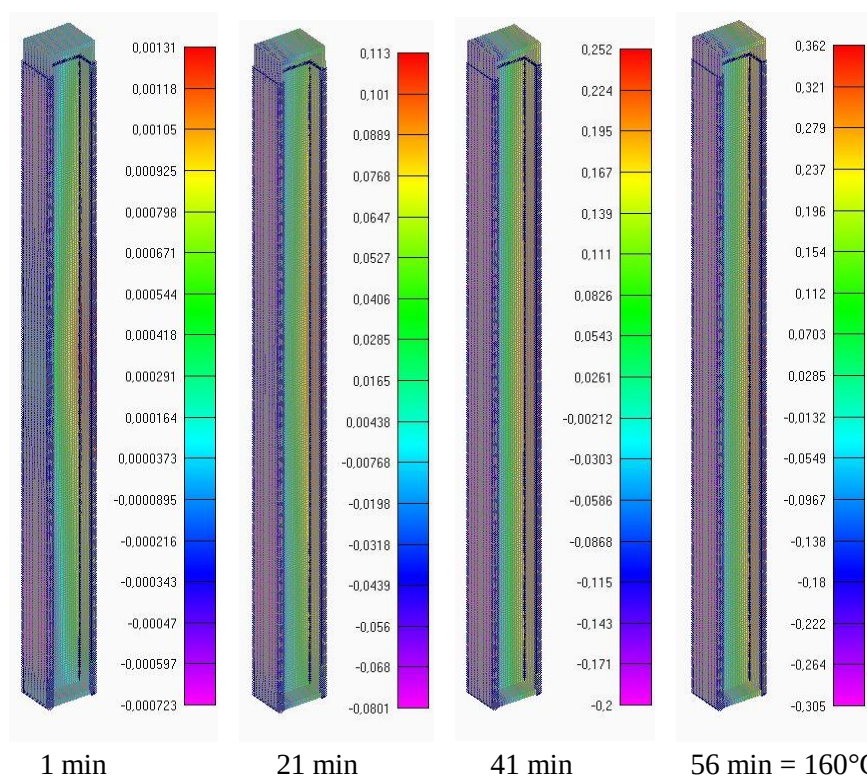


Slika 6.41 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°Ci ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 80, 100, 120, 140 min

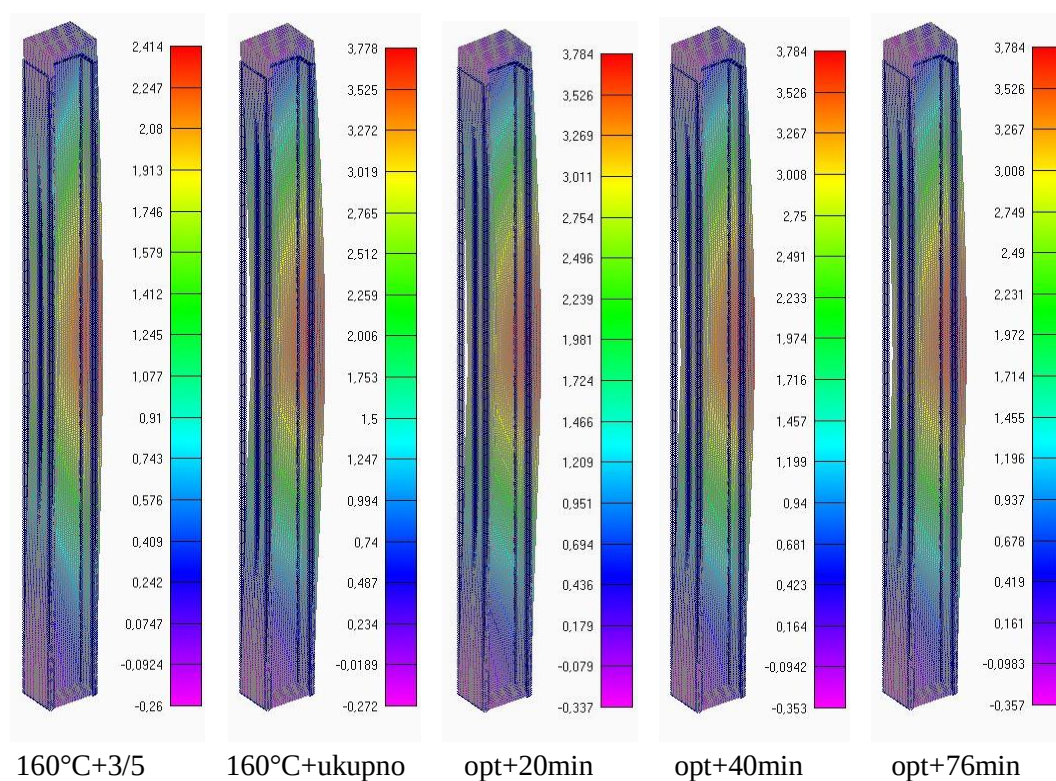
6.10 Rezultati za MODEL 2 – Test 2 – bez puzanja

Test 2: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sila u smjeru stupa iznosi $457,5\text{ kN}$, a poprečna iznosi $48,0\text{ kN}$. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

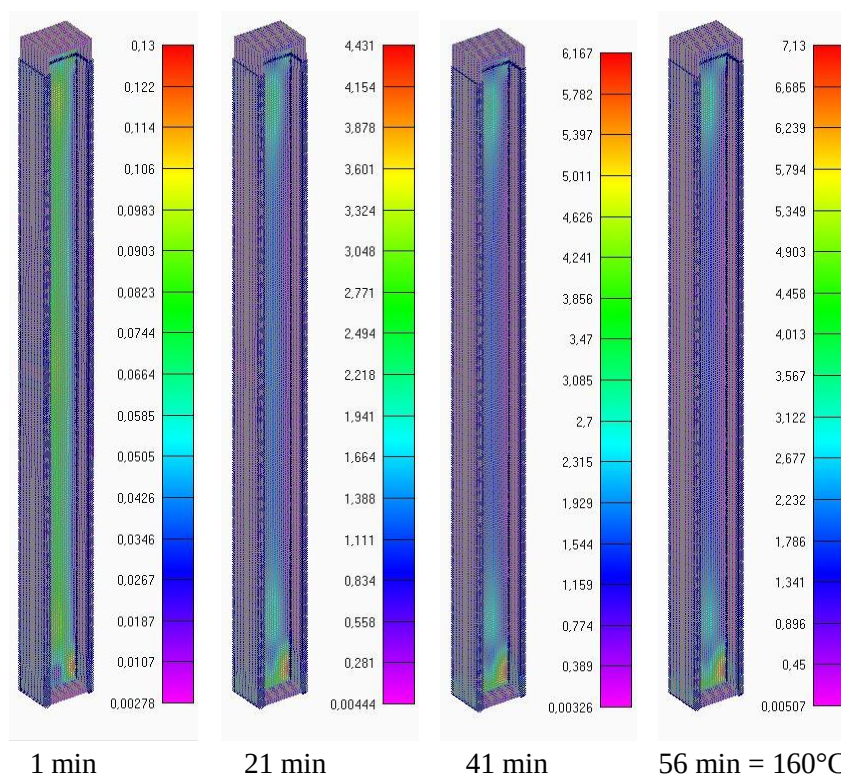


Slika 6.42 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

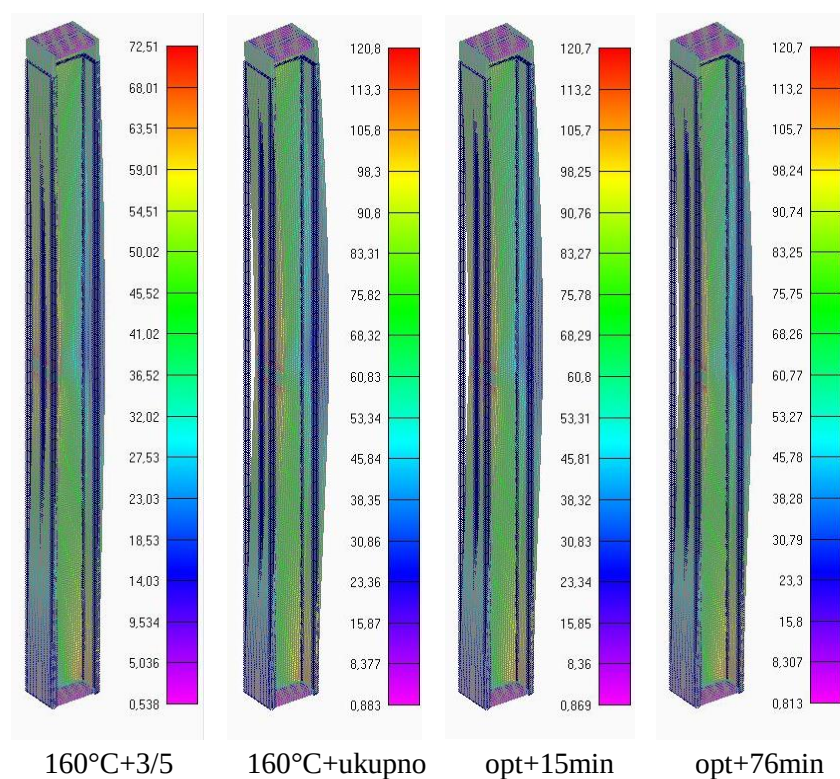


Slika 6.43 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 76 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.44 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

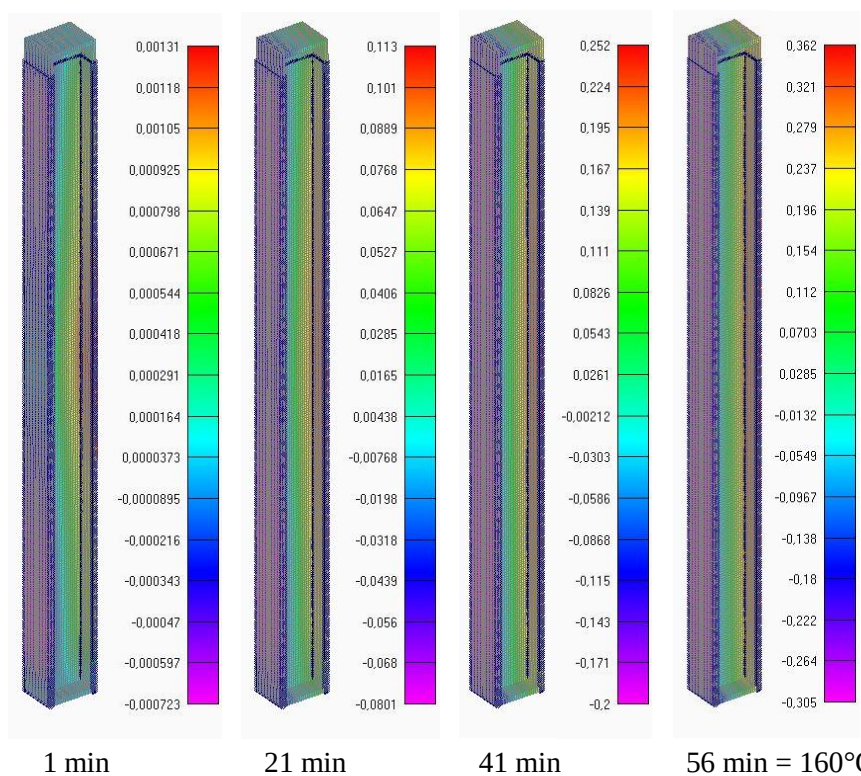


Slika 6.45 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 15, 76 min

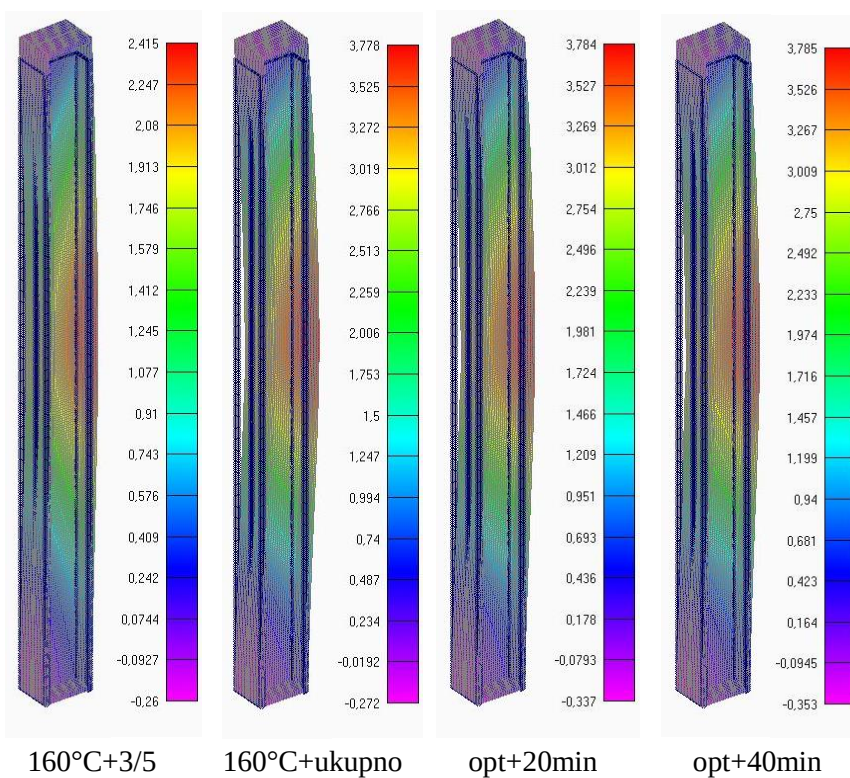
6.11 Rezultati za MODEL 2 – Test 3 – bez puzanja

Test 3: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 475,8 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



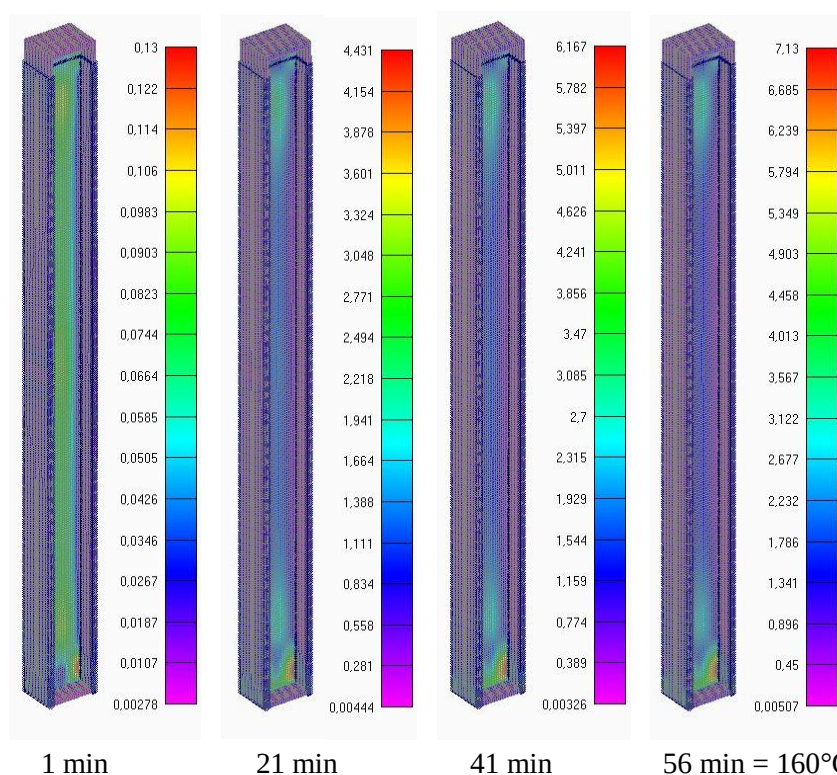
Slika 6.46 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



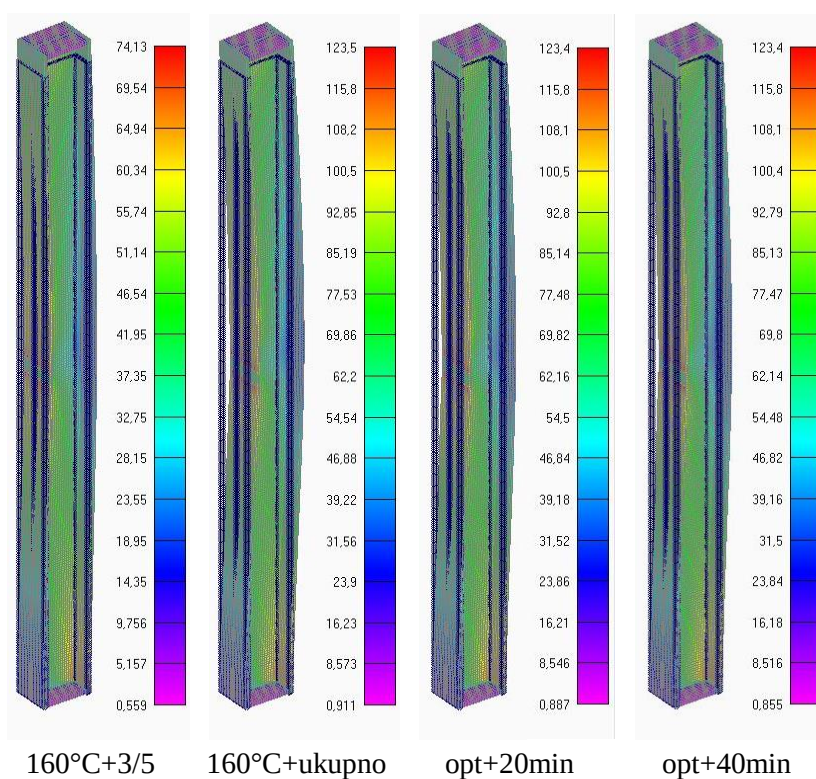
160°C+3/5 160°C+ukupno opt+20min opt+40min

Slika 6.47 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.48 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

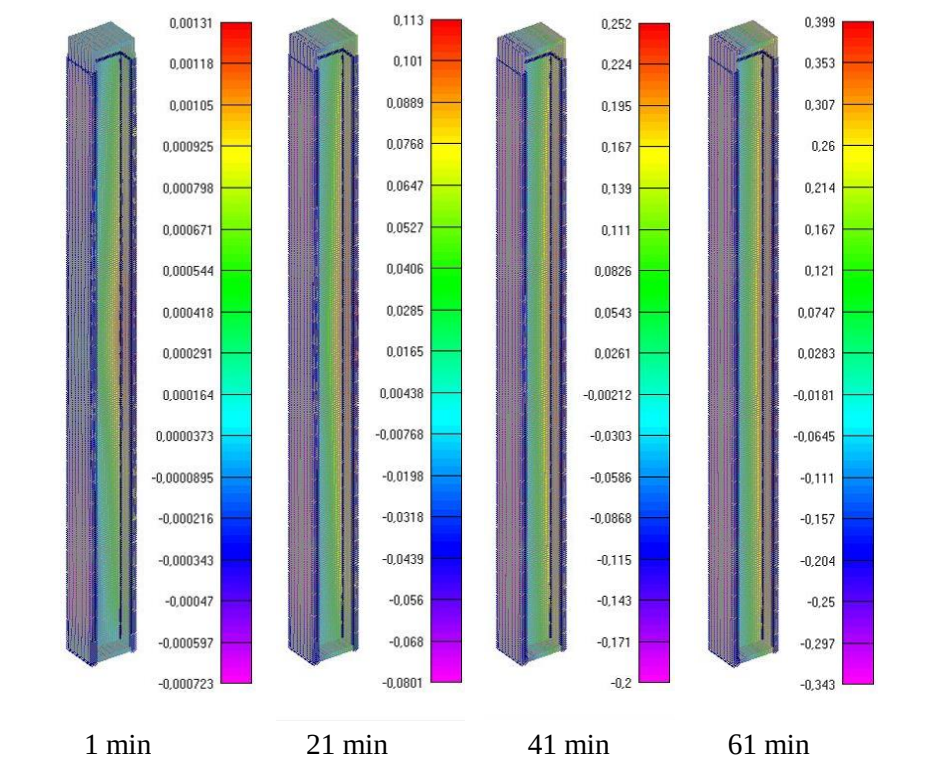


Slika 6.49 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40 min

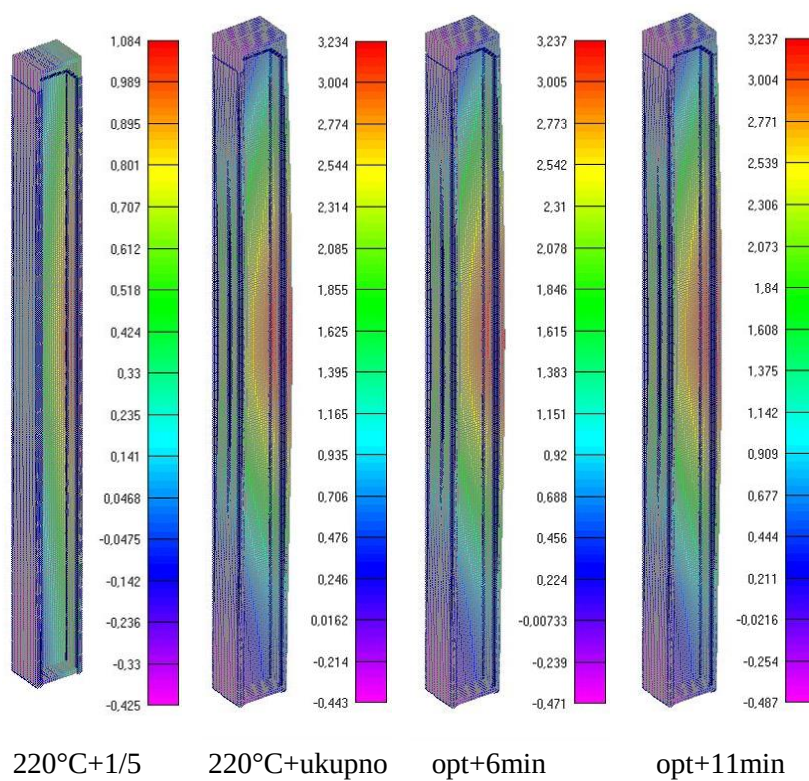
6.12 Rezultati za MODEL 2 – Test 4 – bez puzanja

Test 4: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 220°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 573,4 kN, a poprečna iznosi 37,7 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

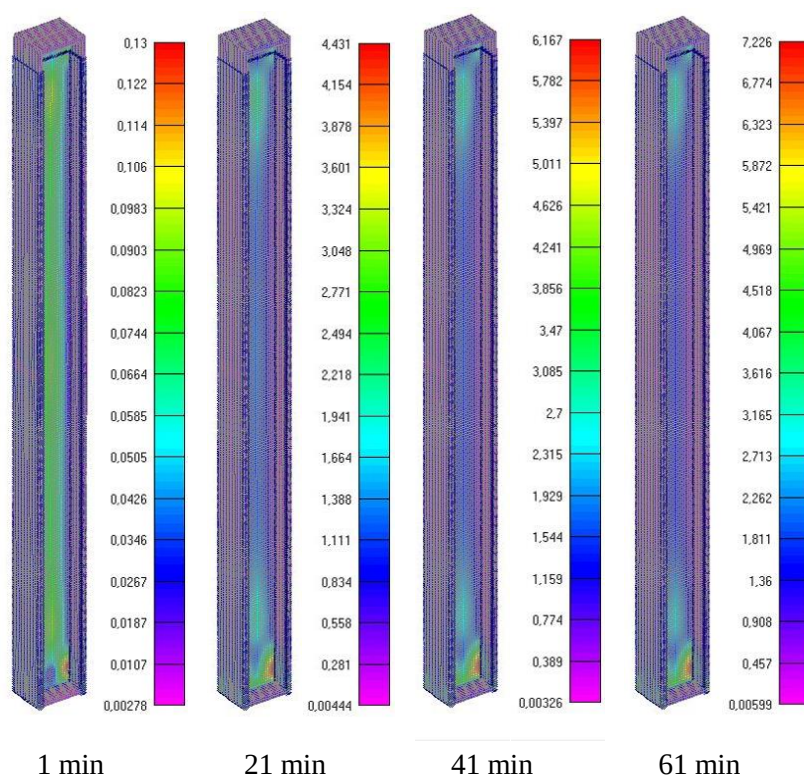


Slika 6.50 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

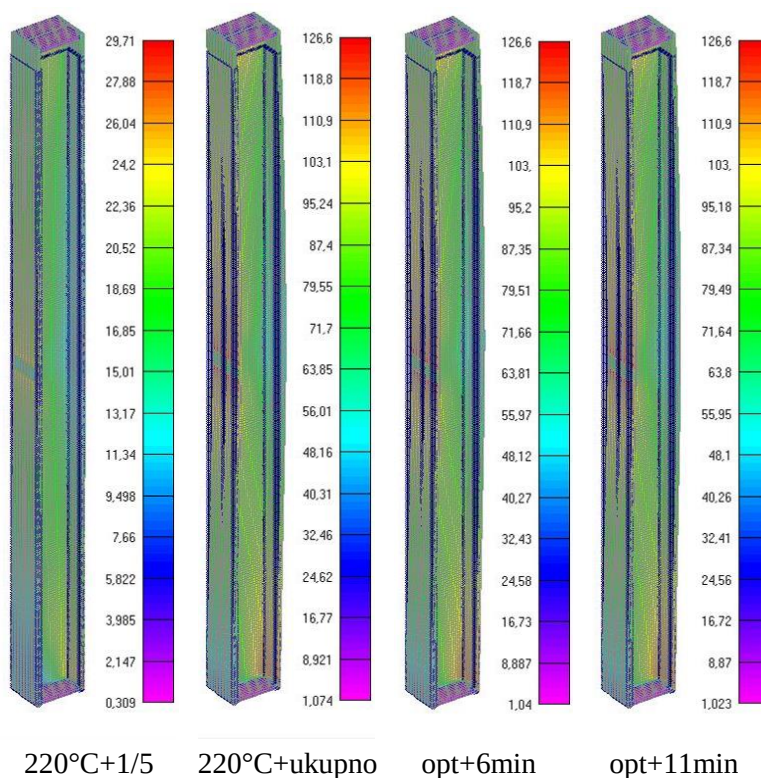


220°C+1/5 220°C+ukupno opt+6min opt+11min
 Slika 6.51 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6, 11 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.52 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

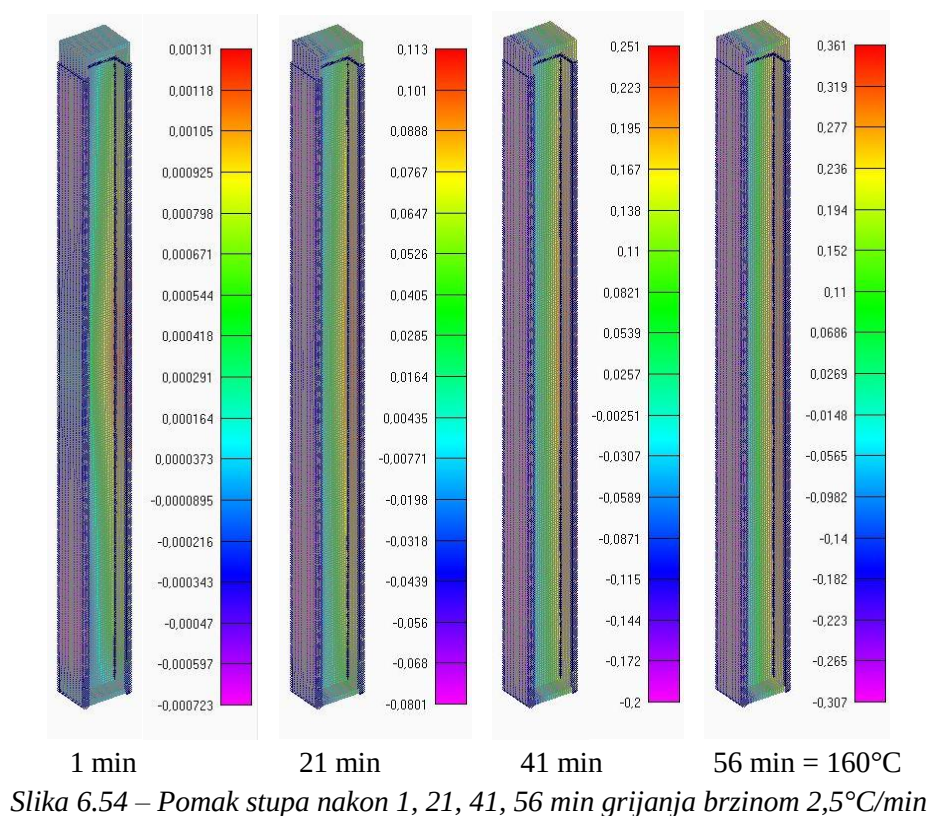


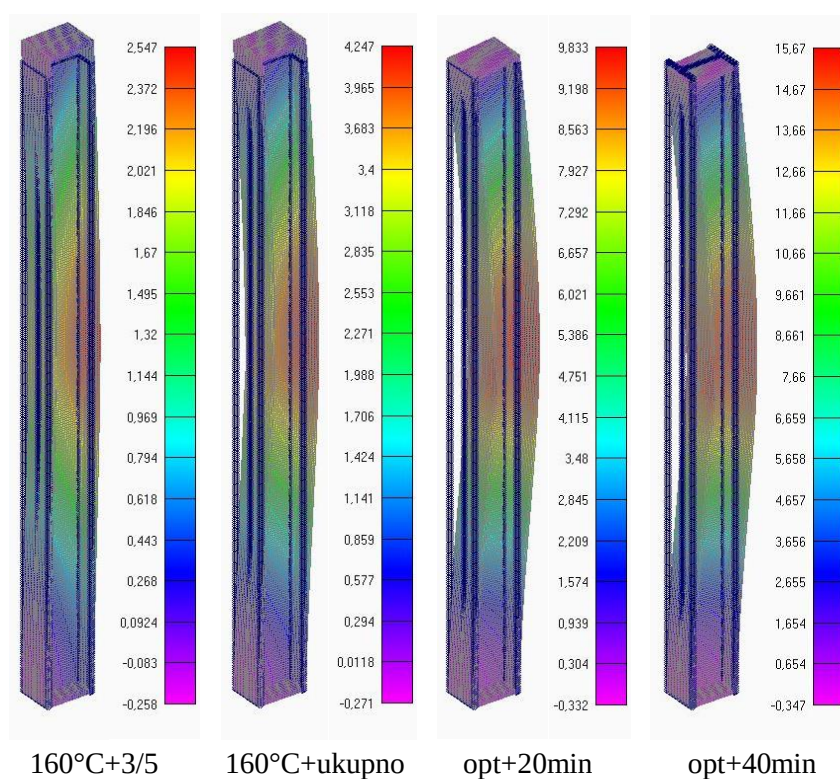
Slika 6.53 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6, 11 min

6.13 Rezultati za MODEL 2 – Test 1 – sa puzanjem

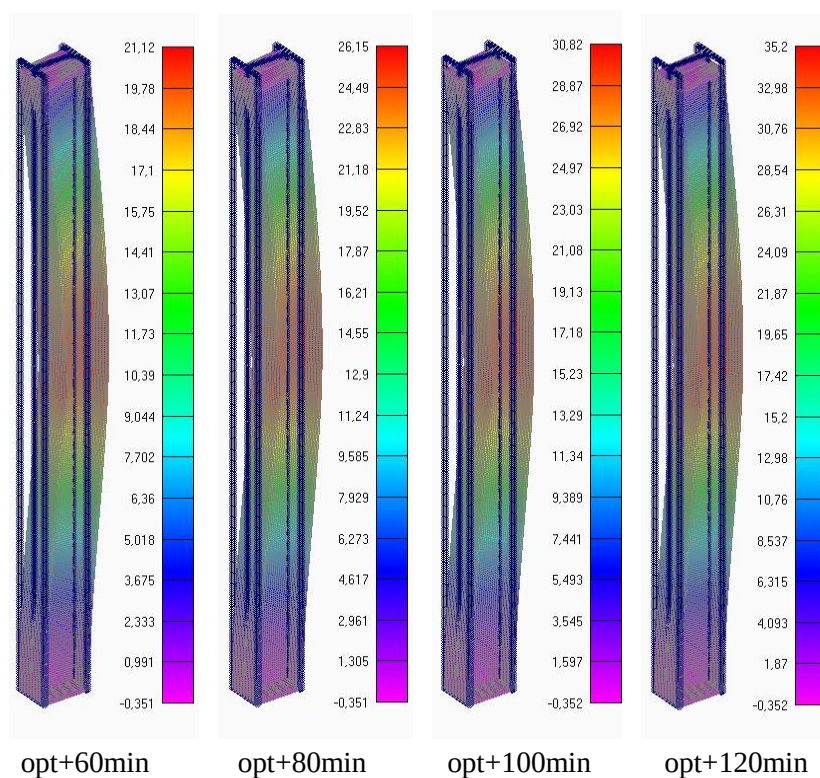
Test 1: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 420,0 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

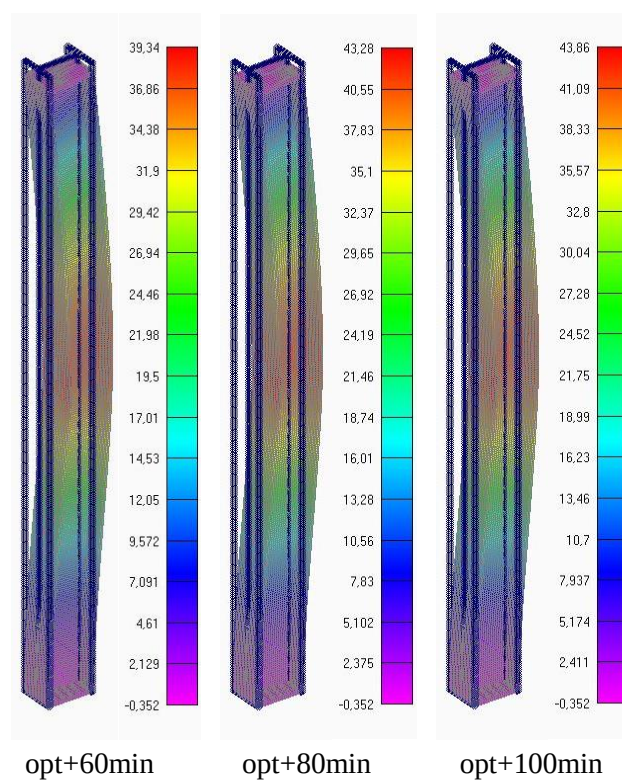




Slika 6.55 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40 min

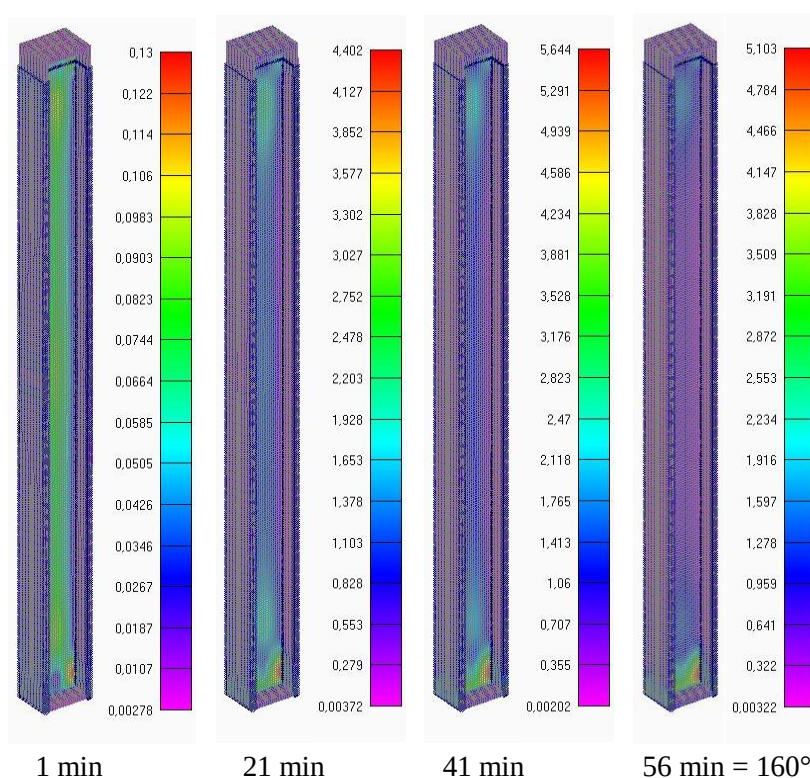


Slika 6.56 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°Ci ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 60, 80, 100, 120 min

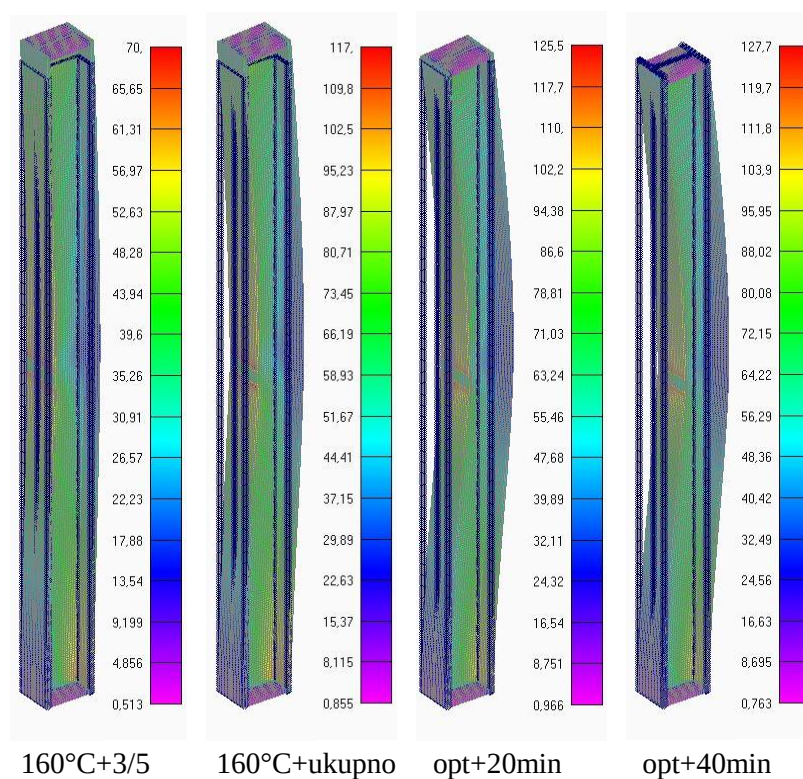


Slika 6.57 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 160°Ci ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 60, 80, 100 min

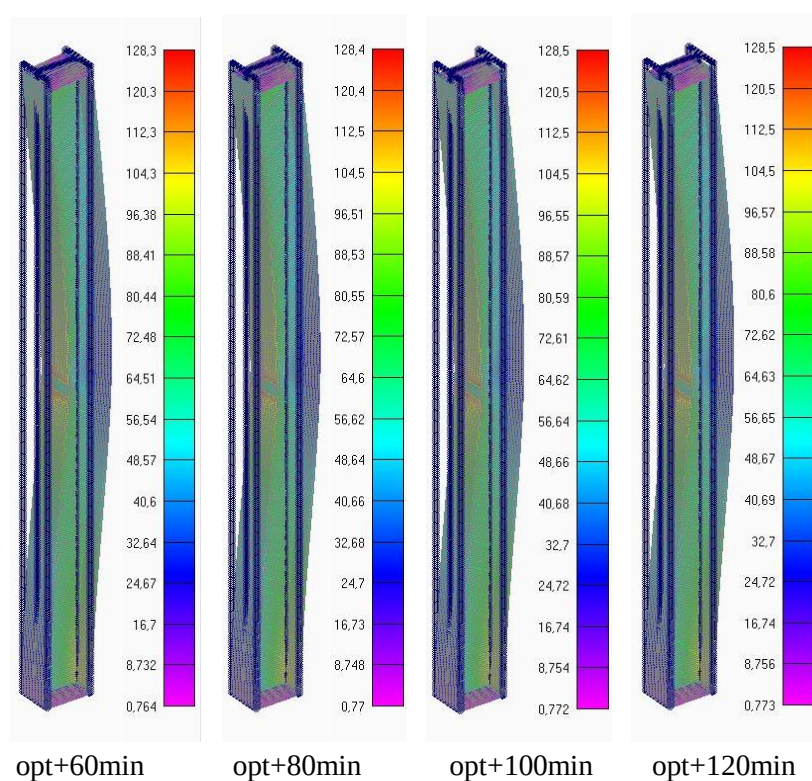
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



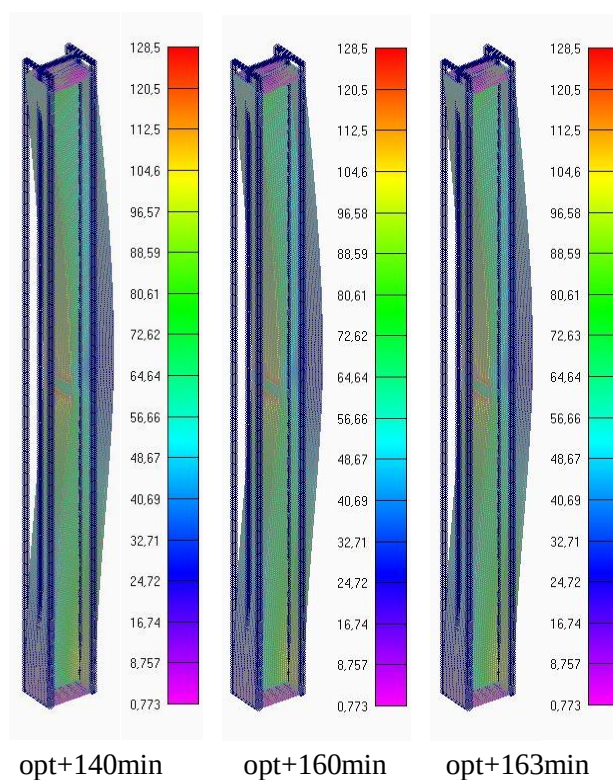
Slika 6.58 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 6.59 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40 min



Slika 6.60 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 60, 80, 100, 120 min

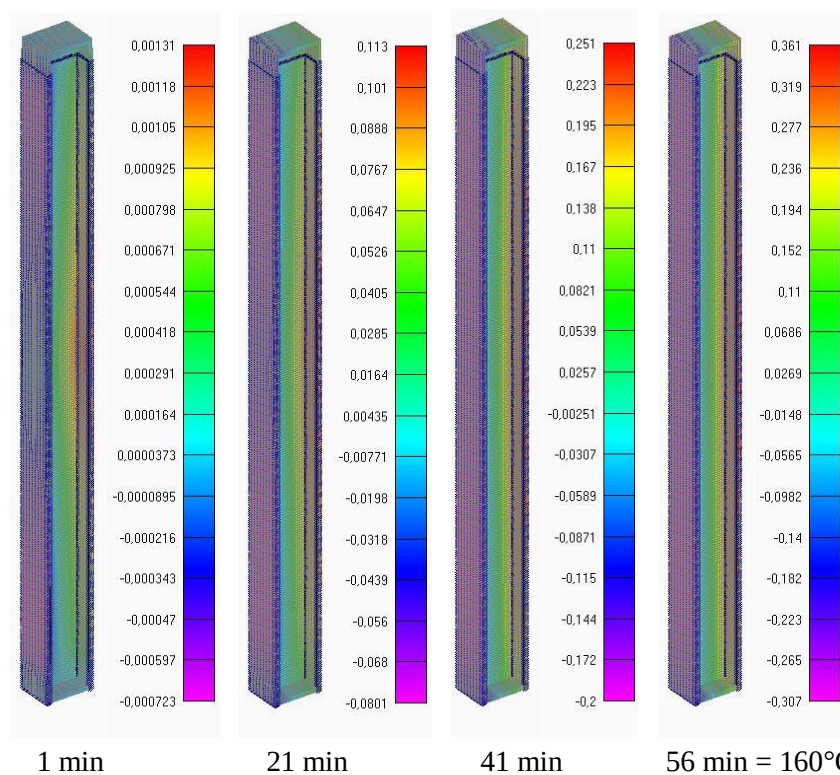


Slika 6.61 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 140, 160, 163 min

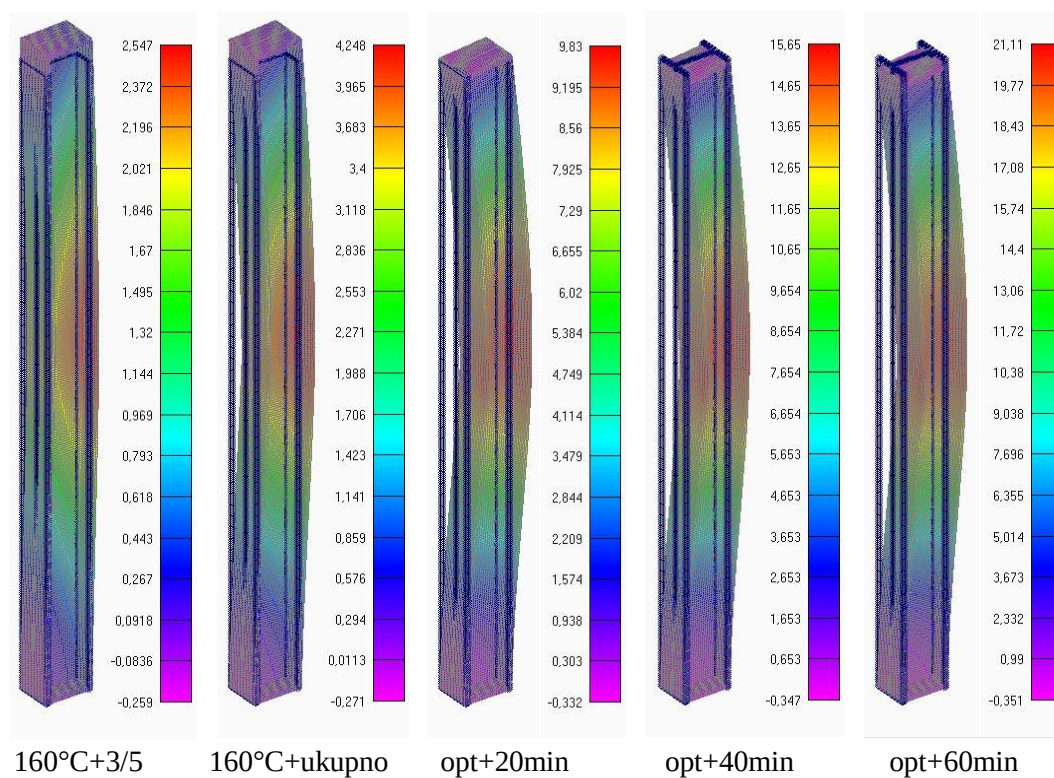
6.14 Rezultati za MODEL 2 – Test 2 – sa puzanjem

Test 2: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 457,5 kN, a poprečna iznosi 48,0 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

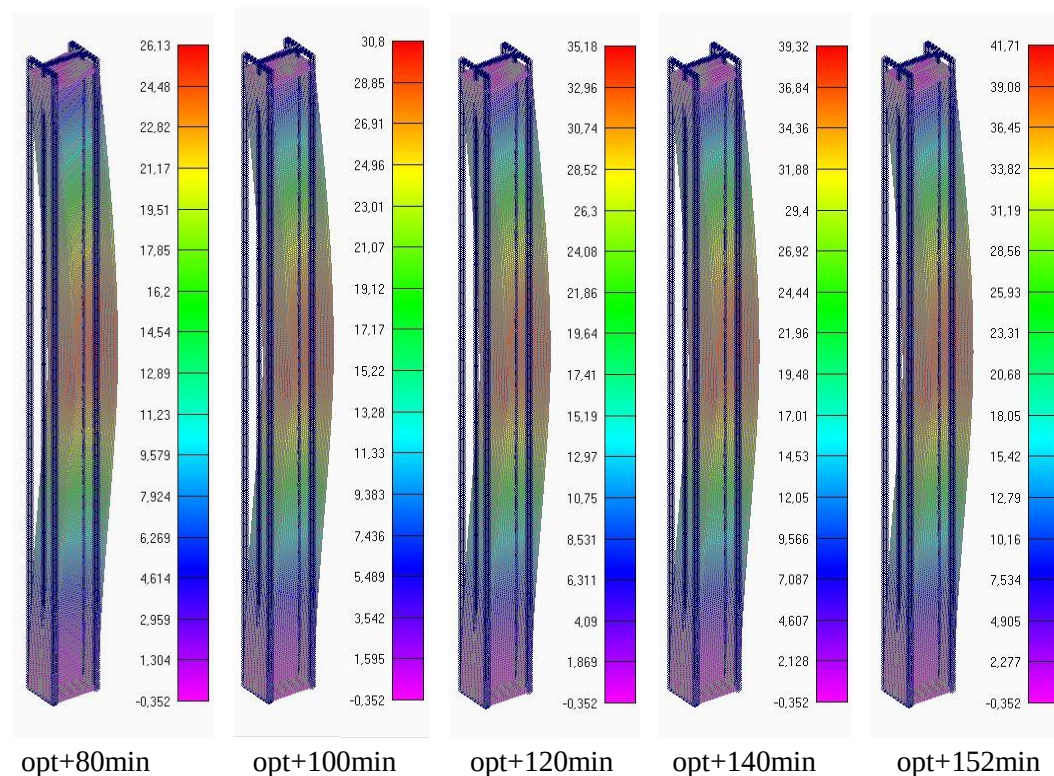
Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.62 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min

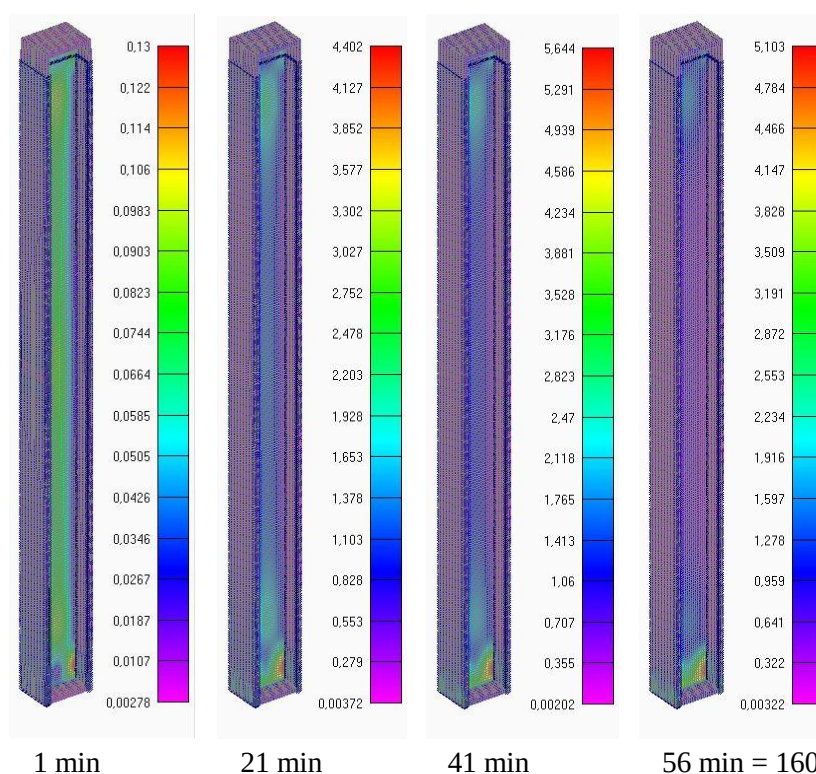


Slika 6.63 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

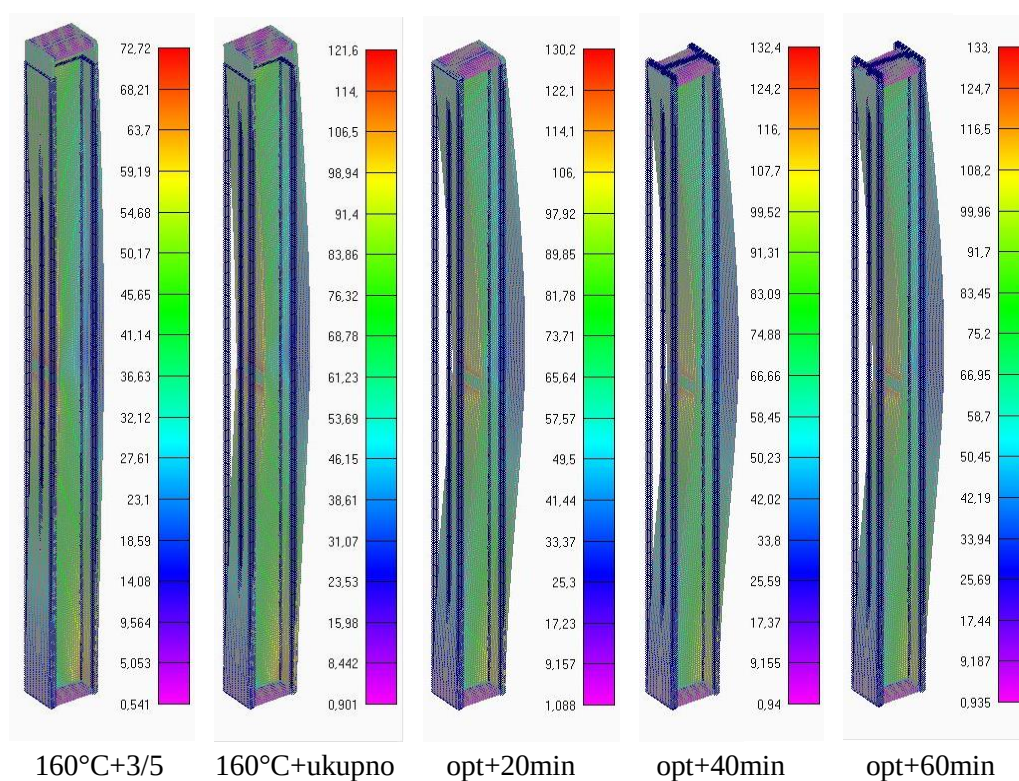


Slika 6.64 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 120, 140, 152 min

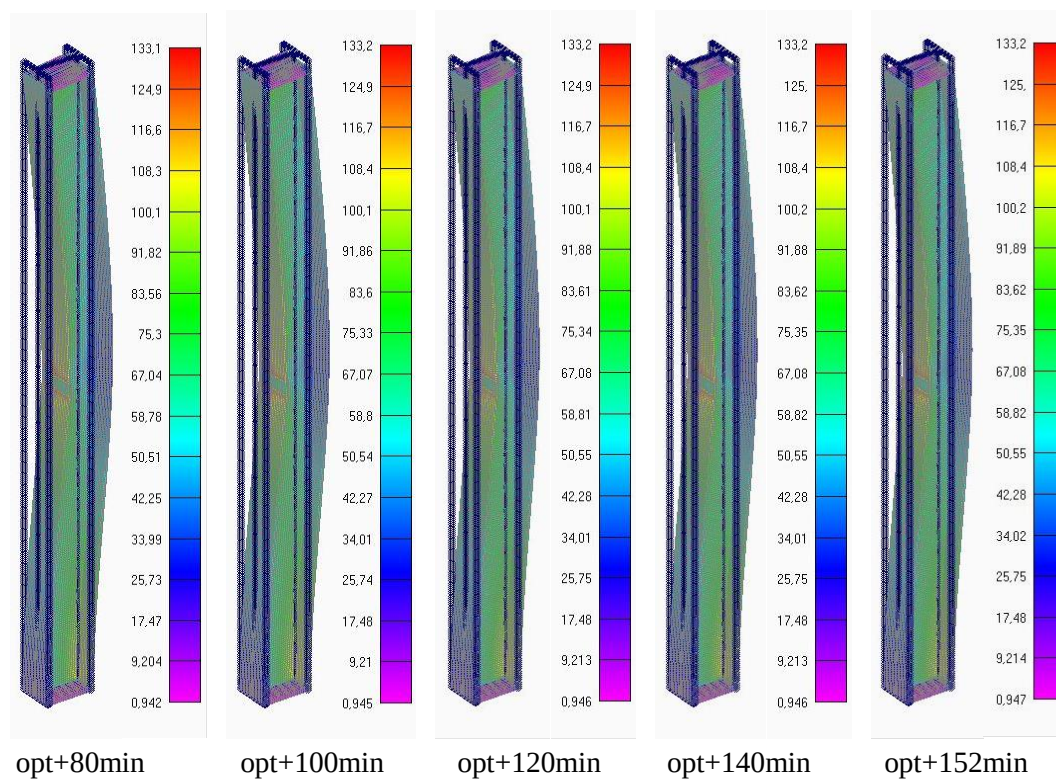
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.65 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 6.66 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 160°Ci 3/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60 min

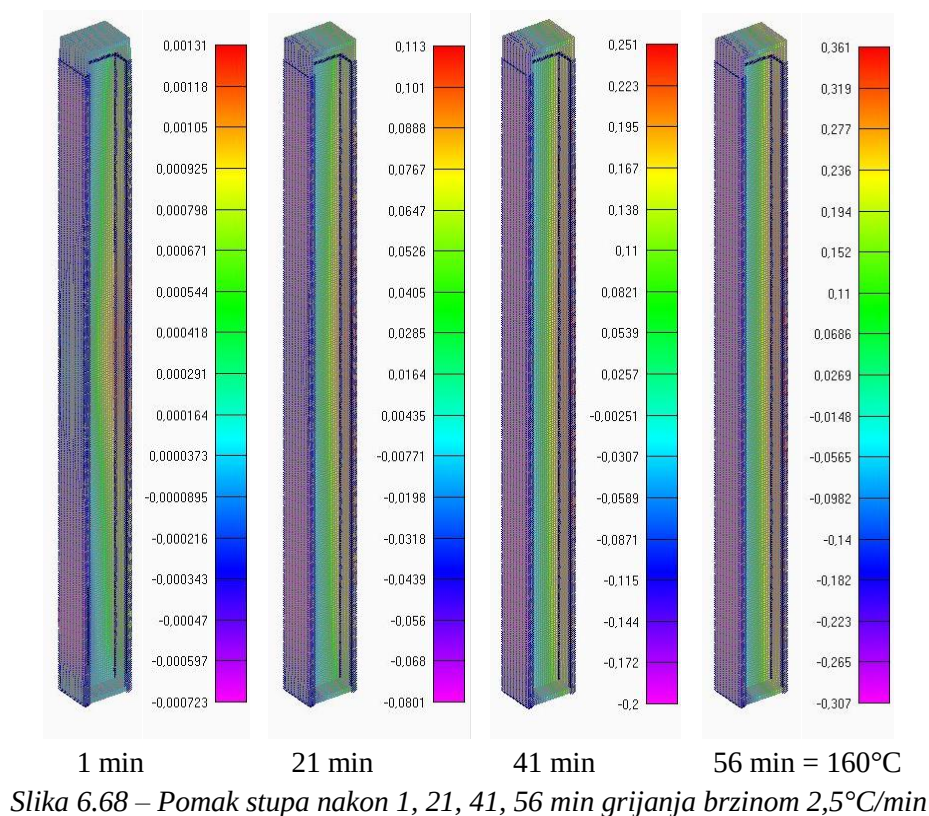


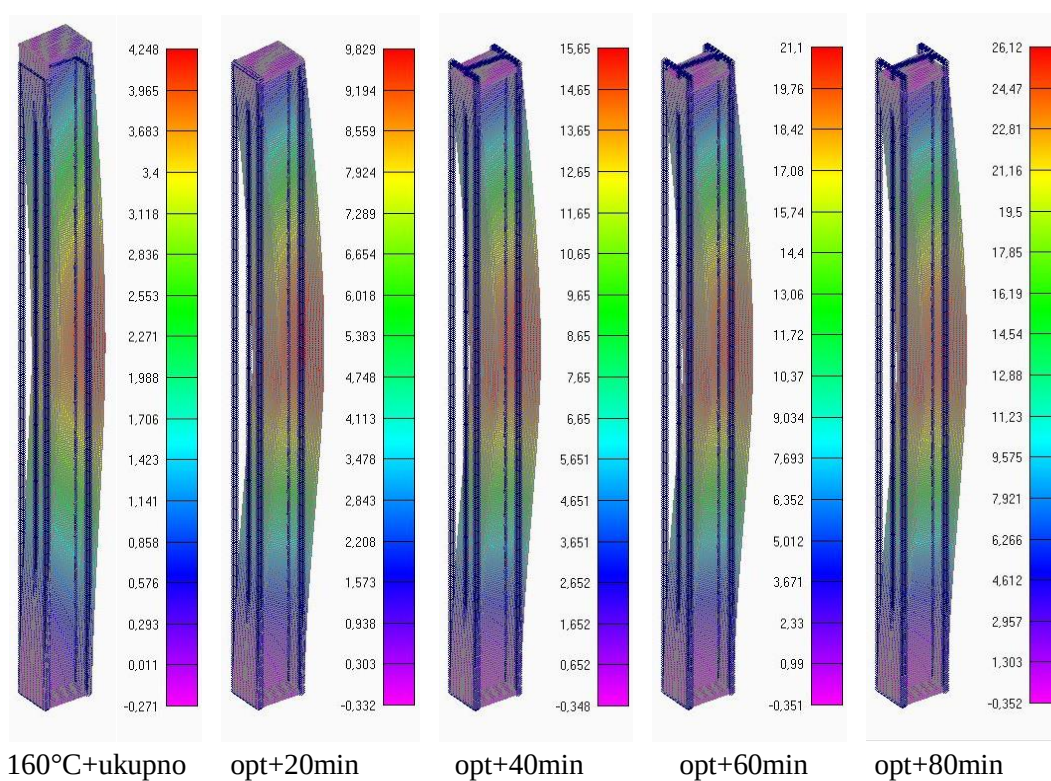
Slika 6.67 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 80, 100, 140, 152min

6.15 Rezultati za MODEL 2 – Test 3 – sa puzanjem

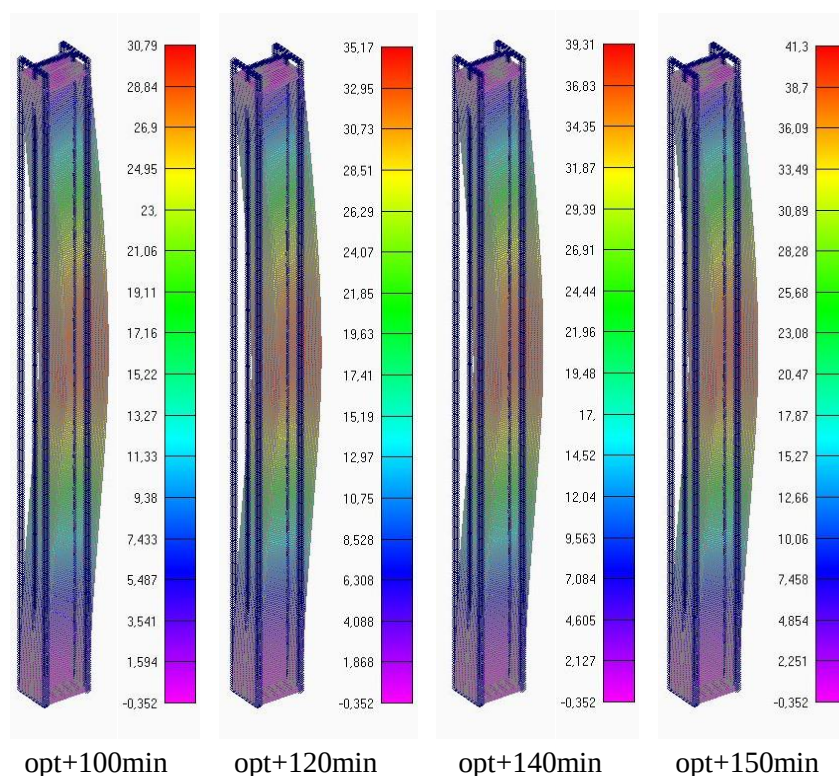
Test 3: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 160°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je $2,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Sila u smjeru stupa iznosi $475,8\text{ kN}$, a poprečna iznosi $48,0\text{ kN}$. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



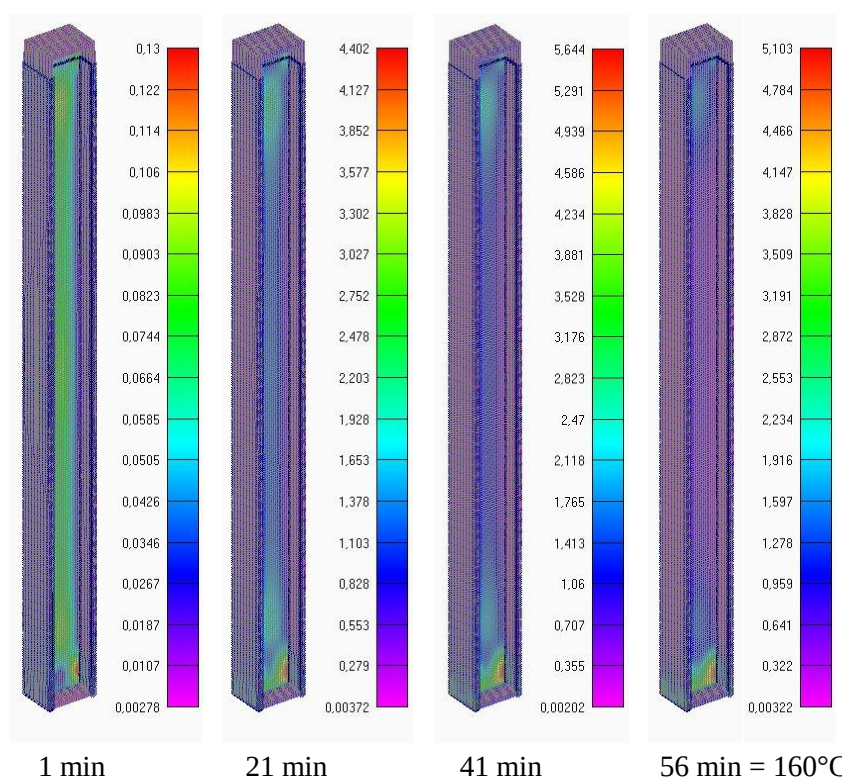


Slika 6.69 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60, 80 min

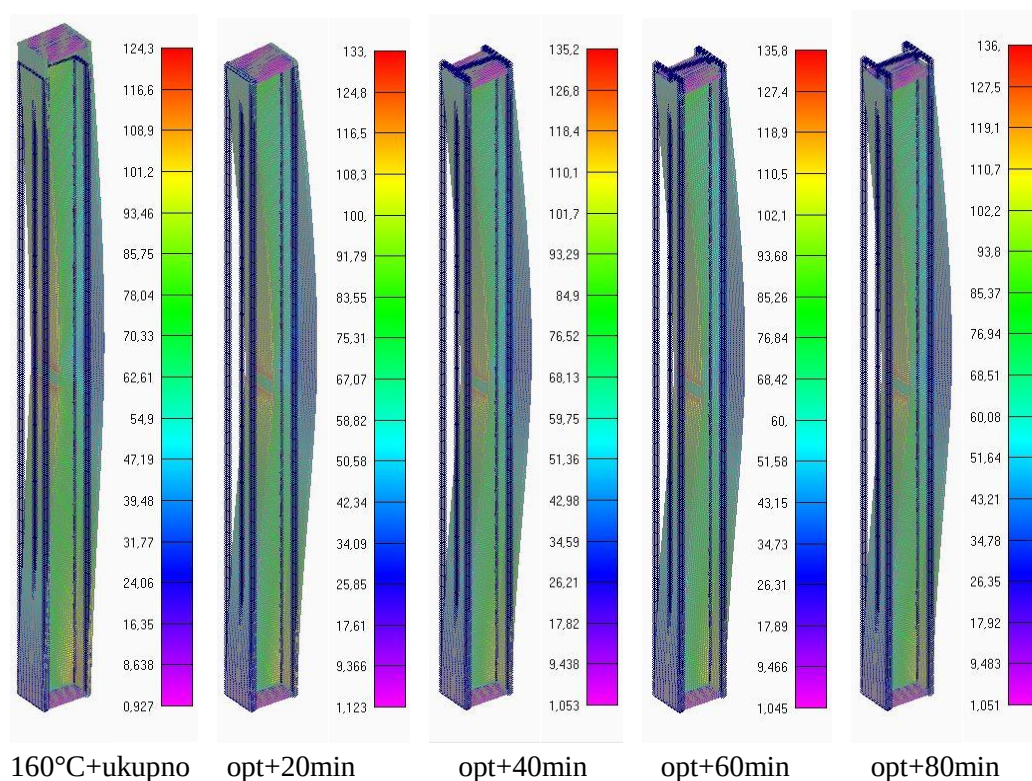


Slika 6.70 – Pomak stupa nakon dosegnete temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 100, 120, 140, 150 min

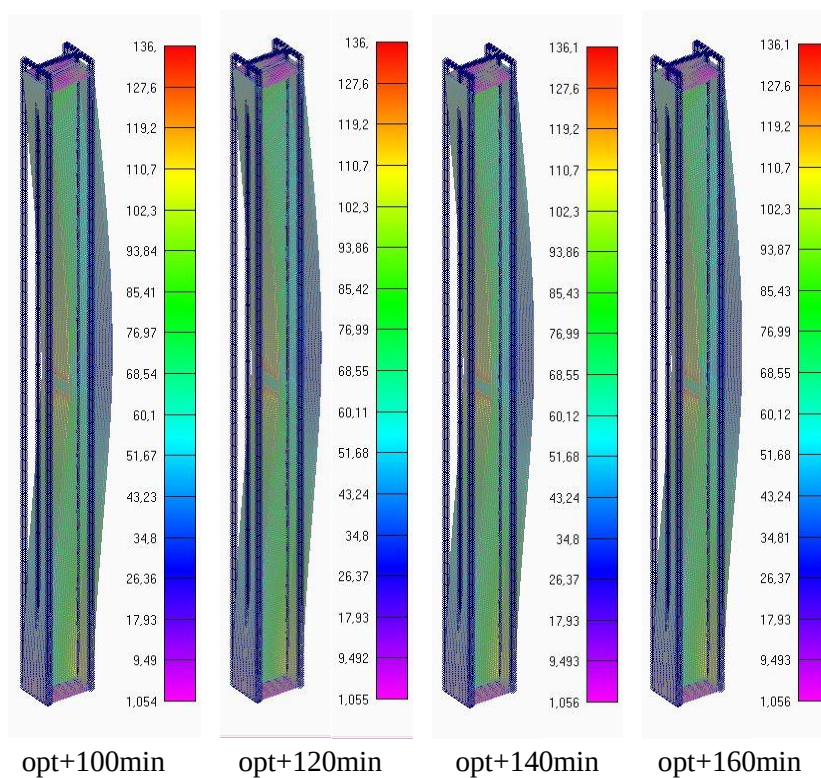
Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.71 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 56 min grijanja brzinom 2,5°C/min



Slika 6.72 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60, 80 min

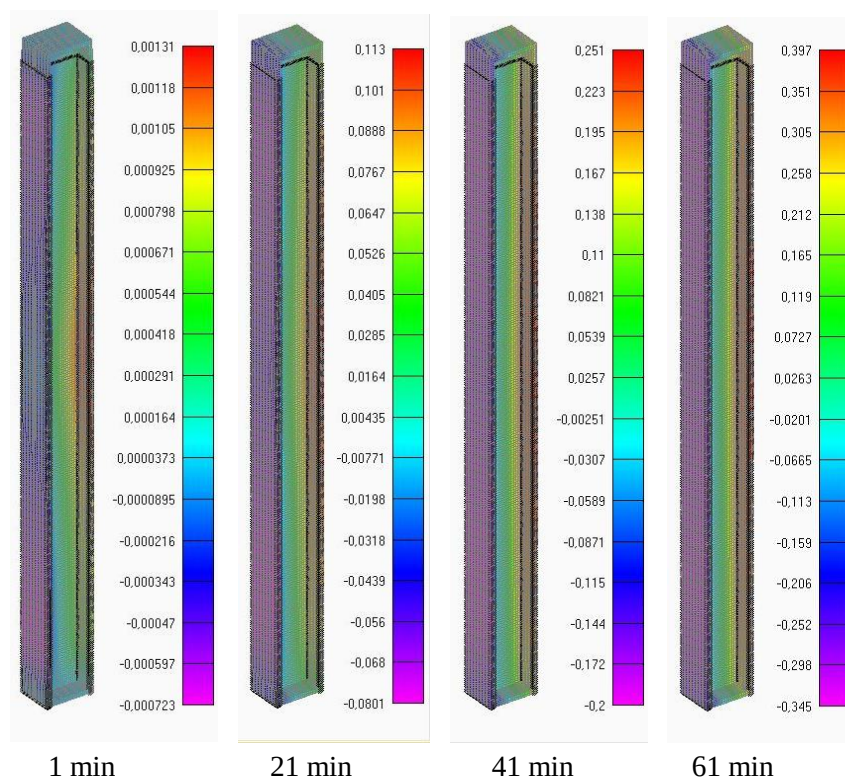


Slika 6.73 – Naprezanje u stupu nakon dosegnute temperature od 160°C i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 20, 40, 60, 80 min

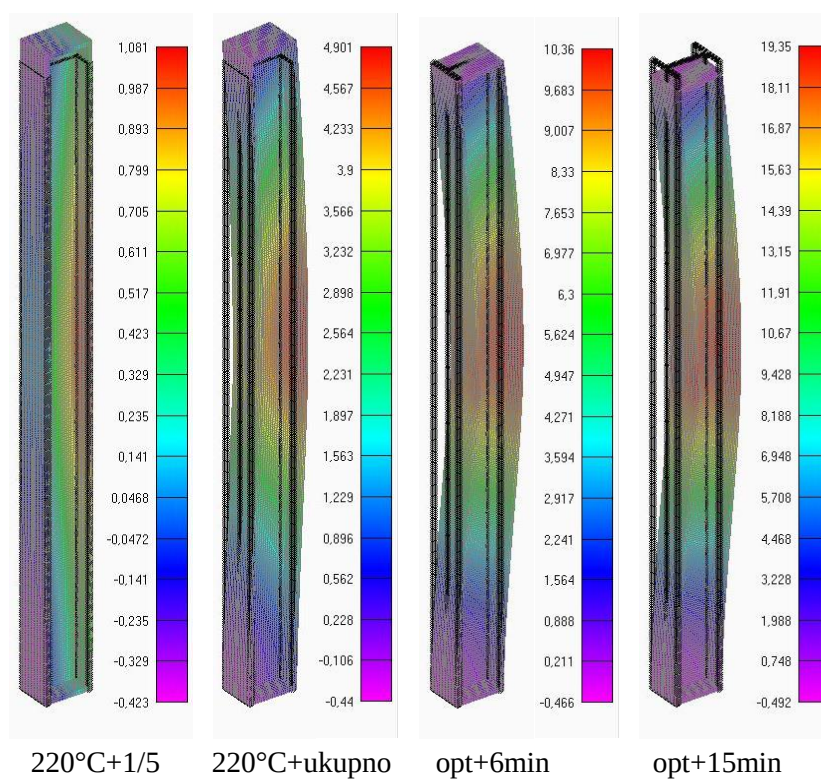
6.16 Rezultati za MODEL 2 – Test 4 – sa puzanjem

Test 4: Aluminijski stup se zagrijava do temperature od 220°C te se dalje održava ta temperatura. Brzina zagrijavanja je 2,5°C/min. Sila u smjeru stupa iznosi 573,4 kN, a poprečna iznosi 37,7 kN. Cilj je odrediti vrijeme potrebno do popuštanja stupa nakon nanošenja ukupnog opterećenja.

Prikaz pomaka stupa uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:

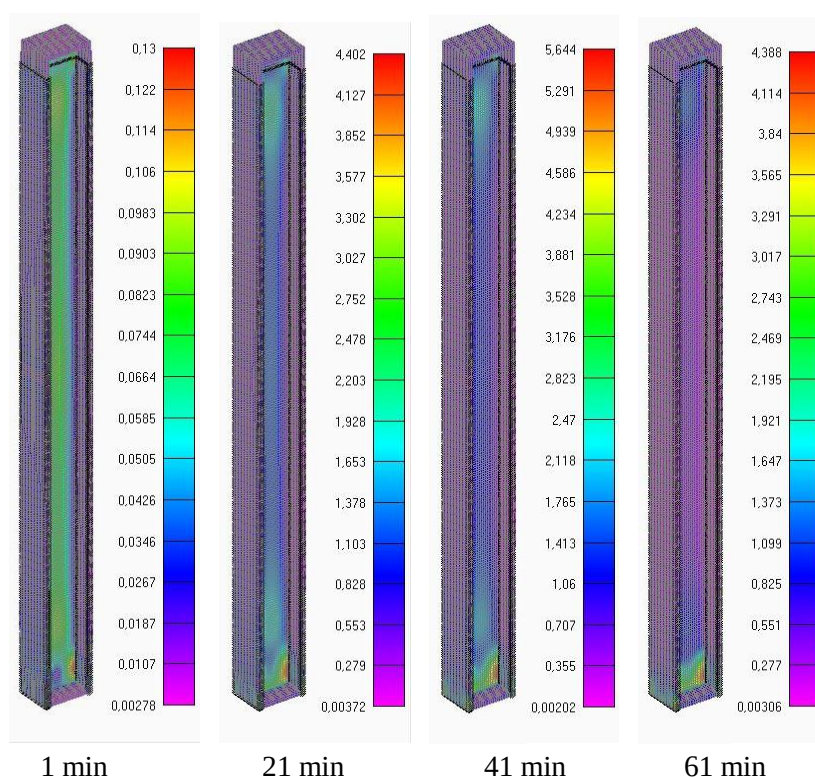


Slika 6.74 – Pomak stupa nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

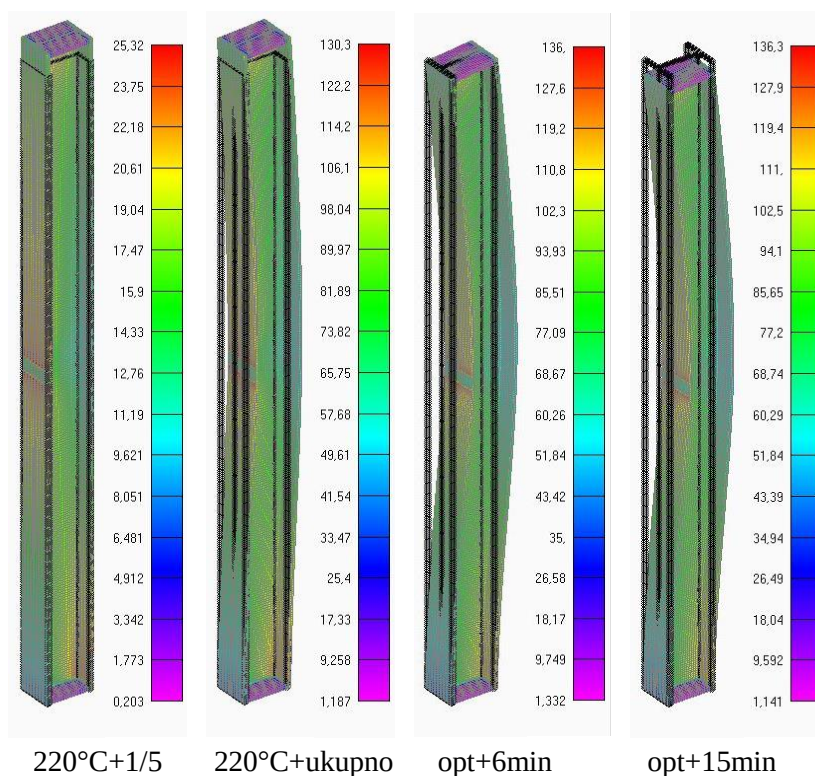


Slika 6.75 – Pomak stupa nakon dosegnute temperature od 220°C i 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6, 15 min

Prikaz naprezanja u stupu uslijed svih zadanih opterećenja u različitim vremenskim intervalima:



Slika 6.76 – Naprezanje u stupu nakon 1, 21, 41, 61 min grijanja brzinom 2,5°C/min

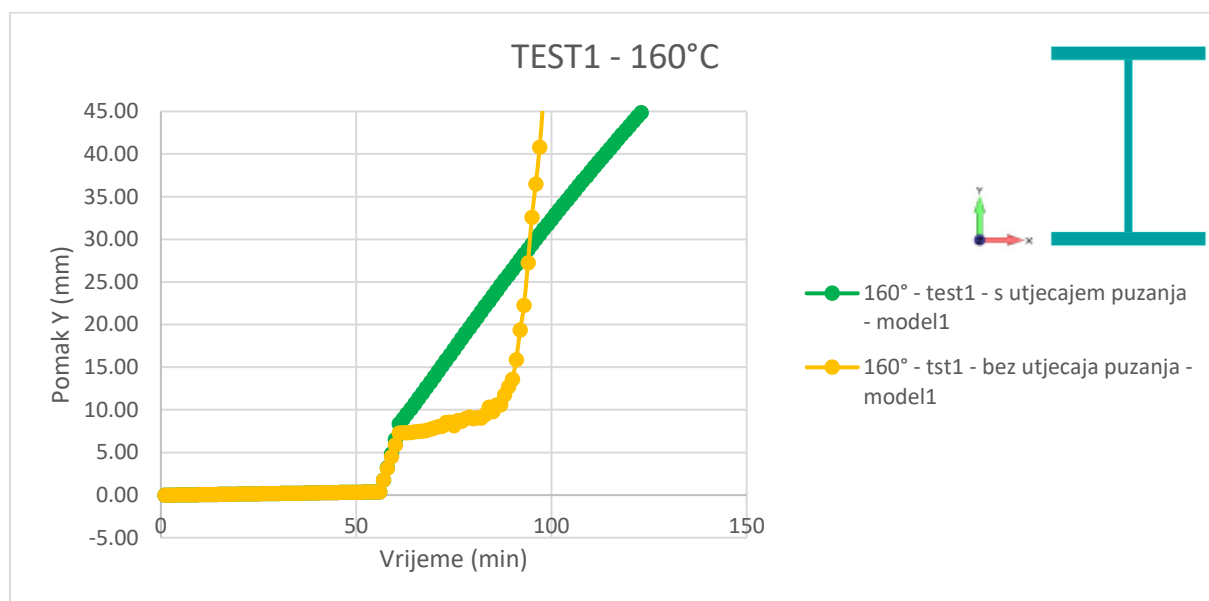


Slika 6.77 – Naprezanje u stupu nakon dosegnete temperature od 220°Ci 1/5 i ukupnog nanesenog opterećenja te zatim grijanja u vremenu od 6, 15 min

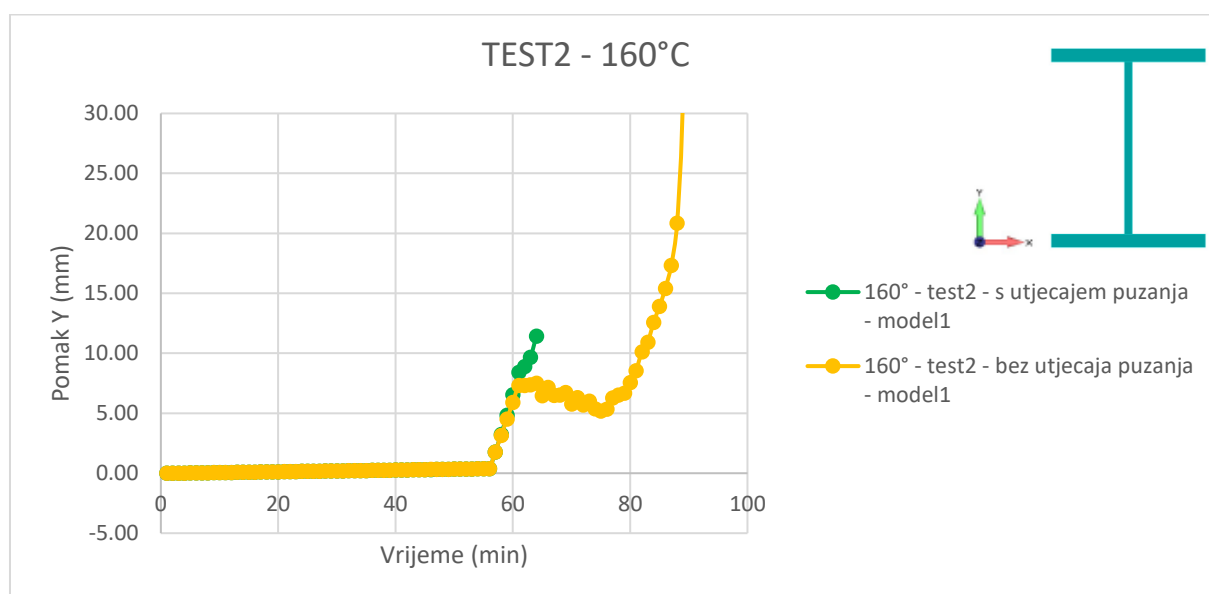
7 USPOREDBA REZULTATA ZA STACIONARNE SIMULACIJE

U sljedećim grafovima prikazan je utjecaj puzanja na aluminijski stup. Proveden je proračun sa utjecajem i bez utjecaja puzanja u ovisnosti o temperaturi i vremenu.

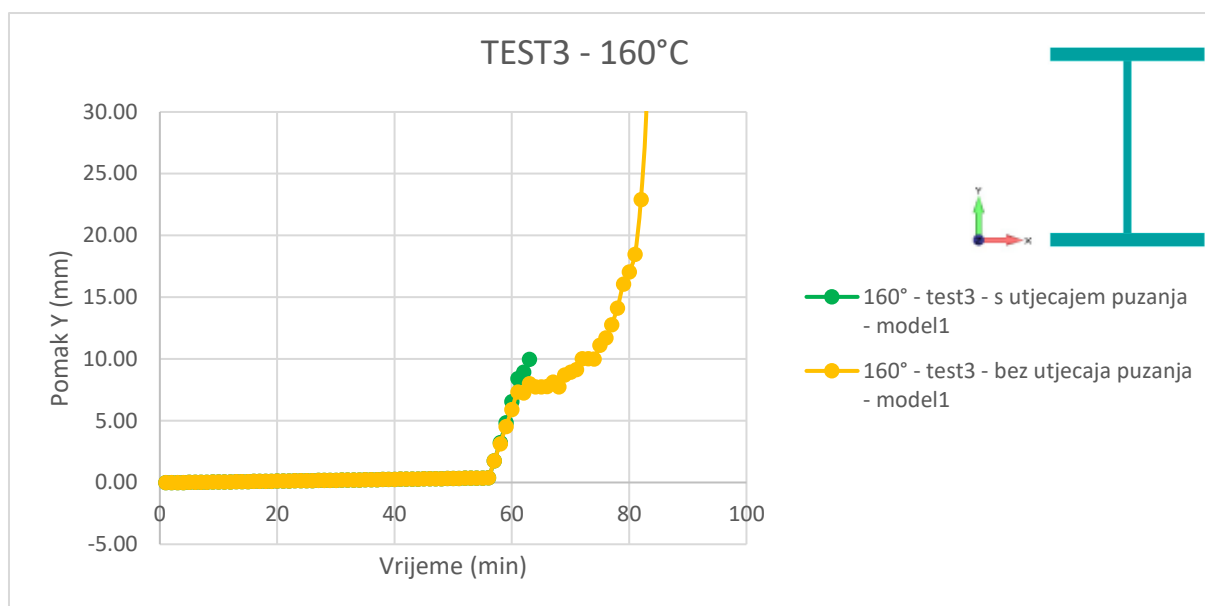
7.1 Rezultati modela 1 u smjeru osi Y



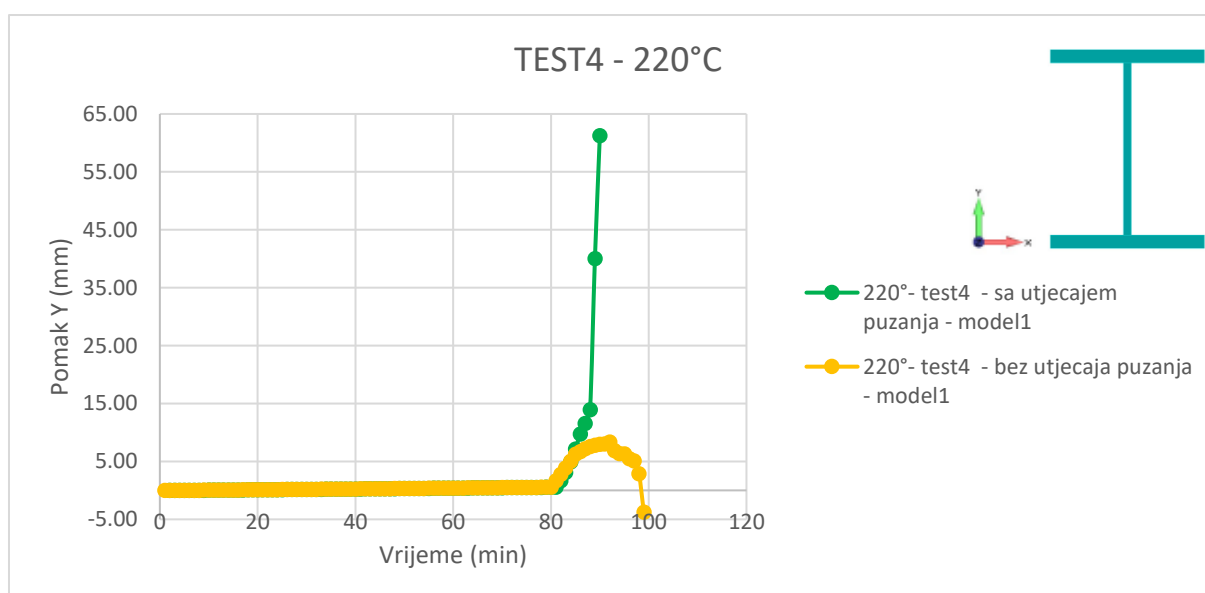
Slika 7.1 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



Slika 7.2 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

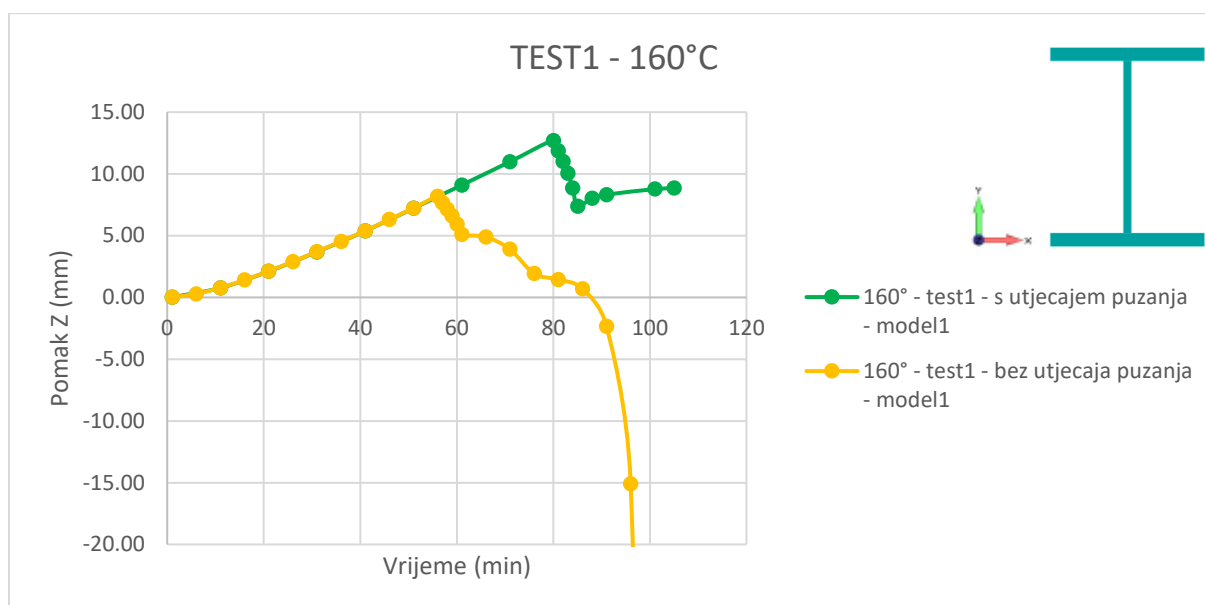


Slika 7.3 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

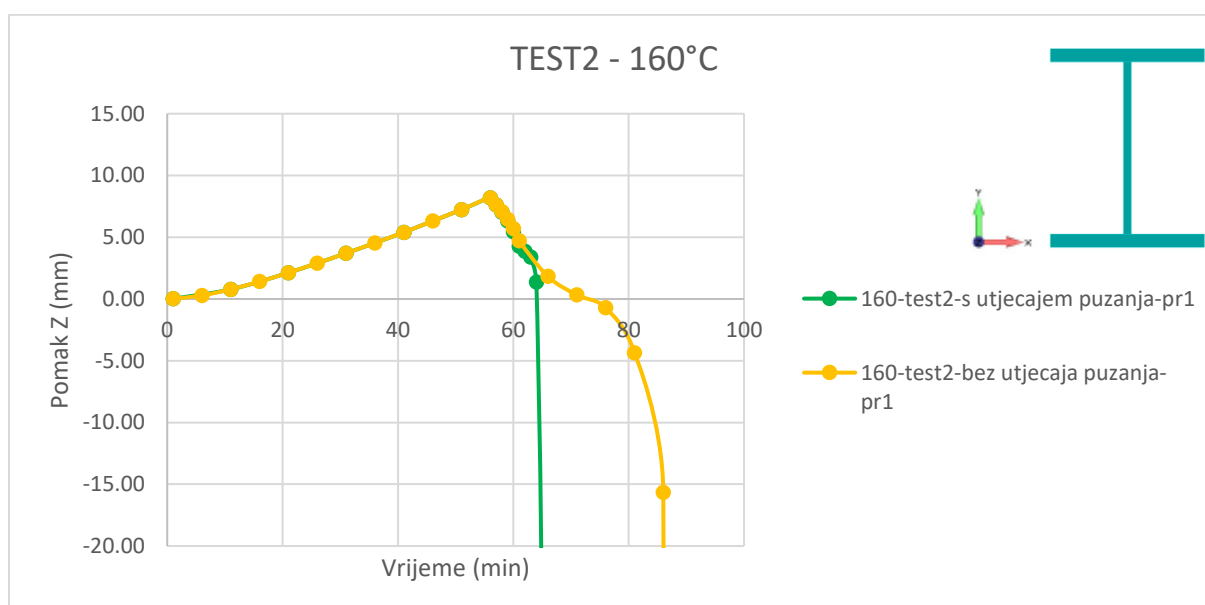


Slika 7.4 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

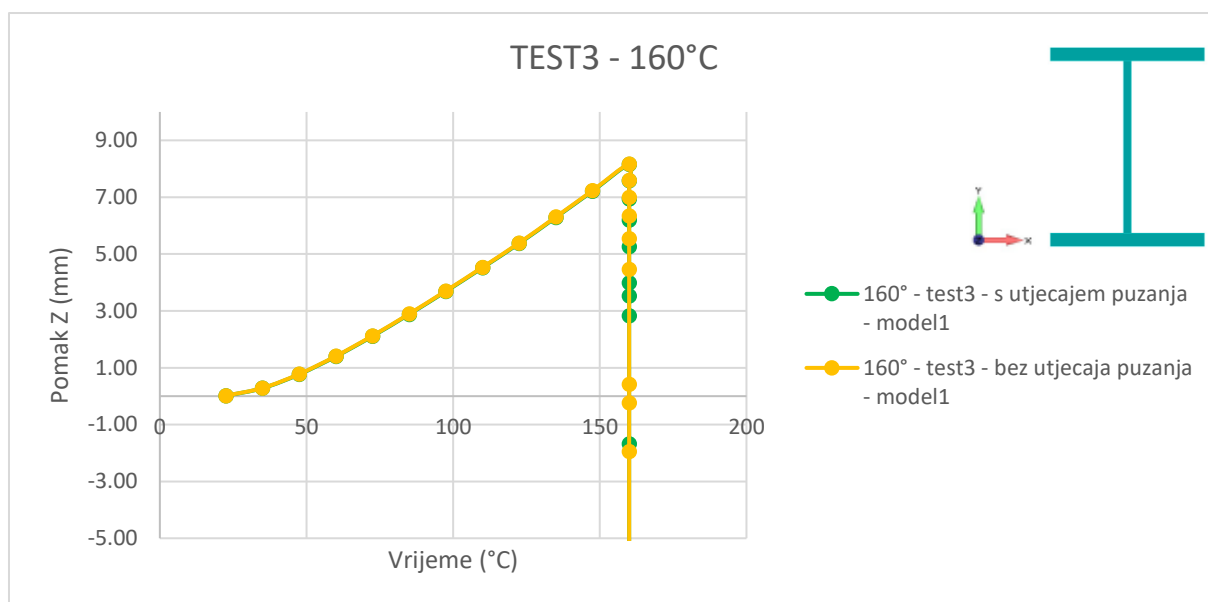
7.2 Rezultati modela 1 u smjeru osi Z



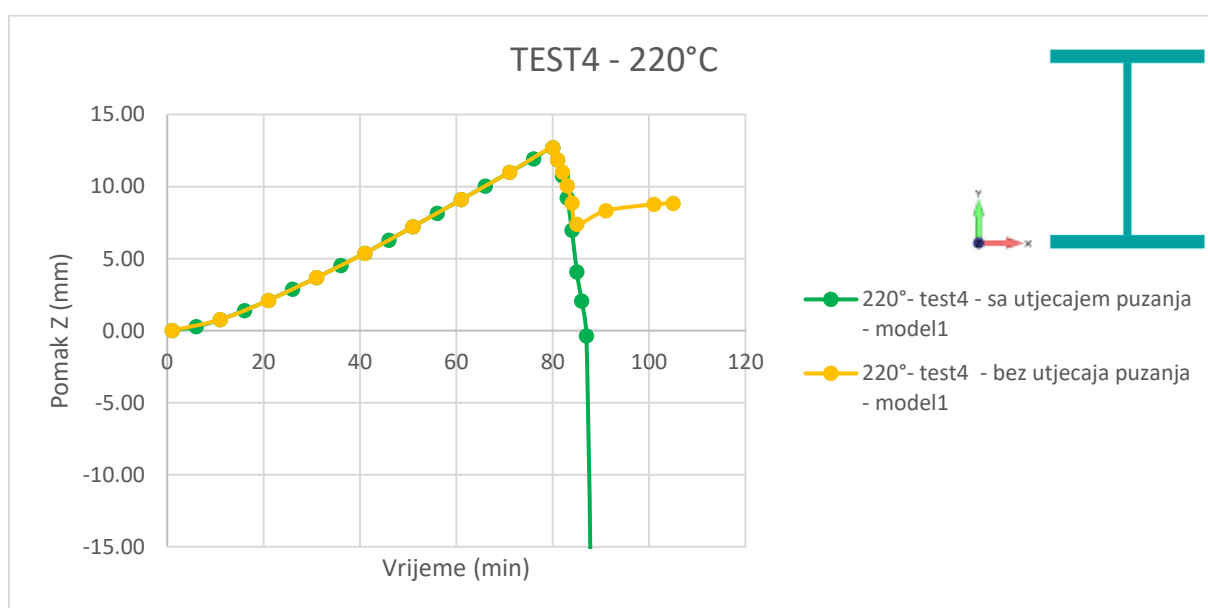
Slika 7.5 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 7.6 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu

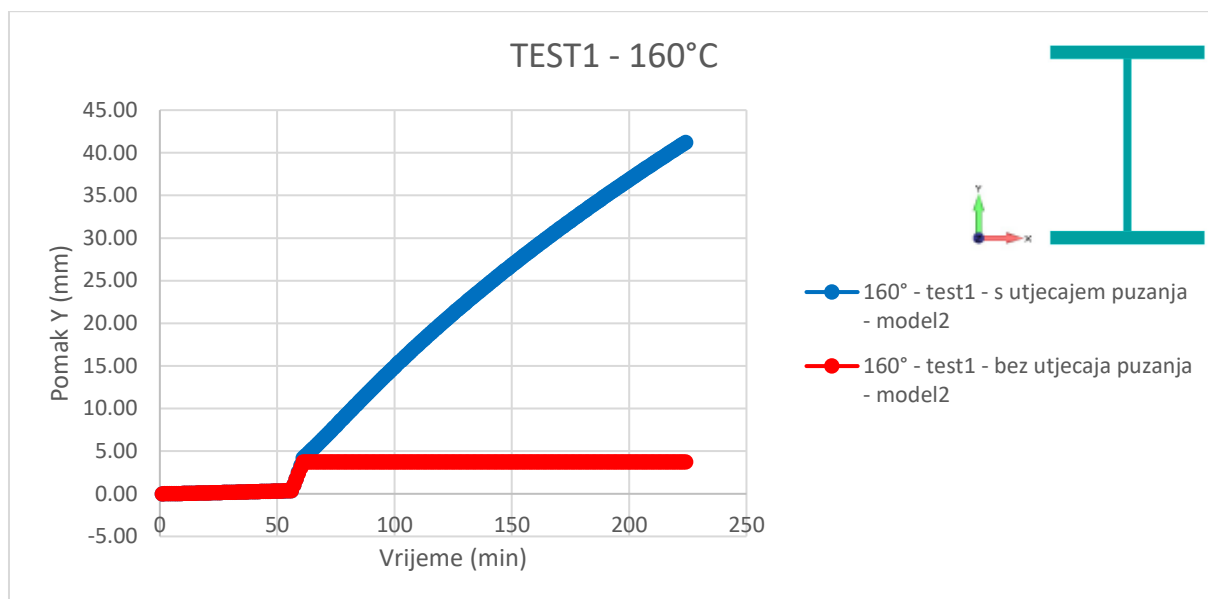


Slika 7.7 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu

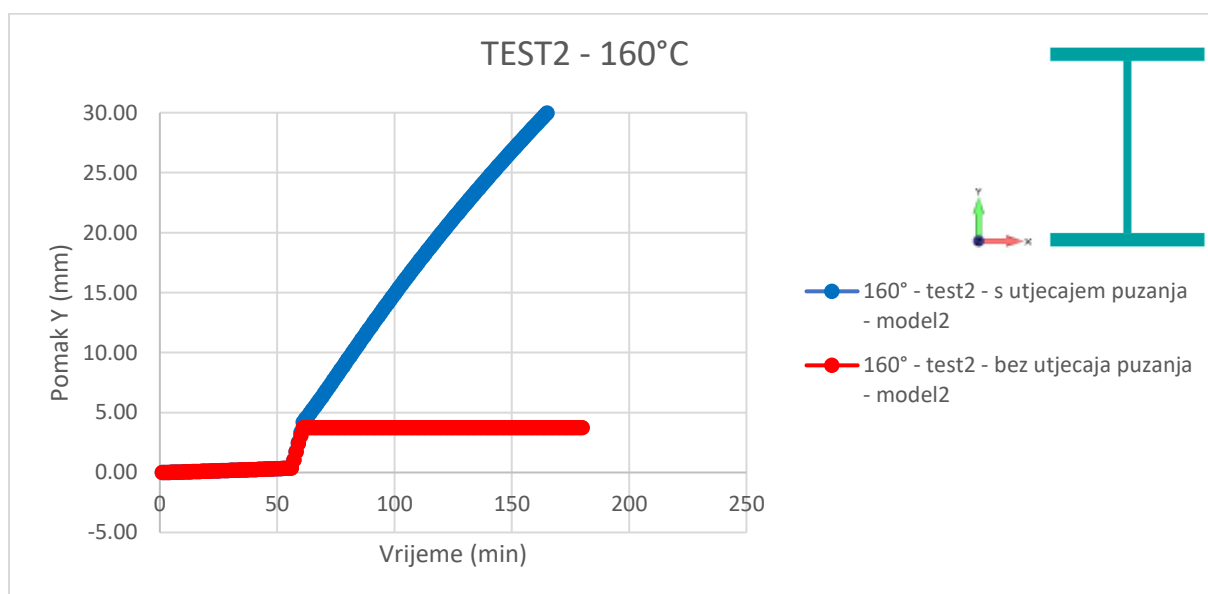


Slika 7.8 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu

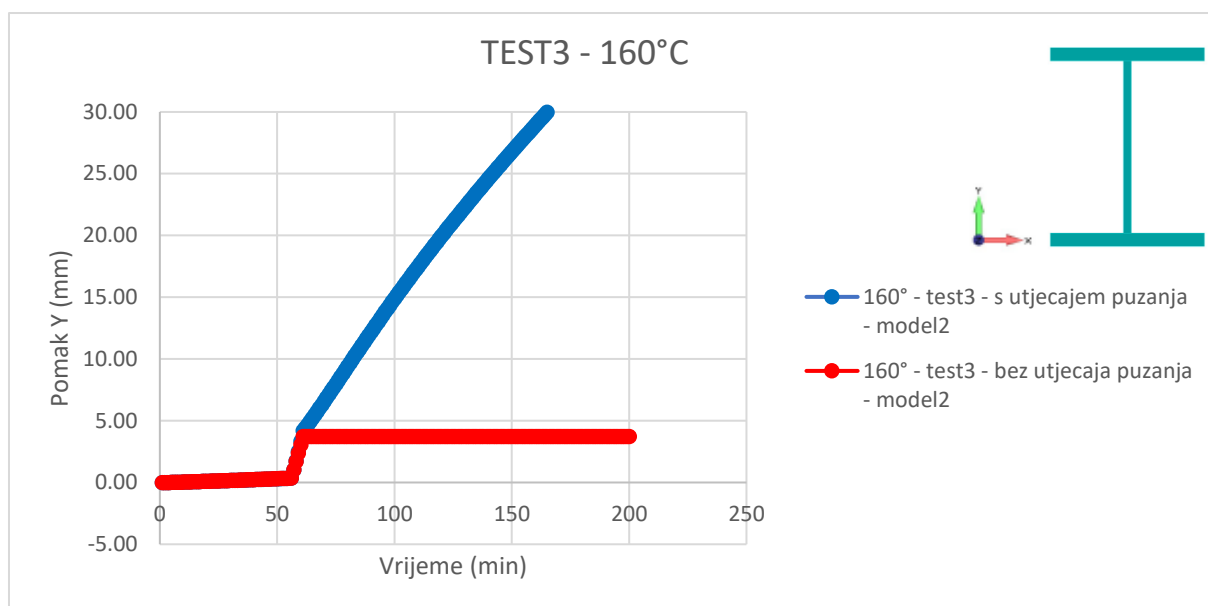
7.3 Rezultati modela 2 u smjeru osi Y



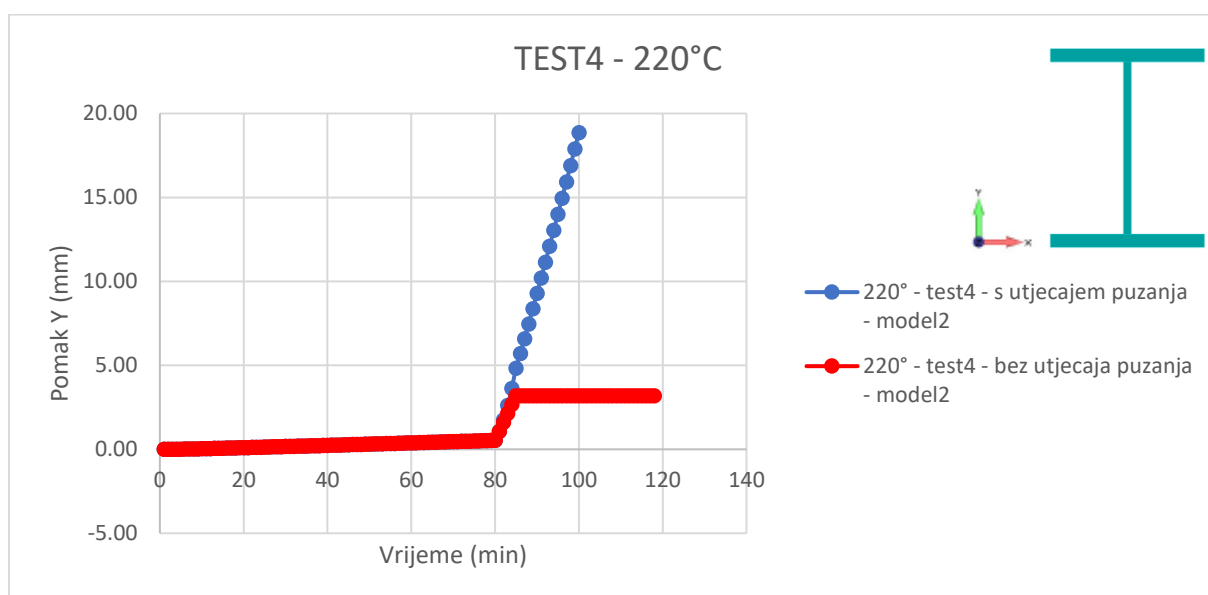
Slika 7.9 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu



Slika 7.10 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

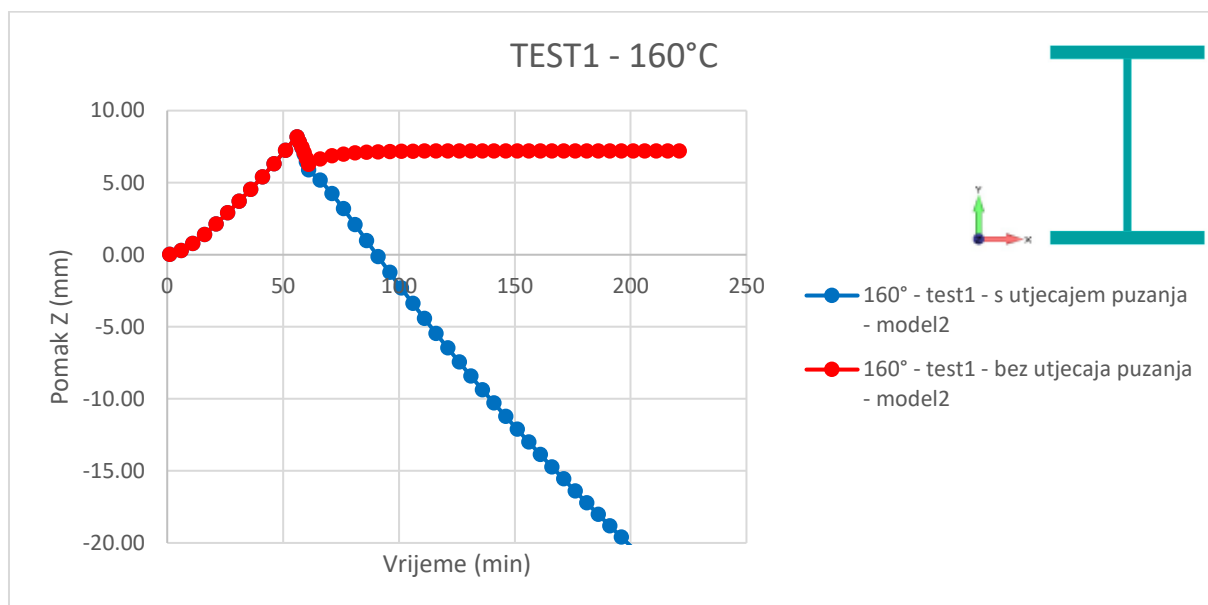


Slika 7.11 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

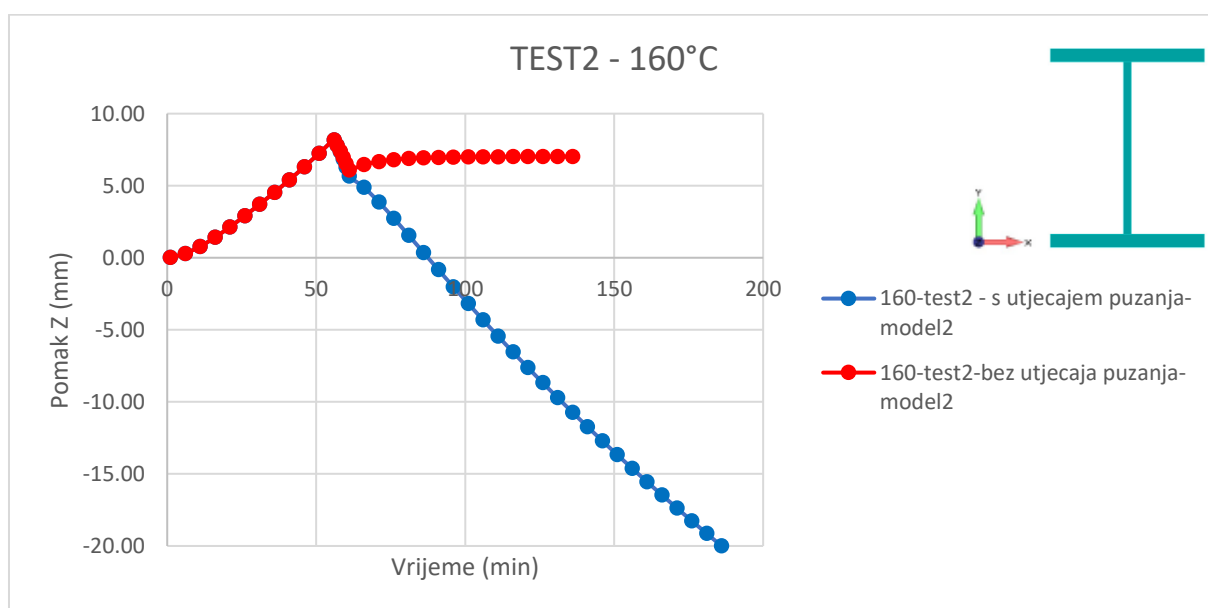


Slika 7.12 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Y smjeru koja se nalazi na sredini pojasnice stupa sa strane suprotne nanošenja opterećenja u ovisnosti o vremenu

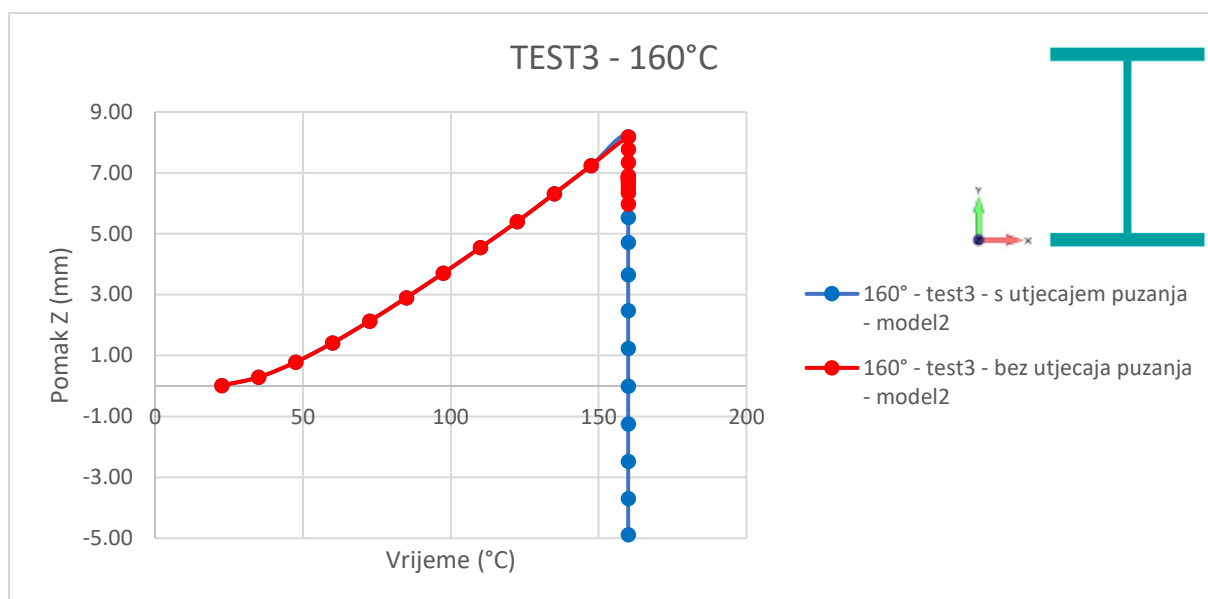
7.4 Rezultati modela 1 u smjeru osi Z



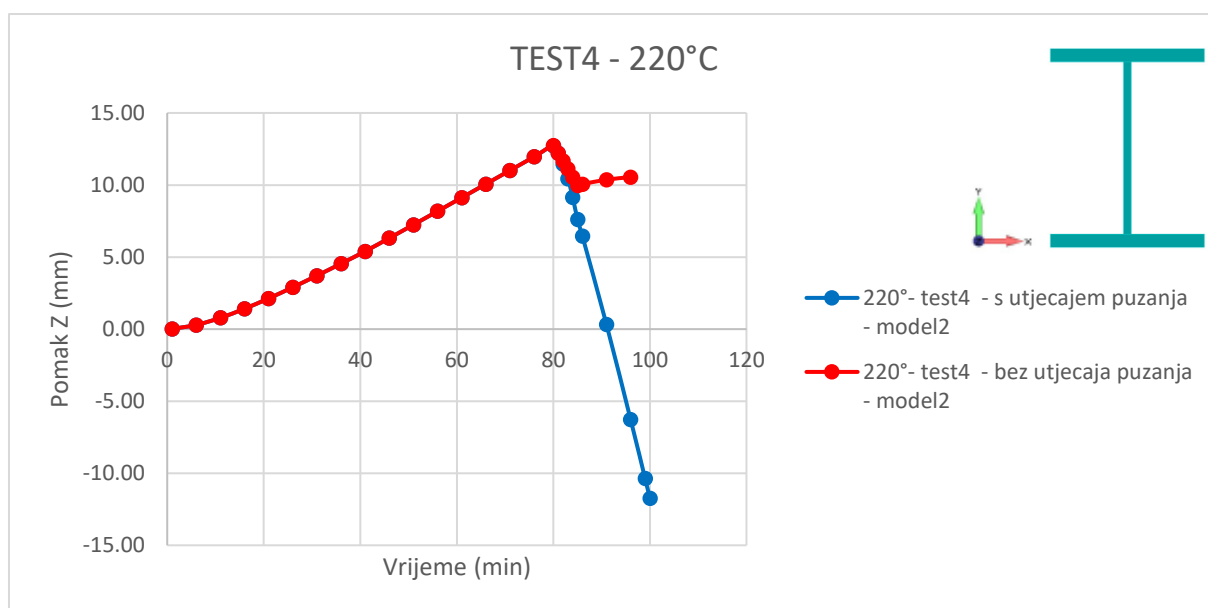
Slika 7.13 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 7.14 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 7.15 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu



Slika 7.16 – Graf prikazuje pomak točke stupa u Z smjeru koja se nalazi na sredini vrha hrpta stupa u ovisnosti o vremenu

8 ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedeni su proračuni za stacionarne simulacije – zagrijavanje stupa i onda nanošenje opterećenja te za nestacionarne testove – prvo nanošenje opterećenja i onda zagrijavanje. Svi proračuni provedeni su bez i sa utjecajem puzanja te za dvije vrste pridržanja.

	Vrijeme popuštanja (min)		
	F1 = 488 kN	F2 = 549 kN	F3 = 610 kN
Bez utjecaja puzanja - model1	47	51	44
S utjecajem puzanja - model1	11	11	9
Bez utjecaja puzanja - model2	112	106	106
S utjecajem puzanja - model2	102	102	101

Tablica 8.1–Vrijeme popuštanja aluminijskog stupa u minutama u slučaju nestacionarnih simulacija

	Maksimalna temperatura (°C)		
	F1 = 488 kN	F2 = 549 kN	F3 = 610 kN
Bez utjecaja puzanja - model1	137,5	147,5	130
S utjecajem puzanja - model1	47,5	47,5	40
Bez utjecaja puzanja - model2	300	285	285
S utjecajem puzanja - model2	275	275	272,5

Tablica 8.2–Temperatura popuštanja aluminijskog stupa u minutama u slučaju nestacionarnih simulacija

	Vrijeme popuštanja (min) nakon nanošenja ukupne sile			
	TEST1	TEST2	TEST3	TEST4
Bez utjecaja puzanja - model1	31	23	21	16
S utjecajem puzanja - model1	118	3	7	4
Bez utjecaja puzanja - model2	∞	∞	∞	∞
S utjecajem puzanja - model2	-	-	-	-

Tablica 8.3–Vrijeme popuštanja aluminijskog stupa u minutama u slučaju stacionarnih simulacija

Iz ovih rezultata vidi se da kod modela1 brže i pri manjim temperaturama dolazi do otkazivanja nosivosti nego kod modela2 što je posljedica modela pridržanja. Kod modela1 dolazi do velikih deformacija u području donjeg nepomičnog ležaja. Kod modela2 je pak spriječena rotacija tako da ni jedan model ne daje skroz realne rezultate. Općenito gledajući kod nestacionarnih testova za model 1 kritična temperatura je između 40°C i 50°C, dok za model 2 ona iznosi oko 285°C. Točno vrijeme tj. temperatura otkazivanja je negdje između te ovisi o pridržanju.

Usporedbom rezultata proračuna u kojima je uzeto u obzir puzanje i u kojima nije, zaključuje se da puzanje smanjuje kritičnu temperaturu stupa u odnosu kada ga nema tj. vremenski dolazi ranije do otkazivanja kad je puzanje uzeto u obzir u odnosu kad nije.

U slučaju modela2 puzanje nema velikog utjecaja jer je razina opterećenja dosta mala.

9 LITERATURA

1. Ivica Boko, Davor Skejić, Neno Torić – Aluminijske konstrukcije, Udžbenik sveučilišta u Splitu i Zagrebu, Izdavač: Sveučilište u Splitu, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
2. "Aluminum." World of Earth Science. . Retrieved July 24, 2018 from Encyclopedia.com:
<http://www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcriptsandmaps/aluminum>
3. <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf> Alloying: Understanding the Basics J.R. Davis, Light Metals and Alloys p351-416, Copyright © 2001 ASM International® All rights reserved. www.asminternational.org
4. Neno Torić, Josip Brnić, Ivica Boko, Marino Brčić, Ian W. Burgess and Ivana Uzelac Experimental Analysis of the Behaviour of Aluminium Alloy EN 6082AW T6 at High Temperature, Metals 2017, 7, 126; doi:10.3390/met7040126
5. European Committee for Standardization. EN 1999-1-1:2007, Eurocode 9: Design of aluminium structures: Part 1-1: General structural rules, Part 1-2: Structural fire design, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2007
6. J. Maljaars, L. Twilt, J. H. H. Fellingner, H. H. Snijder, F. Soetens – Aluminium structures exposed to fire conditions – An overview. Heron 2010, 55, 85-122
7. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1462954728-0-podlogezapredavanjamopmak.god.2015_16.pdf
8. MASA manual - Finite element program for 3D nonlinear analysis of concrete and reinforced concrete structures – autor: J. Ožbolt, IWB, Universitat Stuttgart, 70550 Stuttgart, Njemačka

KORIŠTENI PROGRAMSKI PAKETI:

- MASA (**MA**croscopic **S**pace **A**nalysis)
- FEMAP
- Microsoft Office Word
- Microsoft Office Excel
- AutoCad