

# Otpornost armiranobetonskog stupa izloženog djelovanju povišene temperature: 3D studija konačnim elementima

---

Vučko, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:794567>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-14**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT





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

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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hrvoje Vučko**

**Split, 2018.**

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

**Hrvoje Vučko**

**Otpornost armiranobetonskog stupa izloženog  
djelovanju povišene temperature: 3D studija  
konačnim elementima**

**Diplomski rad**

**Split, 2018.**

# **Otpornost armiranobetonskog stupa izloženog djelovanju povišene temperature: 3D studija konačnim elementima**

## ***Sažetak:***

Tema diplomskog rada je bila istražiti utjecaj povišenog djelovanja temperature na nosivost i oštećenje betona armiranobetonskog stupa koji je prije izlaganja djelovanju visokih temperatura prethodno bio izložen djelovanju opterećenja silom.

Nakon djelovanja visokih temperatura armiranobetonski stup je hlađen prema propisima hlađenja, a postupak opterećivanja stupa do sloma je izvršen nakon što se stup u potpunosti ohladio duž cijele svoje duljine i duž cijelog svog poprečnog presjeka.

Napravljen je jedan model armiranobetonskog stupa te su prikazani proračuni i rezultati za dva validacijska slučaja stup A i stup B, te parametarska studija za stup A pri kojoj smo mijenjali različite iznose opterećenja, te različite duljine vremena djelovanja požara. Jedina razlika između stupova A i B je ta što je stup A napravljen od mreže kockastih konačnih elemenata HexMesh, a stup B od mreže tetraedarskih konačnih elemenata TetMesh.

## ***Ključne riječi:***

Armiranobetonski stup, opterećenje, oštećenje betona, pukotine, visoka temperatura

# **Resistance of RC columns exposed to elevated temperature: 3D FE Study**

## ***Abstract:***

The topic of the thesis was to investigate the effect of elevated temperature action on the loading capacity and damage of concrete on a reinforced concrete column which had previously been exposed to force loads before exposure to high temperatures. After the impact of high temperatures the reinforced concrete column was cooled according to the cooling regulations, and the loading process of the column up to failure was made after the column had completely cooled down its entire length and cross section.

One model of the reinforced concrete column was made and the calculations and results for the two validation cases column A and column B, as well as the parametric study for the column A, with varying loads and varying lengths of fire time. The only difference between the columns A and B is that the column A is made of a mesh of cube end elements HexMesh solids, and the column B of a mesh of tetrahedral end elements TetMesh solids.

## ***Keywords:***

reinforced concrete column, load, damage of concrete, cracks, high temperatures

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: HRVOJE VUČKO

BROJ INDEKSA: 625

KATEDRA: **Katedra za betonske konstrukcije i mostove**

PREDMET: Betonske konstrukcije II

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Otpornost armiranobetonskog stupa izloženog djelovanju povišene temperature: 3D studija konačnim elementima

Opis zadatka: Potrebno je izvršiti analizu armiranobetonskog stupa izloženog djelovanju požara simulacijom krivulje standardnog požara

U Splitu, 21.09.2018.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc. Alen Harapin

Komentor:

Prof.dr.sc. Joško Ožbolt

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Doc. dr. sc. Veljko Srzić

## **Zahvala**

*Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Jošku Ožboltu i osoblju instituta IWB (Institut für Werkstoffe im Bauwesen) u Stuttgartu koji su mi omogućili rad i boravak na institutu, te njihovoj velikoj pomoći prilikom izrade rada, te mentoru u Splitu prof.dr.sc. Alenu Harapinu.*

*Isto se zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama, te obitelji koja mi je bila veliki oslonac kada mi je to najviše bilo potrebno.*

## **Posveta**

*Ovaj diplomski rad posvećujem svojim roditeljima i bratu koji su mi omogućili studiranje, te su mi uvijek bili podrška.*

## S a d r Ź a j

1.	UVOD	7
1.1.	Općenito o računalnim programima MASA i Femap®	8
2.	PONAŠANJE KORIŠTENIH MATERIJALA PRILIKOM DJELOVANJA POŽARA	9
2.1.	Ponašanje betona pri visokim temperaturama	9
2.2.	Ponašanje čelika pri visokim temperaturama	13
3.	MODELIRANJE NOSAČA I GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE	15
3.1.	Model AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)	15
3.1.1.	Geometrijske karakteristike i izrada geometrije modela AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)	15
3.1.2.	Prikaz izrade mreže konačnih elemenata modela AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)	19
3.1.3.	Pregled korištenih materijala i pripadajućih karakteristika	21
4.	ZADAVANJE OPTEREĆENJA NA MODEL	24
4.1.	Zadavanje opterećenja pomakom	24
4.2.	Zadavanje opterećenja silom s visokim temperaturama i simuliranje požara	27
5.	ZADAVANJE RUBNIH UVJETA I PRIDRŽANJA	32
6.	PRIKAZ I USPOREDBE REZULTATA	34
6.1.	Model opterećen samo pomakom	34
6.1.1.	Prikaz nosivosti za osnovni model	35
6.2.	Prikaz rezultata modela opterećenih visokom temperaturom i silom	36
6.2.1.	Rezultati za validacijski slučaj stupa A	36
6.2.2.	Rezultati za validacijski slučaj stupa B	55
6.2.3.	Parametarska studija stupa A	79
6.2.3.1.	1.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 60 minuta)	80
6.2.3.2.	2.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 60 minuta)	95
6.2.3.3.	USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 60 min ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA	110
6.2.3.4.	3.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 25% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)	113
6.2.3.5.	4.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)	132
6.2.3.6.	5.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)	151
6.2.3.7.	USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 90 min ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA	161
6.2.3.8.	6.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 25% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)	165
6.2.3.9.	7.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)	185
6.2.3.10.	8.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA   VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)	196
6.2.3.11.	USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 120 minuta ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA	207
6.2.3.12.	PRIKAZ DIJAGRAMA NOSIVOSTI I USPOREDBA REZULTATA ZA SVE KOMBINACIJE PARAMETARSKE STUDIJE STUPA A	211
7.	ZAKLJUČAK	213
8.	LITERATURA	215

## 1. UVOD

Ponašanje armiranobetonskih konstrukcija prilikom djelovanja požara i njihovo razumijevanje je jedno od najvećih izazova za istraživače u svijetu danas, zbog toga što su požari uz potrese jedna od najvećih vanjskih prijetnji koje mogu naštetiti stabilnosti i uporabljivosti AB-konstrukcija. [1]

Cilj je što bolje razumjeti djelovanje požara i njegove štetne posljedice za konstrukciju da bi mogli konstrukcije u budućnosti što bolje projektirati, te da bi im sam požar nanio što manje posljedice. U ovom radu pokušava se djelovanje požara što bolje simulirati numeričkim putem zbog toga što je to mnogo jeftiniji postupak nego da se izvršava eksperimentalna analiza. Armirani beton ima poprilično dobru otpornost na požar u usporedbi s ostalim građevinskim materijalima, a u ovom radu će se promatrati kako sam požar štetno djeluje na njegove početne karakteristike čvrstoće, otpornosti, trajnosti itd., te da li se postojeća konstrukcija nakon djelovanja požara može rekonstruirati što je jeftinija opcija ako je to moguće, ili se mora rušiti i raditi ispočetka.[1]

U nastavku će biti prikazani rezultati analize djelovanja požara različitih vremena djelovanja, te djelovanja opterećenja različitih iznosa na numeričkom modelu armiranobetonskog stupa koje je modeliran mrežom 3D konačnih elemenata.

Modeliranje armiranobetonskog stupa, te unošenje njegove geometrije, opisivanje karakteristika materijala, unošenje opterećenja i pridržanja, obrada i analiza tog modela, izvršeno je pomoću računalnih programa FEMAP® i MASA (MAcroscopic Space Analysis). Izrada modela, njegove geometrije, karakteristika materijala, opterećenja i pridržanja je izvedeno u računalnom programu FEMAP®, dok je obrada tog modela i dobivanje rezultata tog modela izvršena u programu MASA. [3]



## 1.1. Općenito o računalnim programima MASA i Femap®

Računalni program konačnih elemenata MASA (MAcroscopic Space Analysis) se koristi za analizu trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata konstrukcije izrađene od kvazi-krkih materijala kao što su beton, kamen i slični materijali. Program je uglavnom namjenjen za nelinearnu analizu betona i armiranog betona, ali se mogu analizirati i ostali materijali.[3]

Za pripremu ulaznih podataka koristi se računalni program FEMAP®. U njemu se radi geometrija modela kao i opisivanje karakteristika materijala, zadavanje opterećenja i pridržanja.[3]

Model se radi od mreže konačnih elemenata. Treba biti vrlo pažljiv prilikom generiranja čvorova mreže i elementi se moraju spajati u čvorovima da bi nam proračun dao dobre rezultate. Na nekim karakterističnijim mjestima je potrebno mrežu malo i progustiti da bi imali točnije rezultate.

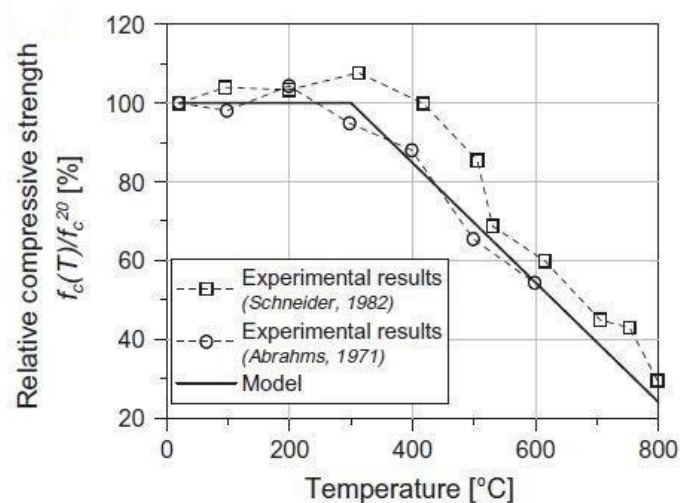
Veza između Femap-a i MASA-e se ostvaruje pomoću NEU-datoteke koju generira program Femap, a učitava ju program MASA. Nakon što se proračun izvrši pomoću programa MASA stvaraju se izlazne datoteke koje nam daju potrebne rezultate. Nakon toga je potrebno ponovno učitati te izlazne datoteke u programu Femap da mi se mogla izvršiti grafička analiza modela.[3]

## 2. PONAŠANJE KORIŠTENIH MATERIJALA PRILIKOM DJELOVANJA POŽARA

U ovom poglavlju biti će opisano ponašanje korištenih materijala (čelika i betona), te promjena njihovih početnih karakteristika prilikom povišenog djelovanja temperature, što je od iznimne važnosti s obzirom da većina građevnih materijala prilikom povišenog djelovanja temperature mijenja svoju mikrostrukturu i njihove početne karakteristike su poprilično narušene.

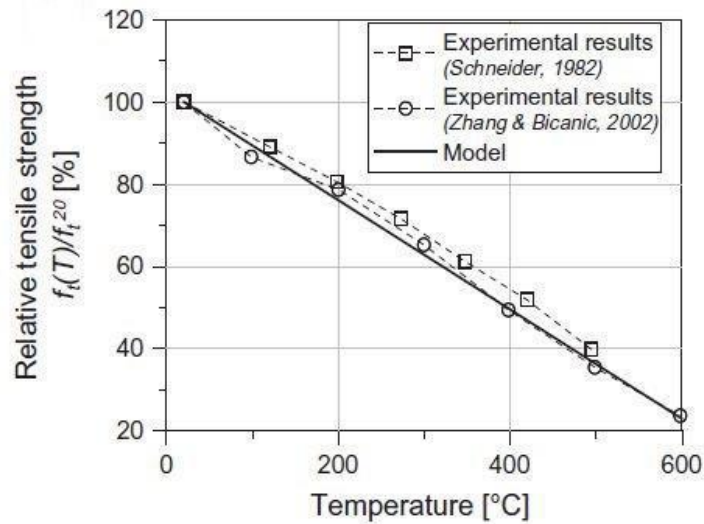
### 2.1. Ponašanje betona pri visokim temperaturama

Prema eksperimentalnim dokazima pri temperaturi do 300°C tlačna čvrstoća betona se povećava s temperaturom. Međutim, pri daljnjem povećanju temperature tlačna čvrstoća betona se smanjuje gotovo linearno. Na nižim temperaturama hidratacija cementnog tijesta je znatno sporija. Kod visokih temperatura isparavanje, mikropukotine, razgradnja cementne paste i agregata uzrokuju pad vrijednosti tlačne čvrstoće betona. [1]



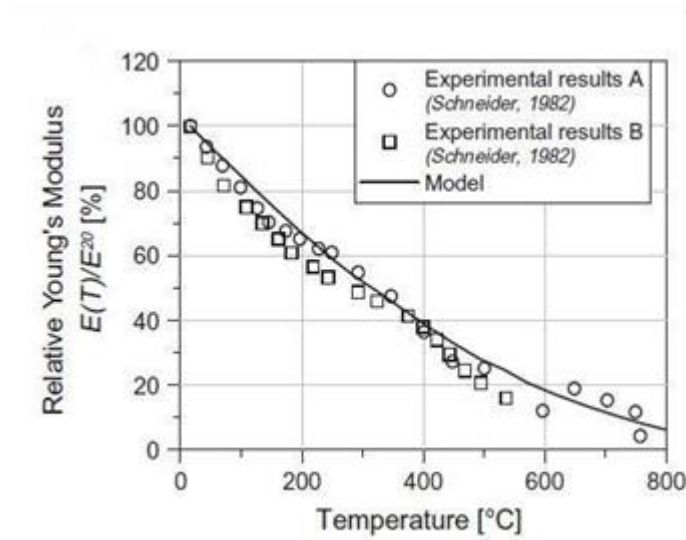
Slika 2.1. Prikaz tlačne čvrstoće u ovisnosti o temperaturi

Ispitivanjima i eksperimentalnim dokazima pokazano je da se vlačna čvrstoća betona gotovo linearno smanjuje s porastom temperature. Na nižim temperaturama toplinska naprezanja uzrokuju mikro-pucanje (pojavu mikropukotina) i uzrokuju oštećenje veze između agregata i cementne paste, što dovodi do smanjenja vlačne čvrstoće. Porast temperature uzrokuje pojavu mikropukotina a samim tim i većih pukotina, isparavanje vode u betonu, razgradnju cementne paste i agregata što dovodi do znatnog pada vrijednosti vlačne čvrstoće. [1]



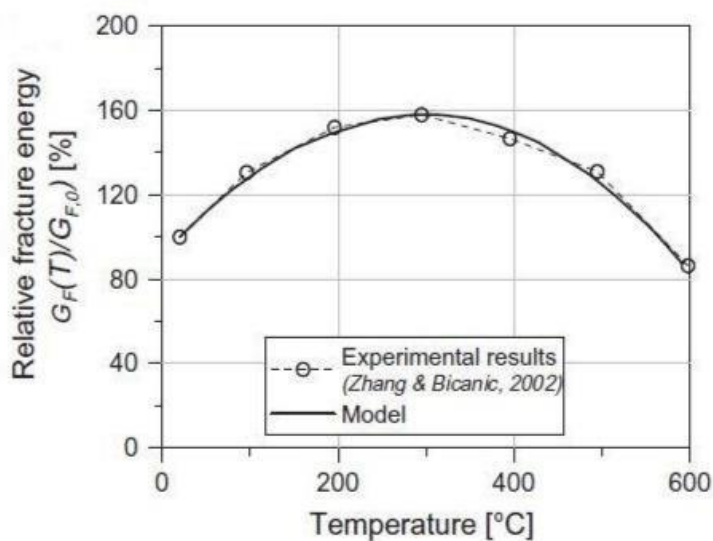
Slika 2.2. Prikaz vlačne čvrstoće u ovisnosti o temperaturi

Eksperimenti pokazuju da se s porastom temperature Young-ov modul elastičnosti smanjuje. Pretpostavlja se da je pri relativno niskim temperaturama, smanjenje modula elastičnosti uzrokovano gubitkom kapilarne vode. Međutim, na višim temperaturama smanjenje modula elastičnosti je uzrokovano zbog razgradnje pojedinih komponenti betona (cementne paste i agregata). [1]



Slika 2.3: Prikaz Young-ovog modula elastičnosti u ovisnosti o temperaturi

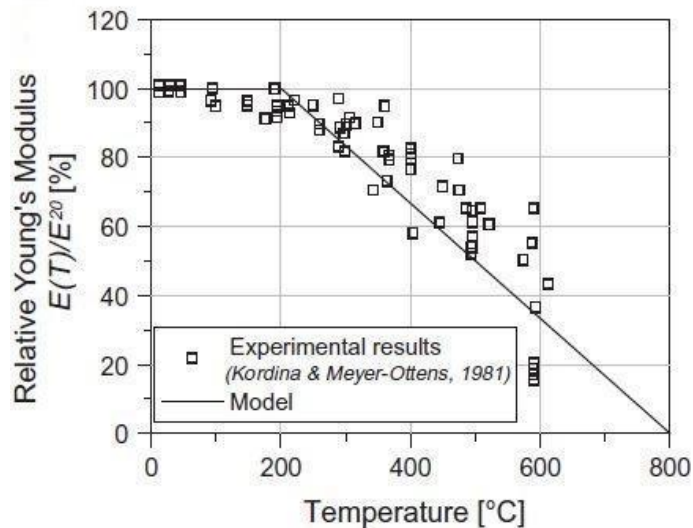
Eksperimentalnim ispitivanjima je pokazano da povećanjem temperature do 300°C energija sloma raste i povećava se za oko 60%. Međutim, daljnjim porastom temperature dolazi do smanjenja energije sloma te pri temperaturi oko 600°C dostiže oko 90% početne vrijednosti. To se može pripisati činjenici da je pri temperaturama oko 300°C hidratacija cementne paste znatno veća nego pri sobnoj temperaturi. Na višim temperaturama mikropukotine, isparavanje i raspadanje cementne paste i agregata uzrokuje smanjenje energije sloma. [1]



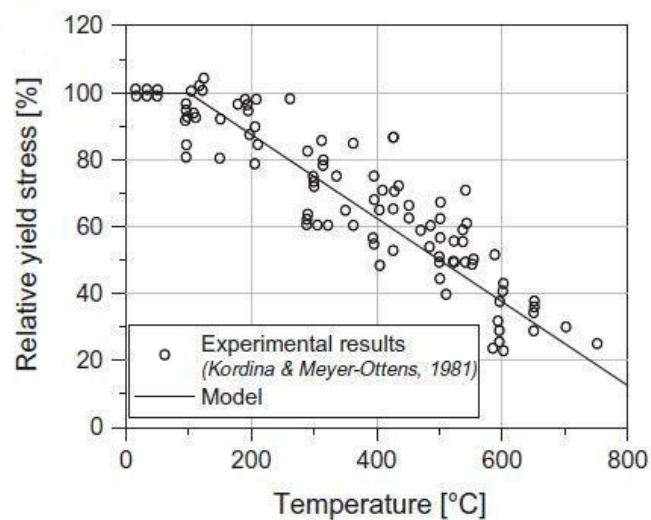
Slika 1.4 : Prikaz energije sloma u ovisnosti o temperaturi

## 2.2. Ponašanje čelika pri visokim temperaturama

Eksperimenti pokazuju da se mehanička svojstva čelika izloženog djelovanju visokih temperatura degradiraju. U modelu se to ogledava kroz redukciju vrijednosti Young-ovog modula elastičnosti i granice tečenja kao što je prikazano na sljedećim slikama.



Slika 2.5 : Prikaz Young-ovog modula elastičnosti u ovisnosti o temperaturi



Slika 2.6: Prikaz granice tečenja u ovisnosti o temperaturi

Iako dolazi do redukcije prethodno navedenih svojstava čelika zbog visoke temperature, eksperimenti su pokazali da za razliku od betona, čelik nakon hlađenja može povratiti svoju granicu tečenja. Isto tako modul elastičnosti čelika nakon hlađenja je jednak modulu elastičnosti prije zagrijavanja. [1]

Zbog poteškoća mjerenja karakteristika čelika prilikom zagrijavanja istraživači uglavnom mjere karakteristike čelika nakon hlađenja. I uglavnom svi eksperimenti su pokazali da su karakteristike čelika poprilično smanjene prilikom djelovanja požara zbog degradacije materijala u njemu, što znači da svaki požar u pravilu trajno smanji kvalitetu i stabilnost konstrukcije, te je nemoguće više povratiti njenu originalnu stabilnost i kvalitetu.[1]

### **3. MODELIRANJE NOSAČA I GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE**

U ovom poglavlju biti će prikazan postupak izrade modela, unošenje geometrijskih karakteristika, te zadavanje rubnih uvjeta.

#### **Model je:**

- armiranobetonski stup s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)

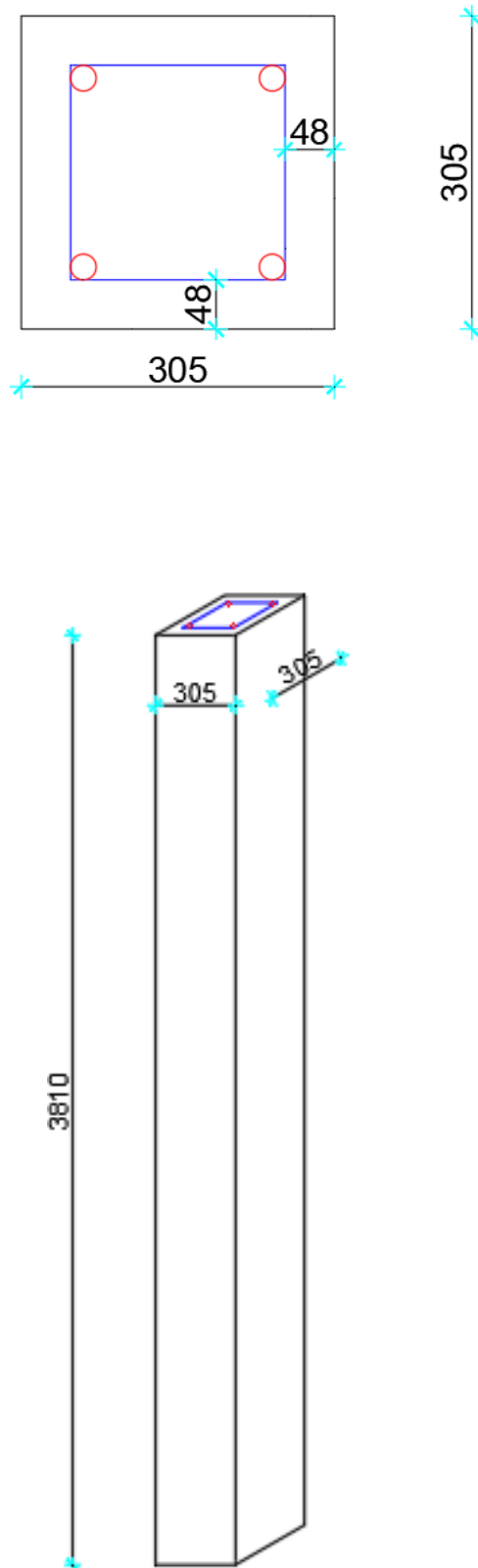
#### **3.1. Model AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)**

Ovaj model je armiranobetonski stup koji je sastavni dio nosive konstrukcije, te koji je proračunat na opterećenja požara i sile prema eksperimentu [2]. On je modeliran mrežom konačnih elemenata, a armiran je glavnom uzdužnom armaturom u rubovima, te sponama duž cijele visine stupa. Postoji jedan model, a dva validacijska slučaja koji su proračunati stup A i stup B prema eksperimentu [2], te parametarska studija stupa A.

##### **3.1.1. Geometrijske karakteristike i izrada geometrije modela AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)**

Model je armiranobetonski stup pravokutnog poprečnog presjeka dimenzija  $b/h = 305/305\text{mm}$  i ukupne visine 3,81m. Za armiranje korištene su četiri šipke glavne armature promjera  $\varnothing 25\text{mm}$  po jedna u svaki rub, te su korištene spone  $\varnothing 10/305\text{mm}$ , dok je zaštitni sloj betona 48mm, kao što je i prikazano na sljedećoj slici. [2]

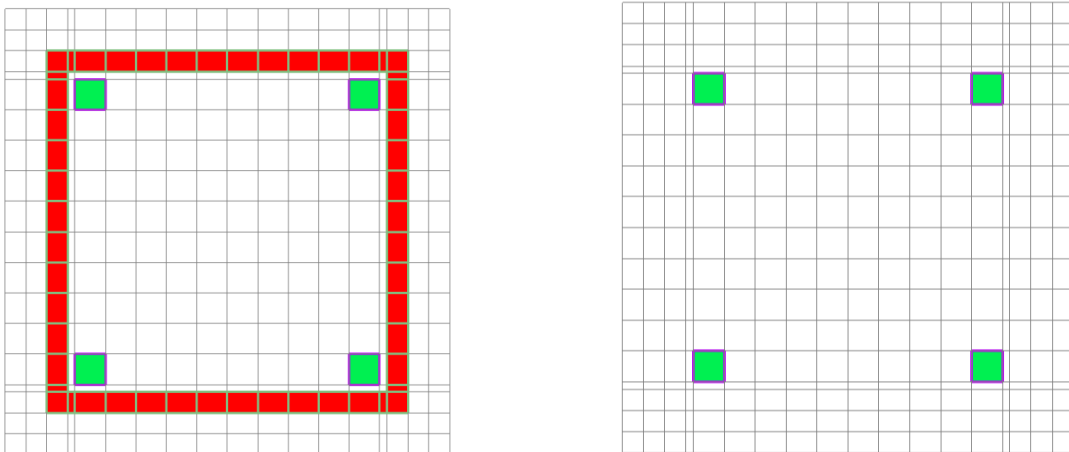




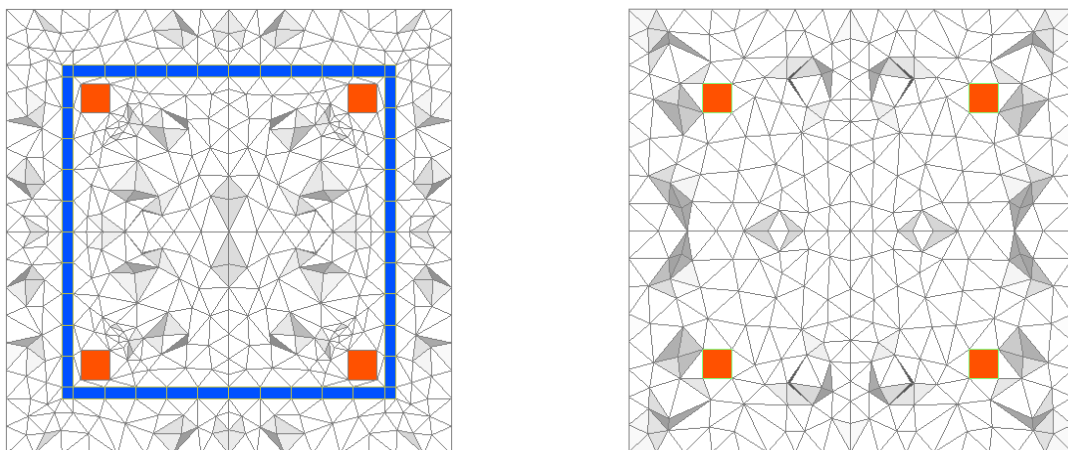
Slika 2.1: Visina i poprečni presjek cijelog AB stupa

Nakon što su odabrane dimezije elementa njegov model je napravljen u programu Femap. Radi jednostavnosti nije modeliran cijeli stup odjednom nego je uzet jedan njegov segment koji u sebi sadrži sve potrebne detalje i materijale, te nakon što je on izmodeliran, kopiran je potrebn broj puta da se dobije željeni model stupa.

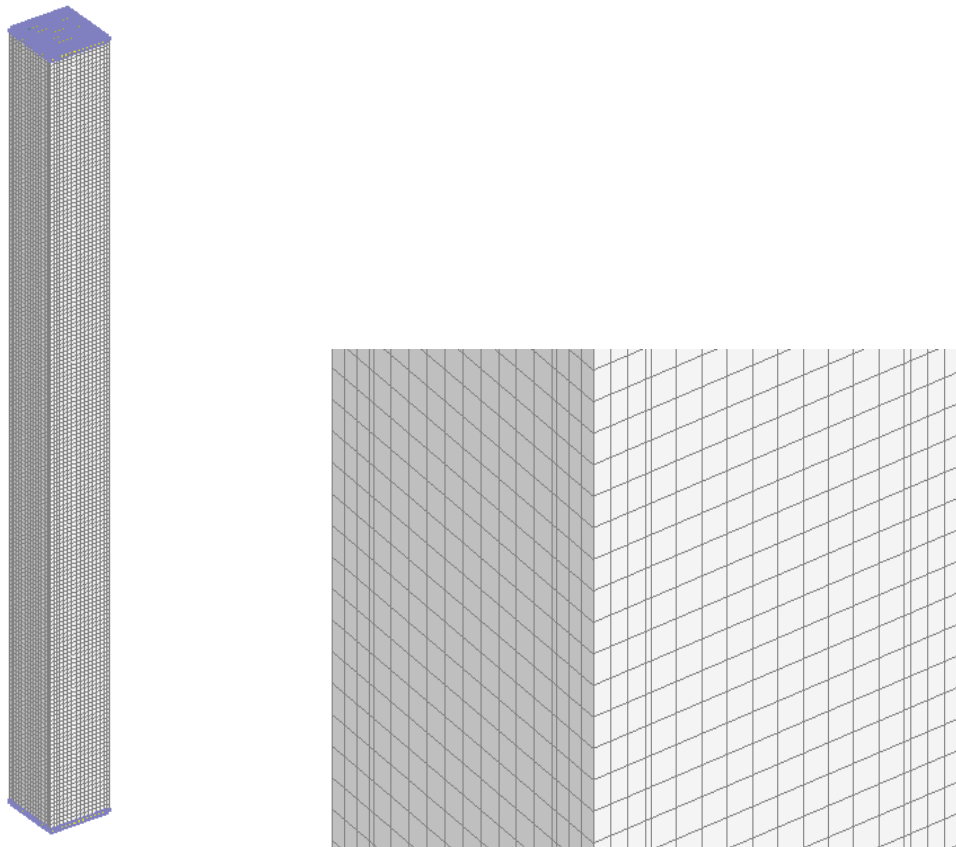
Dimenzije segmenta su  $X/Y/Z=305/305/305\text{mm}$ .



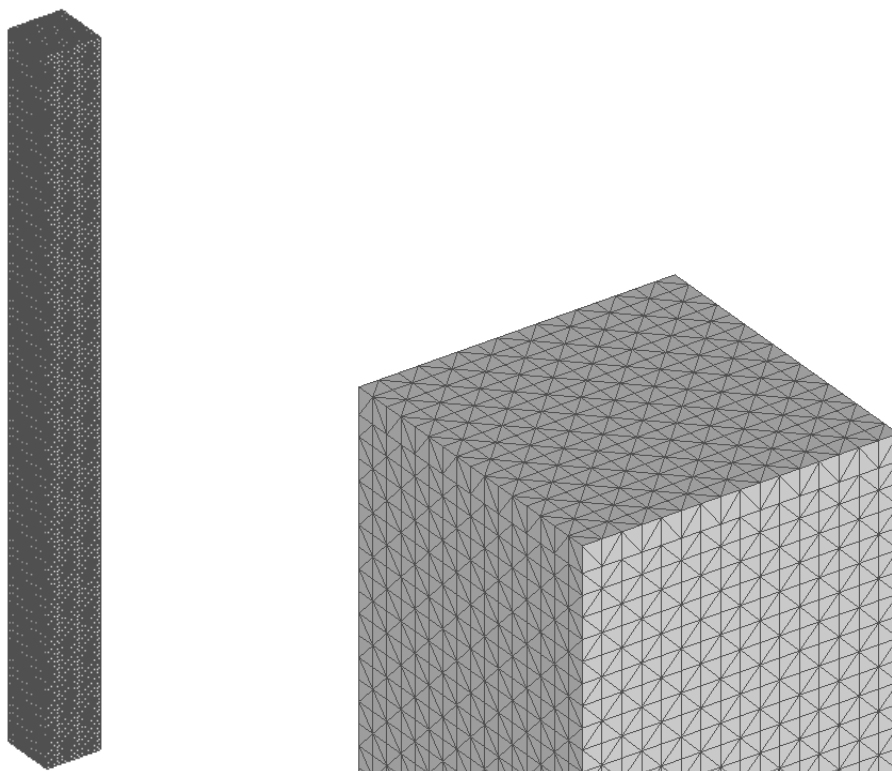
Slika 3.2: Prikaz poprečnog presjeka osnovnog modela (sa sponama-lijevo) i (bez spone-desno)  
Model za stup A (HexMesh Solids)



Slika 3.3: Prikaz poprečnog presjeka osnovnog modela (sa sponama-lijevo) i (bez spone-desno)  
Model za stup B (TetMesh Solids-za materijal beton)



Slika 3.4: Prikaz mreže osnovnog modela (cijeli stup-lijevo) i (detalj stupa-desno)  
Model za stup A (HexMesh Solids)

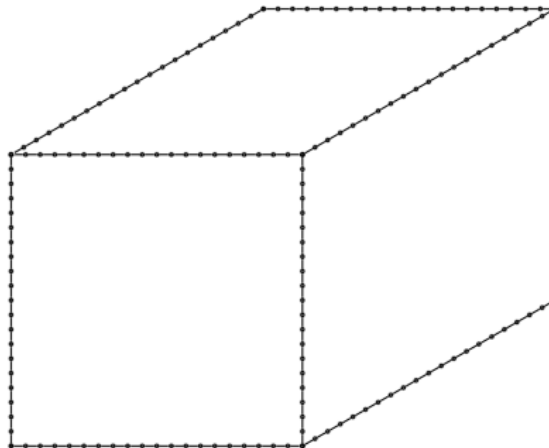


Slika 3.5: Prikaz mreže osnovnog modela (cijeli stup-lijevo) i (detalj stupa-desno)  
Model za stup B (TetMesh Solids)

### 3.1.2. Prikaz izrade mreže konačnih elemenata modela AB stupa s glavnom uzdužnom armaturom u rubovima i s poprečnom armaturom (sponama)

U ovom poglavlju biti će prikazana izrada mreže konačnih elemenata za materijale beton (stup) i čelik (elemente glavne armature i spona). Jako je bitno mrežu konačnih elemenata napraviti pažljivo jer o njejoj ispravnosti ovise rezultati i sve daljnje analize. Mrežu treba diskretizirati i konačni elementi se smiju spajati samo u čvorovima da bi je program MASA mogao ispravno učitati i proračunati. Na nekim karakterističnijim mjestima (spoj armature i betona, itd.) potrebno je mrežu progustiti zbog toga da bi bili točniji rezultati. Na mjestima gdje nema nekih promjena može biti rjeđa diskretizacija.

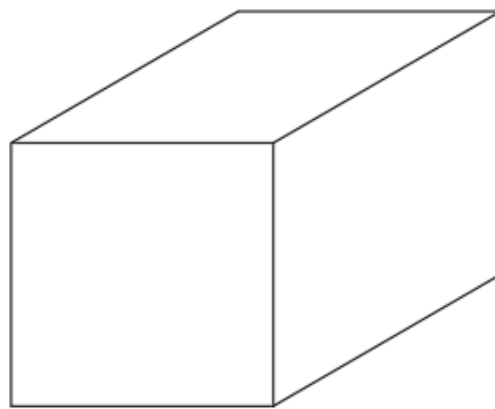
Prije nego što se krene izrađivati mreža konačnih elemenata potrebno je u programu Femap odrediti sve materijale od kojih će se sastojati model. Isto tako potrebno je linije geometrije modela diskretizirati, tj. postaviti na njih onoliki broj čvorova koliko će biti konačnih elemenata. Nakon toga kad konačni elementi budu generirani, oni će se spajati na linijama geometrije točno u tim čvorovima koji su prethodno zadani.



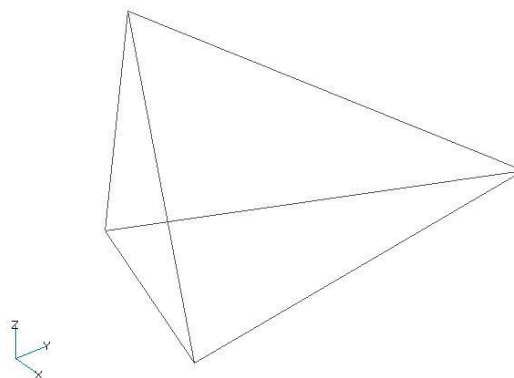
Slika 3.6: Prikaz podjele tijela betona za stup A (HexMesh Solids)

Nakon podjele i diskretiziranja linija geometrija modela, svakoj se liniji geometrije modela može se napraviti mreža trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata.

Za prostornu diskretizaciju betona i čelika (glavne armature, spona i čeličnih pločica) upotrijebljeni su trodimenzijski (heksaedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi-HexMesh solids) za stup A , te trodimenzijski (tetraedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi-TetMeshsolids) za stup B za materijal beton i čelične pločice dok je armatura modelirana pomoću mreže HexMeshSolids.



Slika 3.7: Prikaz heksaedarskog konačnog elementa modela (za stup A)



Slika 3.8: Prikaz tetraedarskog konačnog elementa modela (stup B)

### 3.1.3. Pregled korištenih materijala i pripadajućih karakteristika

U ovom poglavlju će biti prikazani korišteni materijali u modelu. Korišteni materijali su beton i čelik za oba validacijska slučaja stup A i stup B, kao i za parametarsku studiju stupa A.

Tu će biti prikazane njihove karakteristike i pojedini iznosi kao na primjer za beton (modul elastičnosti, tlačna čvrstoća, energija loma..) Ovdje će biti prikazane karakteristike za stup A. Za stup B su potpuno iste.

Prikaz korištenih materijala i svojstava:

**Napomena: Zbog lakšeg razumijevanja svojstava materijala biti će prikazano kratko objašnjenje korištenih materijala**

*Concrete –predstavlja beton ab grede*

*Steel reinforcement – predstavlja uzdužnu armaturu*

*Steel plate – elementi čelične pločice*

*Stirrups – elementi poprečne armature (spone)*

#### # Concrete

Material Nr.:	1
Number of properties to be read:	5
Type of material parameters (1=microplane)	0
Young modulus:	30000.0
Poisson's ratio:	0.18
Weight density:	0.0
Creep factor:	0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):	0.0
#	
Tensile strength:	3.50
Compressive strength:	35.00
Fracture energy:	0.08
#	

**# Steel reinforcement**

Material Nr.:	2
Number of properties to be read:	7
Type of material parameters (1=microplane)	0
Young modulus:	210000.0
Poisson's ratio:	0.33
Weight density:	0.0
Reinforcement area:	0.00
Reinforcement yield stress:	444.0
Reinforcement hardening modulus:	5972.6
Reinforcement ultimate stress:	730.0
#	

**# Steel plate**

Material Nr.:	3
Number of properties to be read:	5
Type of material parameters (1=microplane)	0
Young modulus:	210000.0
Poisson's ratio:	0.33
Weight density:	0.0
Creep factor:	0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):	0.0
#	

**# Stirrups**

Material Nr.:	4
Number of properties to be read:	7
Type of material parameters (1=microplane)	0
Young modulus:	210000.0
Poisson's ratio:	0.33
Weight density:	0.0
Reinforcement area:	0.00
Reinforcement yield stress:	427.0
Reinforcement hardening modulus:	5086.9
Reinforcement ultimate stress:	671.0
#	

Za izradu modela armiranobetonskog stupa korišten je beton vlačne čvrstoće  $3.5 \text{ N/mm}^2$ , pripadne tlačne čvrstoće  $35.00 \text{ N/mm}^2$ , korišten je Young-ov modul elastičnosti u iznosu od  $30000.00 \text{ N/mm}^2$  i Poissonov koeficijent 0.18. Za izradu glavne armature, spona, i čeličnih pločica korišten je čelik s Young-ovim modulom elastičnosti u iznosu od  $210\ 000.00 \text{ N/mm}^2$  i Poissonovim koeficijentom 0.33, dok granica tečenja za glavnu armaturu iznosi  $444 \text{ N/mm}^2$  i  $427 \text{ N/mm}^2$  za spona, te maksimalno naprezanje iznosi  $730 \text{ N/mm}^2$  za glavnu armaturu i  $671 \text{ N/mm}^2$  za spona.



## 4. ZADAVANJE OPTEREĆENJA NA MODEL

Za potrebe testiranja modela korištena su dva osnovna načina opterećivanja stupa:

- opterećenje pomakom u zadani broj koraka
- opterećenje silom s visokim temperaturama i simuliranjem požara

Model je opterećen na dva različita načina. U prvom slučaju nanosi se opterećenje pomakom do sloma. To je opterećenje u normalnim uvjetima bez utjecaja požara. U njemu se saznaje kolika je inicijalna tj. maksimalna nosivost stupa. Sve ostale nosivosti nakon djelovanja povišene temperature će biti umanjene u odnosu na inicijalnu. U drugom slučaju se nanosi opterećenje silom i povišenom temperaturom prema eksperimentu [2]. Prvo se nanese sila u određenom postotku iznosa od inicijalne nosivosti, a nakon toga se nanese djelovanje povišene temperature. I onda nakon procesa zagrijavanja i hlađenja stupa, kad je stup u cijelom svom volumenu dosegao sobnu temperaturu se nanese sila u određenim inkrementima do sloma stupa.

### 4.1. Zadavanje opterećenja pomakom

U prvom slučaju kako je i prethodno navedeno zadaje se opterećenje pomakom da bi se mogla odrediti inicijalna nosivost stupa. To opterećenje se ne zadaje odjednom nego u određenim inkrementima(koracima), a što se zada više koraka točniji će biti i rezultati. Svaki korak koji je zadan se također sastoji od određenog broja iteracija. Što je veći broj iteracija u određenom koraku proračun će biti točniji. Ukupni pomak koji je zadan iznosi 20 mm i to u minus Z smjeru stupa. Pomak se ne nanosi koncentrirano u jednoj točki nego se podijeli na čvorove koji se nalaze s gornje strane stupa, tj nanosi se na čeličnu pločicu koja obavija stup s gornje i donje strane.

**Postavke modela za unos opterećenja u računalni program:**

Number of load increments:	400 ( <i>broj koraka</i> )
Tolerance:	1.0
Max. number of iterations:	49 ( <i>broj iteracija po koraku</i> )
Output after 1st iter. (0=no,1=D,2=D+R,3=D+R+S):	0
Converged output (0=no,1=D,2=D+R):	2
Stress output (0=no, 1=yes):	1
Strain output (0=no, 1=yes):	1
Load index (0=no AL,1=1st LG,2=2nd LG):	0
Load factor for 1st load group (LG):	0.0
Load factor for 2nd load group (LG):	0.0
Displacement index (displ. applied 0=no, 1=yes):	1
Displacement factor:	-0,05 ( <i>vrijednost pomaka</i> )
Time Step:	0.
Expansion factor:	0.
#	
Load step option: (=1 new job, >1 restart)	1
Number of load step increments:	400 ( <i>broj koraka</i> )
Number of nodes:	67868 ( <i>ukupan broj čvorova</i> )
Total number of elements:	60588 ( <i>ukupan broj elemenata</i> )
Number of solid elements (8th node elements) :	60588

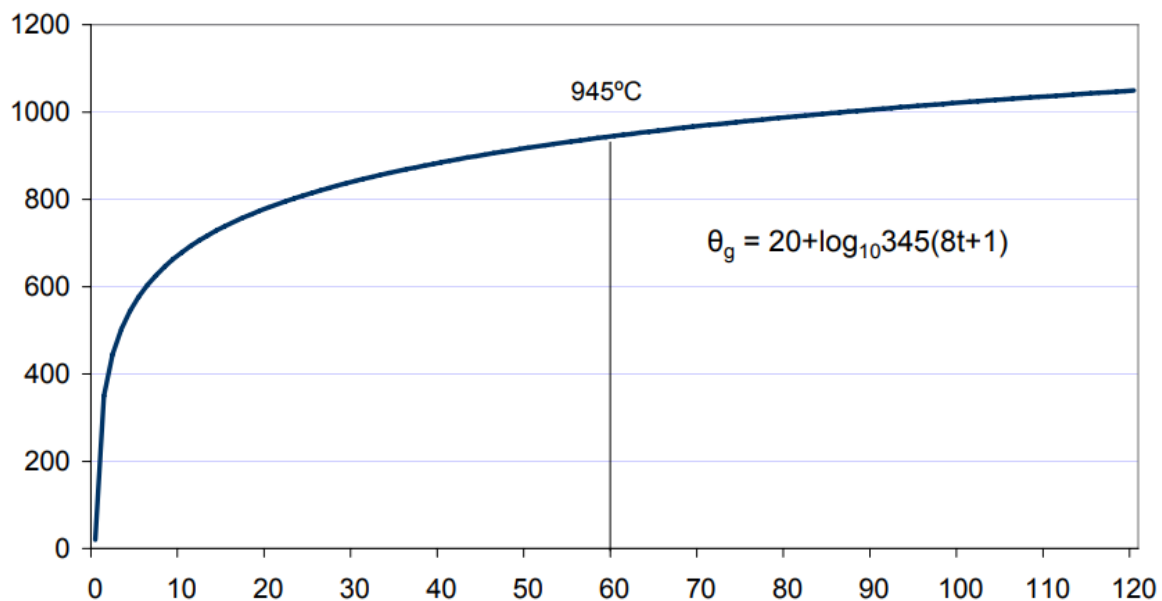
Number of bar (reinforcement) elements:	0
Number of independant bar elements:	0
Number of restrained nodes:	722
Number of different materials:	4
Order of integration formula (1, 2 or 3):	2
Type of the algorithm (1= CSM, 2= TSM or 3= SSM):	3
Type of fracture analysis (0= local, 1=nonlocal)	0
Min. bandwidth size:	130
Buffer size:	-30
Maximum number of elem. for nonlocal interaction:	100
Creep analysis (1= yes, 0= no):	0
Shrinkage of concrete (1= yes, 0= no):	0
Initial time (days):	28.0
Cyclic analysis (1= yes, 0= no):	0
Rate sensitivity (1= yes, 0= no):	0
Dynamic analysis (1= yes, 0= no):	0
Geometric nonlinearity (1= yes, 0= no):	0
Output step:	1
Binary output (0=ASCII,1=short,2=binary):	2
Performance (0=normal,1=speed,2=mem):	1
Solver (0=serial,1=parallel):	1
Memory Usage (0=less,1=full):	1
#	
Node for monitoring of nodal displacement:	67810
Direction of monitoring (1,2 or 3):	3
Load monitoring nodes (total number):	361
#	
# In the following nodes the load is monitored:	<i>(opterećeni čvorovi)</i>
67508 67509 67510 67511 67512..... 67868	
#	
# Definition of the screen plot plane (7=XY, 8=YZ, 9=XZ):	
7 .0 1.0 .0 1.0 .0 1.	

Iz prethodnih postavki se vidi broj koraka nanošenja opterećenja, broj iteracija u pojedinom koraku, iznos pojedinog koraka, ukupan broj elemenata modela, ukupan broj čvorova modela, broj čvorova u koje se nanosi opterećenje, te postavke kojima se određuje na koji način tj. kojim integracijskim postupkom program proračunava taj model.

## 4.2. Zadavanje opterećenja silom s visokim temperaturama i simuliranje požara

U drugom slučaju opterećenja model se opterećiva silom i djelovanjem povišene temperature prema eksperimentu [2]. Prvo se nanese sila u određenom broju inkremenata i u nekom određenom postotku iznosa od inicijalne nosivosti stupa.. Nakon što je zadana sila počinje se stup zagrijavati prema standardiziranoj požarnoj krivulji ISO-834. Nakon što završi proces zagrijavanja počinje se hladiti stup u gradijentima temperature koji su izračunati iz formula koje su predviđene za protokol hlađenja, a ovise o tome koliko je prethodno vremenski zagrijavan stup. Nakon završenog procesa hlađenja stup se ostavlja na sobnoj temperaturi od 20°C nekih 24 sata dok se u cijelom svom volumenu ne ohladi na sobnu temperaturu. Nakon toga stup se opet opterećiva silom u inkrementima do njegovog sloma.

Stup je zagrijavan prema standardiziranoj požarnoj krivulji ISO-834 krivulji. Prema njoj iznos temperature najbrže naraste u prvih pola sata na oko 800°C, a nakon toga još u sljedećih 90 minuta na oko 1050°C.



Slika 4.1: Prikaz standardizirane temperaturne krivulje prema kojoj se vrši simulacija požara (ISO-834) [4]

Za postupk hlađenja gradijenti temperature hlađenja računaju se iz sljedećih formula:

$$\begin{aligned}dT / dt &= 625 \text{ }^\circ\text{C/h} && \text{for } t_h \leq 0,5 \text{ h} \\dT / dt &= 250 (3 - t_h) \text{ }^\circ\text{C/h} && \text{for } 0,5 < t_h < 2 \text{ h} \\dT / dt &= 250 \text{ }^\circ\text{C/h} && \text{for } t_h \geq 2 \text{ h} \\dT / dt &= 0 && \text{if } T = 20 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

t=VRIJEME U SATIMA

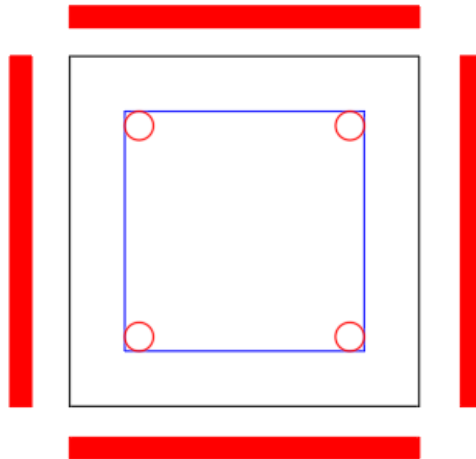
$t_h$ =VRIJEME DJELOVANJA POŽARA U SATIMA

T=TEMPERATURA POŽARA U VREMENU t (u satima)

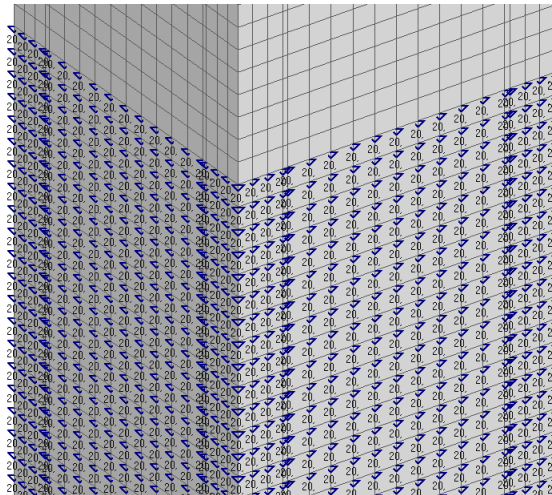
[2]

Temperaturno opterećenje se sastoji od opterećenja temperature i od opterećenja s Heat Fluxom:

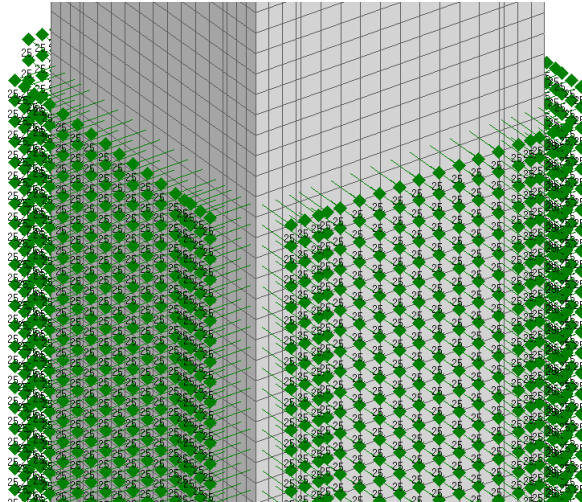
- opterećenje temperaturom se zadaje u čvorove konačnih elemenata
- Heat Flux se zadaje na vanjske površine konačnih elemenata



Slika 3.2: Prikaz površina koje su izložene utjecaju visokih temperatura i djelovanju požara

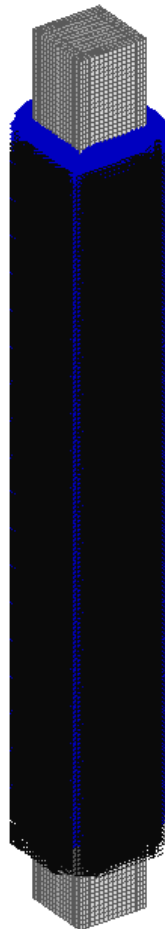


Slika 4.3: Prikaz detalja zadavanja temperature u čvorove



Slika 4.4: Prikaz detalja zadavanja Heat Flux na vanjske površine konačnog elementa

Ukupna visina stupa iznosi 3,81 m, a ukupno temperaturno opterećenje je nanoseno na središnjih 3m visine stupa kao što se može vidjeti u slici ispod.



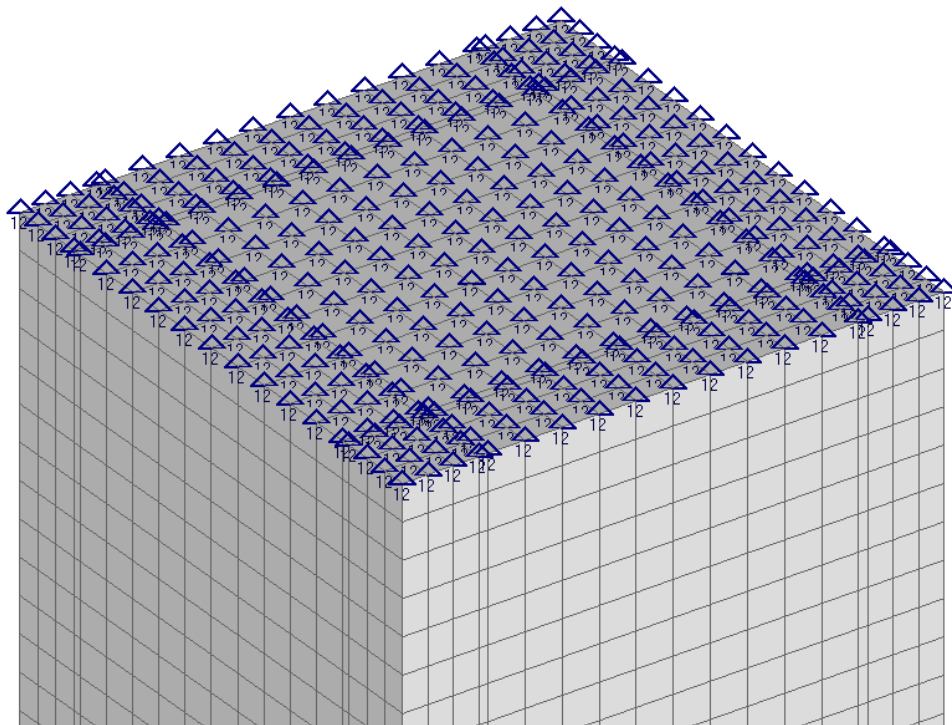
Slika 4.5: Prikaz ukupnog temperaturnog opterećenja (u čvorove konačnih elemenata i vanjske površine konačnih elemenata)

Nosaču prikazanom na slici treba još dodati pridrzanja i model je onda gotov. On ima na sebi nanoseno temperaturno opterećenje koje se nanosi u računalnom programu Femap. Kako je i prije navedeno na model prvo djeluje sila u određenom postotku od inicijalne nosivosti stupa, a nakon nje nanosi se temperaturno opterećenje. To vrijedi i za parametarsku studiju gdje se mijenjaju samo duljine djelovanja temperature u vremenu i iznosi opterećenja.



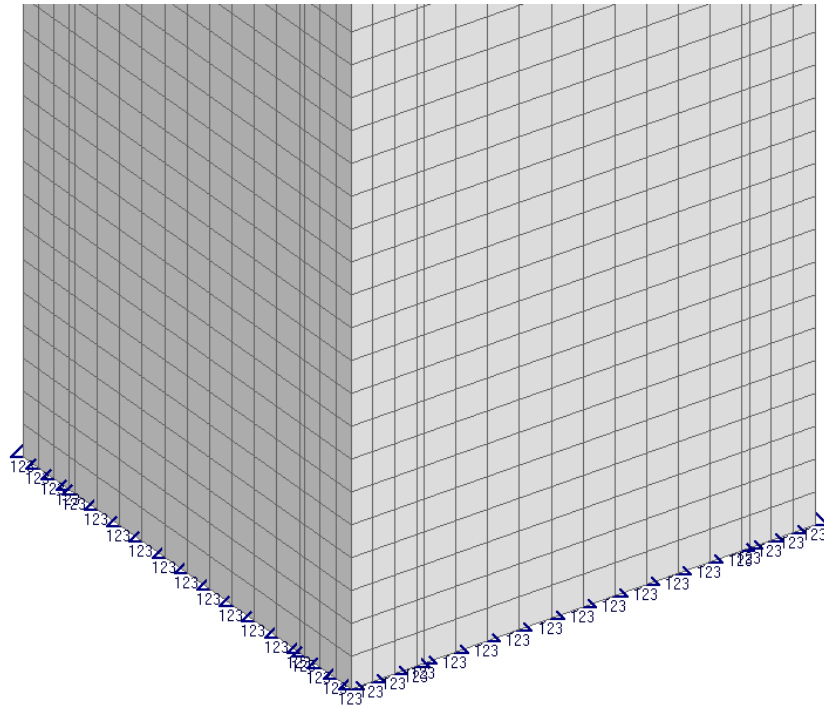
## 5. ZADAVANJE RUBNIH UVJETA I PRIDRŽANJA

U ovom poglavlju se promatraju zadana pridržanja na modelu stupa. Stupu su spriječeni samo translacijski pomaci dok je rotacija ostavljena dozvoljena. Stup je opterećen silom u centru poprečnog presjeka s gornje strane i temperaturom. Pridržanja su postavljena na čelične pločice s gornje i donje strane stupa. Čeličnoj pločici s donje strane stupa je spriječena translacija u svim smjerovima (X,Y,Z) smjer, dok je čeličnoj pločici s gornje strane stupa spriječena translacija u X i Y smjeru, dok je pomak u Z smjeru ostavljen dozvoljen, jer u protivnom zadana sila nebi imala utjecaja na stup, a isto tako pri djelovanju temperature stup nebi imao realnu simulaciju ponašanja.

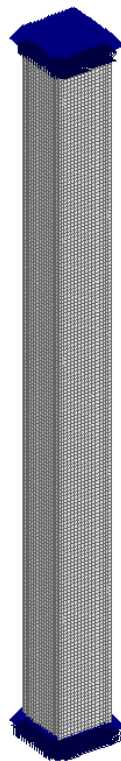


Slika 4.1: Prikaz spriječenog pomaka u čvorovima čelične pločice s gornje strane stupa u smjeru X i Y -oznaka(1,2)

*Napomena: Oznaka 1- spriječen pomak u X smjeru, 2- spriječen pomak u Y smjeru, 3- spriječen pomak u Z smjeru glavnih osi*



Slika 5.2: Prikaz spriječenog pomaka u čvorovima čelične pločice s donje strane stupa u svim smjerovima (X,Y,Z) -oznaka (1,2,3)



Slika 5.3: Prikaz pridržanja cijelog stupa (gornja i donja čelična pločica)

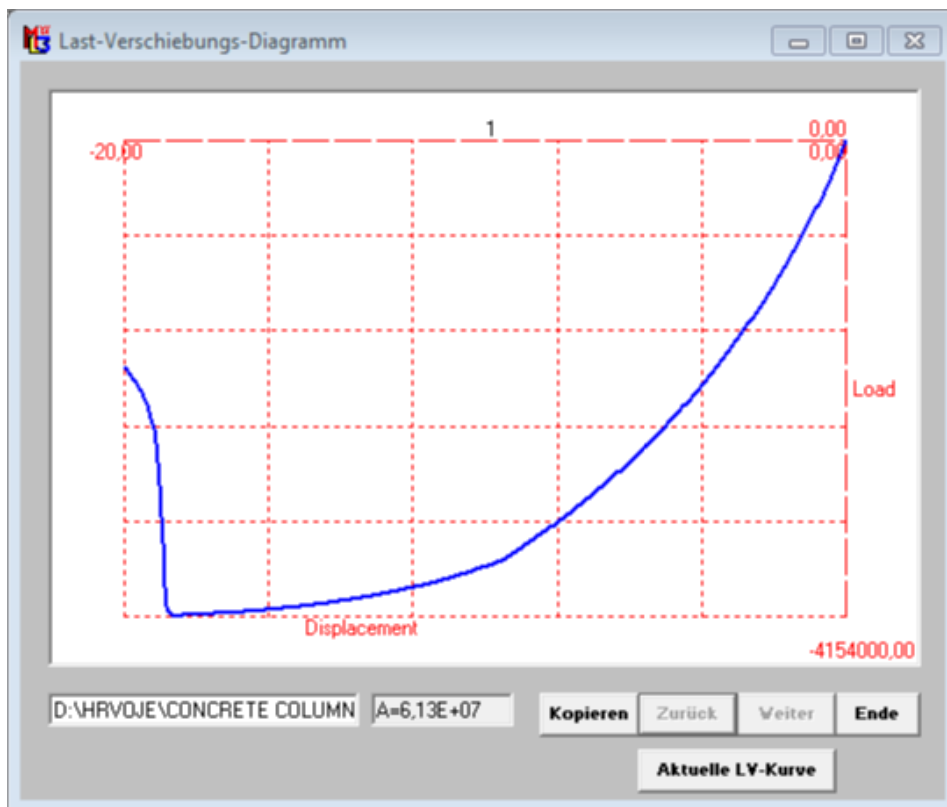
## **6. PRIKAZ I USPOREDBE REZULTATA**

U ovom poglavlju će se prikazati analize i rezultati armiranobetonskog stupa za slučajeve opterećenja silom i temperaturom prema eksperimentu [2]. Prikazani su rezultati za validacijske slučajeve stupa A i B, te parametarska studija stupa A u kojoj je promatrano kako promjena duljine djelovanja požara i iznosa opterećenja utječe na stup.

### **6.1. Model opterećen samo pomakom**

Ovaj slučaj služi da bi se odredila inicijalna nosivost stupa, tj. maksimalnu nosivost koju stup može podnijeti u normalnim okolnostima bez djelovanja požara i ostalih izvanrednih opterećenja.

### 6.1.1. Prikaz nosivosti za osnovni model



Slika 6.1: Prikaz dijagrama pomak (mm) - sila (N) (displacement - load)  
(opterećivanje samo pomakom bez djelovanja visokih temperatura)

Prikazani dijagram prikazuje prirast sile i pomaka do sloma armiranobetonskog stupa modeliranog u programu Femap i proračunatog u programu MASA.

Iz dijagrama se može očitati da inicijalna nosivost stupa iznosi 4154kN u trenutku sloma. To je maksimalna nosivost i djelovanje temperature će samo umanjiti taj iznos, a zadatak je odrediti u kolikoj mjeri će to iznositi.

## 6.2. Prikaz rezultata modela opterećenih visokom temperaturom i silom

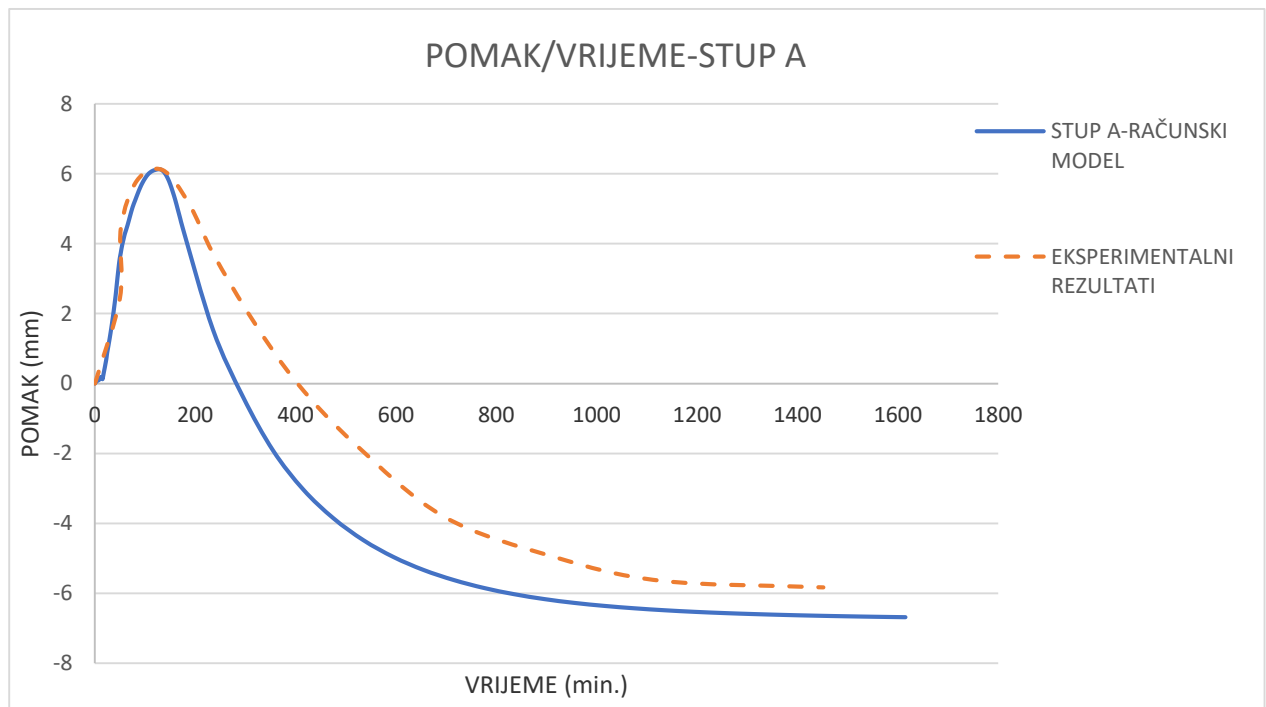
Ovdje će se prikazati rezultati dijagrama pomak-vrijeme, pomak-opterećenje, tečenje armature kao i pukotine armiranobetonskog stupa uzrokovane djelovanjem temperature. Pukotine će se prikazivati za središnji poprečni presjek stupa, za jednu četvrtinu stupa kao i za cijeli stup. Isto tako će se prikazati temperature u karakterističnim točkama poprečnog presjeka stupa kroz vrijeme djelovanja požara.

### 6.2.1. Rezultati za validacijski slučaj stupa A

Ovakva konstrukcija je analizirana eksperimentalno u radu [2]. Stup A je opterećen početnim iznosom sile od 25% inicijalne nosivosti stupa (točnije 992kN) prije djelovanja požara i nakon toga samim požarom u iznosu od 60 minuta. Nakon požara stup je linearno hlađen po krivulji hlađenja koja je predviđena za to vrijeme djelovanja požara ( $dT/dt=250(3-t_h)$  °C/h) koja vrijedi za požare koji traju od 30 minuta do 120 minuta. [2]

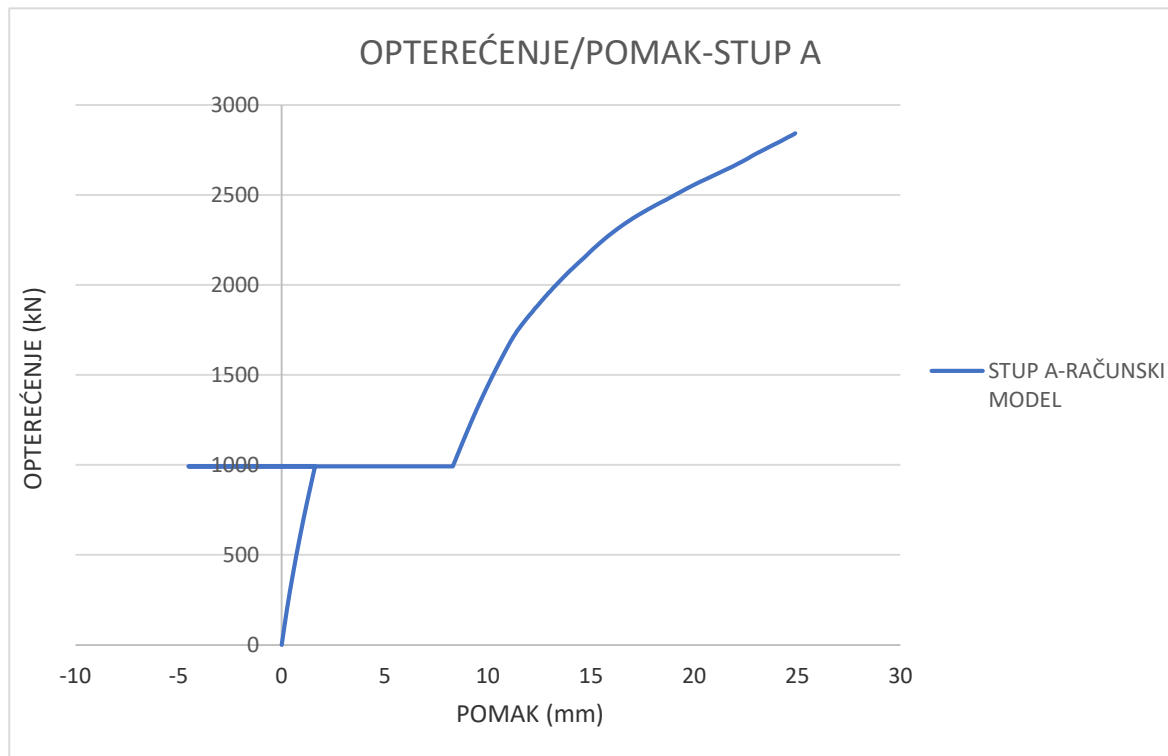
Prema toj krivulji se mora stup linearno hladiti 115 minuta, a nakon toga je ostavljen na sobnoj temperaturi od 20°C da se potpuno ohladi u svom cijelom volumenu. Nakon što se stup potpuno ohladio nastavljeno je povećavanje opterećenja silom na njega u inkrementima od 10kN do njegovog konačnog sloma. [2] U nastavku će biti prikazan dijagram pomaka stupa kroz vrijeme požarnog procesa kao i dijagram pomaka stupa nakon požarnog procesa pri povećanju opterećenja silom do njegovog konačnog sloma. Prikazati će se postupak tečenja armature kroz vrijeme požarnog procesa stupa do njegovog sloma. Isto tako će se prikazati pukotine u stupu kako se propagiraju s vremenom požarnog procesa iz različitih pogleda (poprečni presjek stupa, jedna četvrtina stupa, cijeli stup). Konačno će se prikazati distribucija temperature u vremenu požarnog procesa u promatranim točkama stupa i uspoređivati se s eksperimentalnim rezultatima.

***(zagrijavanje 60min. + linearno hlađenje 115min. + konstantno hlađenje 1440min.)***



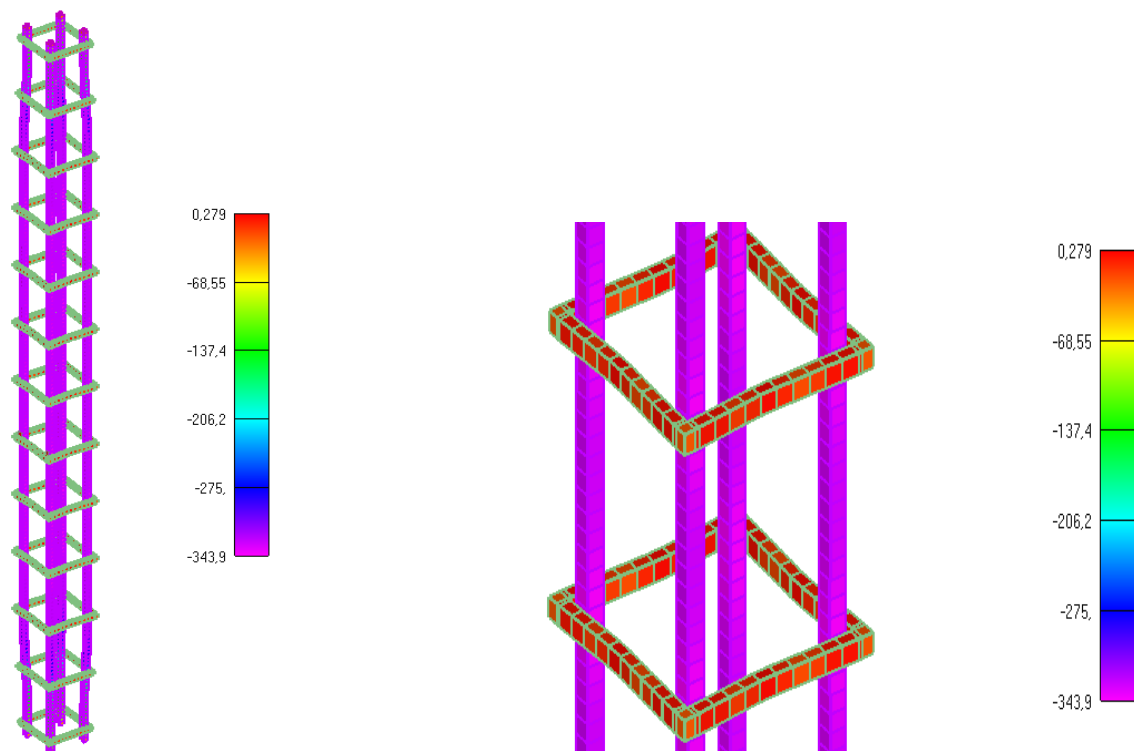
Slika 6.2: Prikaz dijagrama (pomak-vrijeme) za stup A

Prikazani dijagram opisuje kako se osni pomak stupa mijenja s vremenom tijekom požarnog procesa. Na početku se vidi kako usred djelovanja požara stup ekspandira, a nakon toga prilikom procesa hlađenja dolazi do sabijanja stupa. Vidi se i usporedba eksperimentalnog procesa i računskog modela, te njihovo dosta dobro poklapanje osobito u prvoj fazi djelovanja požara. Puna plava linija predstavlja računski model, a narančasta isprekidana linija predstavlja eksperimentalne rezultate.

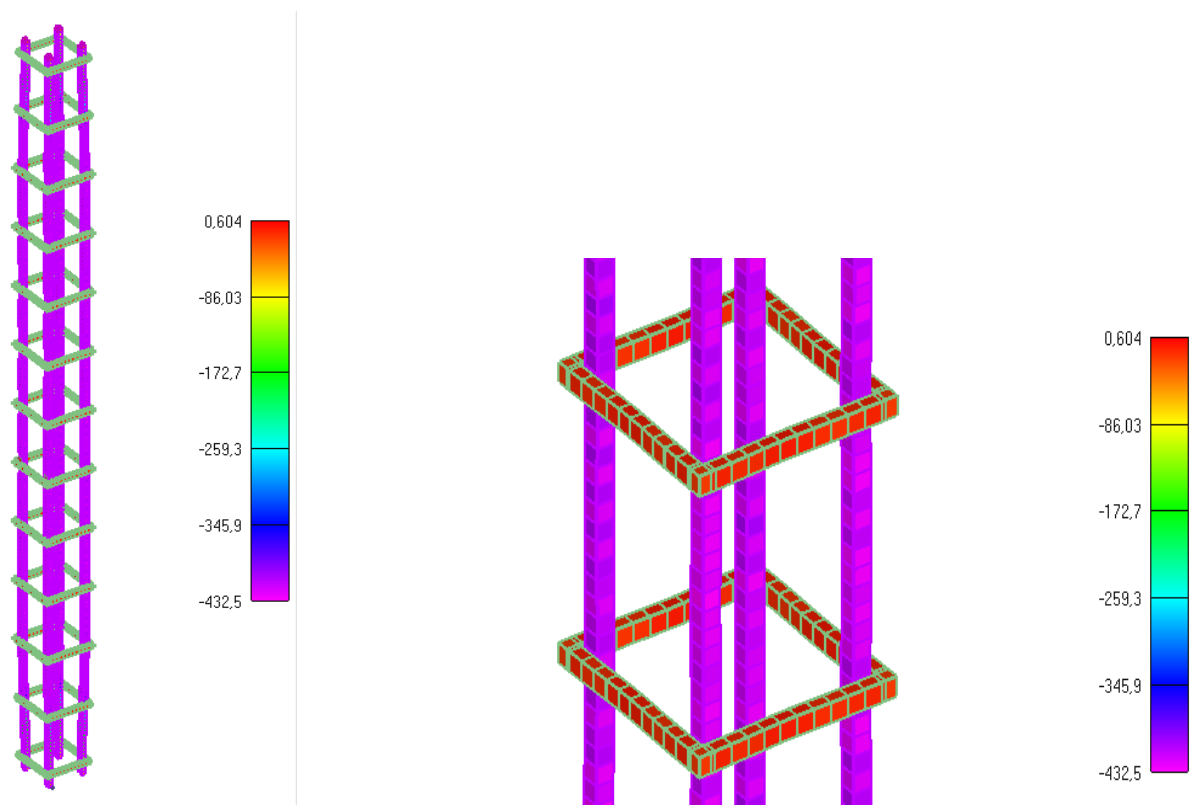


Slika 6.3: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) za stup A

Prikazani dijagram opisuje kako se osni pomak stupa mijenja s djelovanjem opterećenja. Sila djeluje u iznosu od 25% od inicijalne nosivosti stupa, nakon sile djeluje požar i na kraju nakon što je stup ohlađen postupno se povećava sila u inkrementima do konačnog sloma stupa. Na dijagramu se može vidjeti kako je nagib krivulje (krutost) stupa drastično smanjena nakon što je na stup djelovao požar. Prikazani stup se slomio pri opterećenju od 2842kN, dok mjerena eksperimentalna čvrstoća stupa iznosi 2671kN što je poprilično dobro poklapanje stvarnog i eksperimentalnog modela.

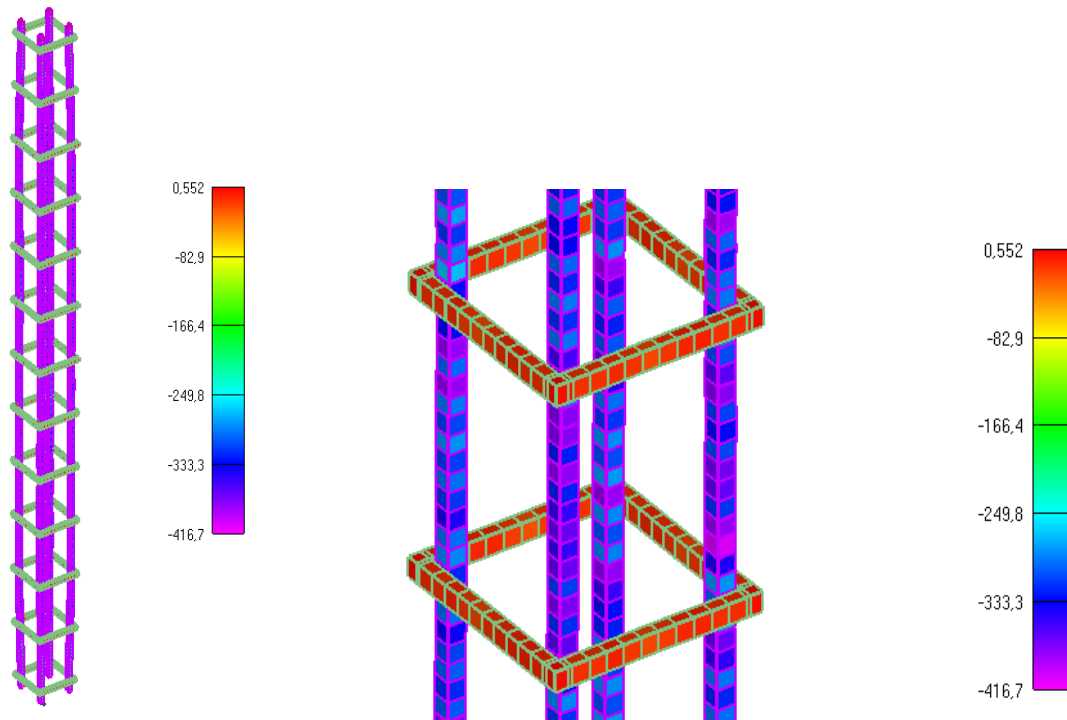


Slika 6.4: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 30min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

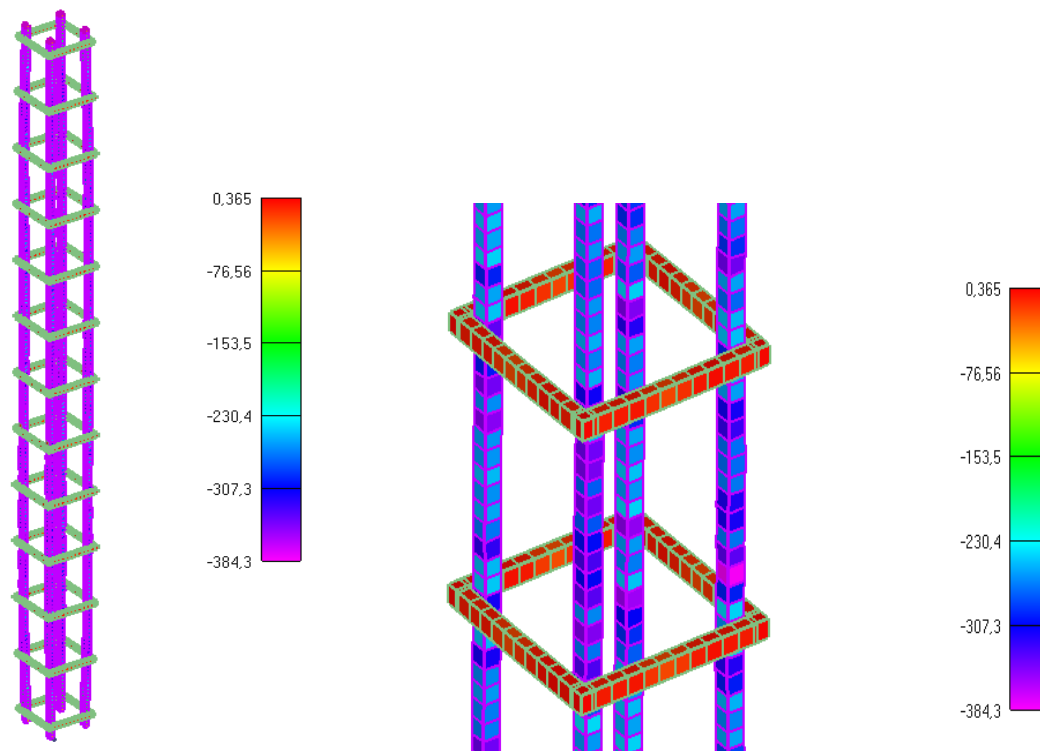


Slika 6.5: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 60min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA

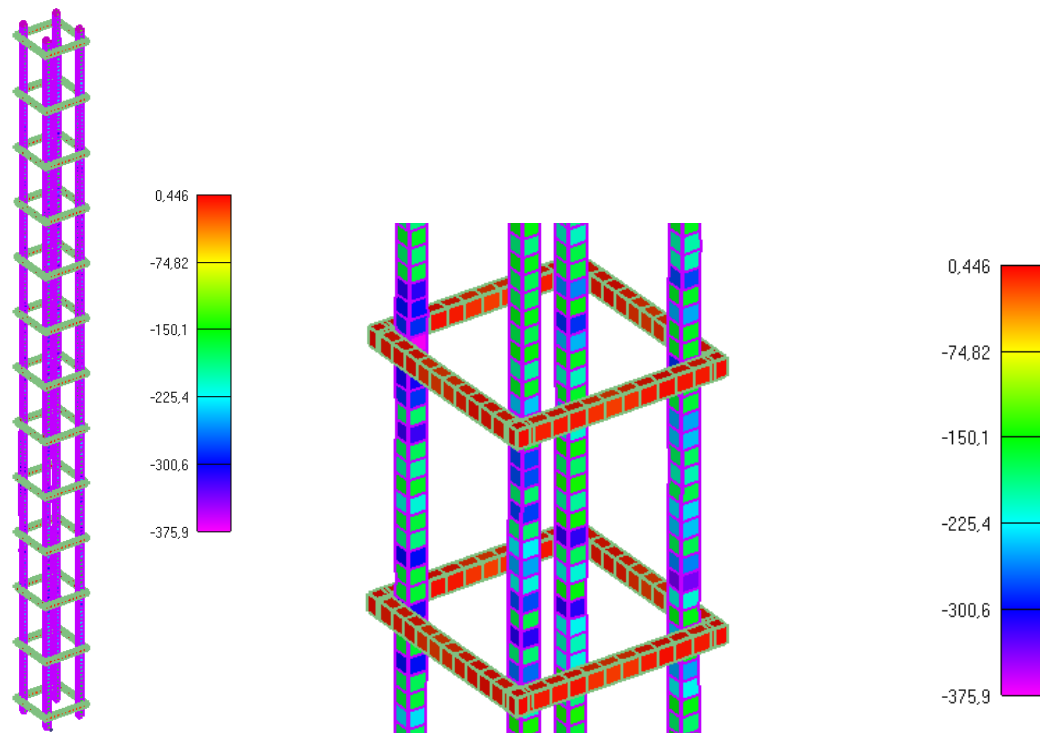




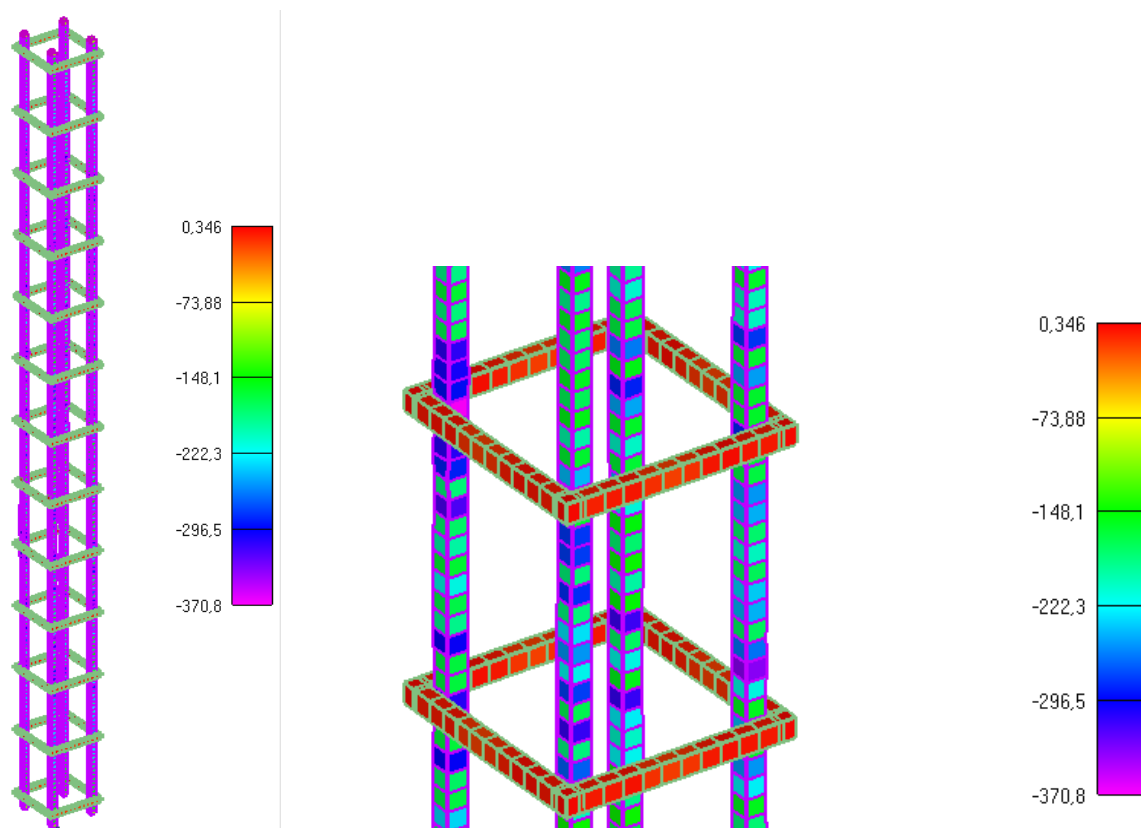
Slika 6.6: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 115min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



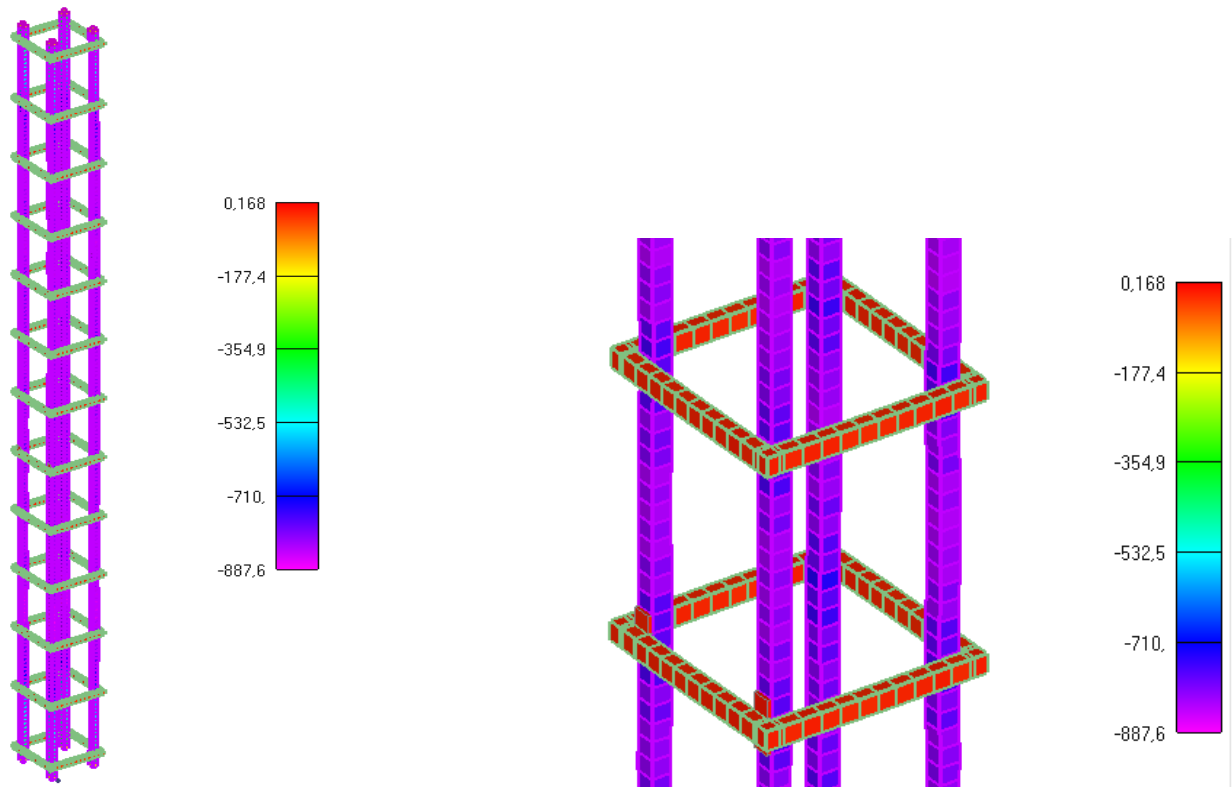
Slika 6.7: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 175min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*



Slika 6.8: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 895min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

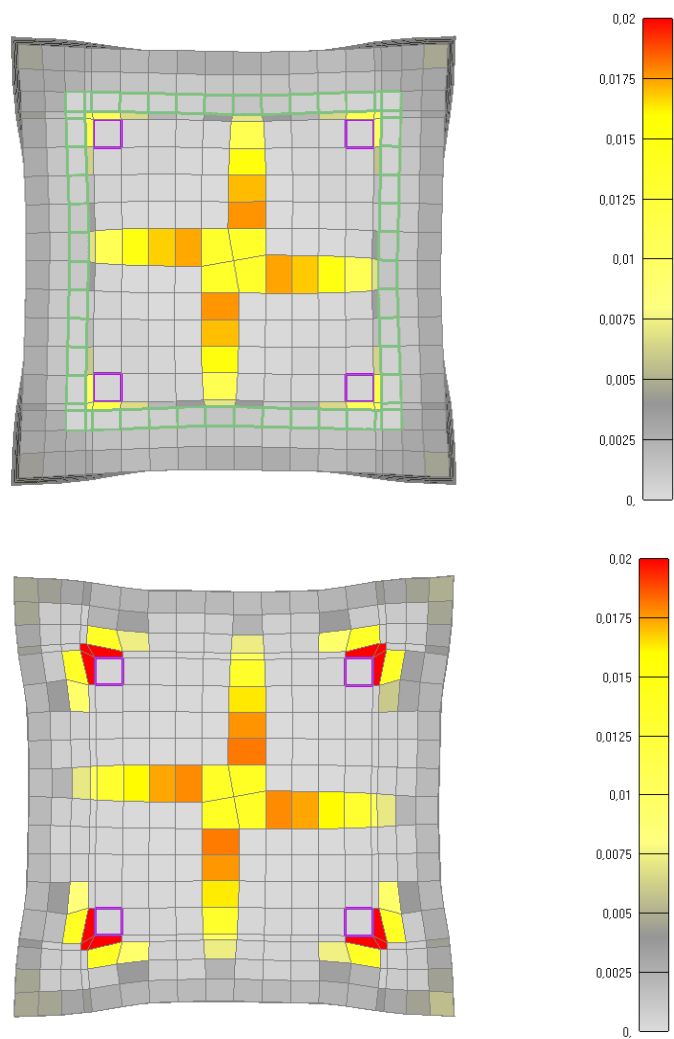


Slika 6.9: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 1615min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ POŽARNOG PROCESA

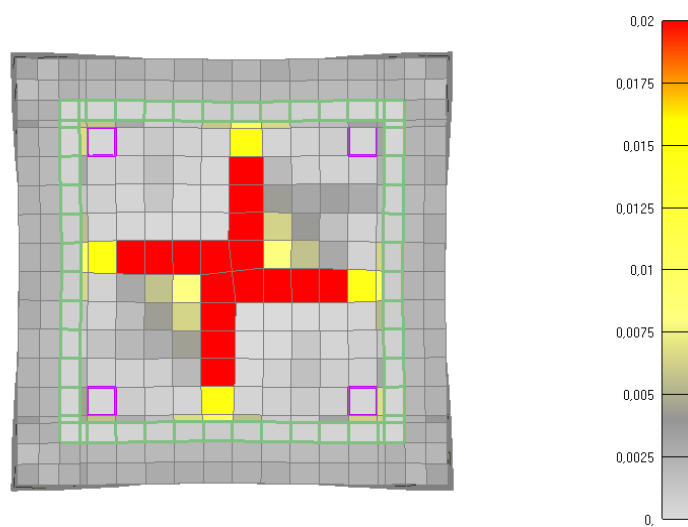


Slika 6.10: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

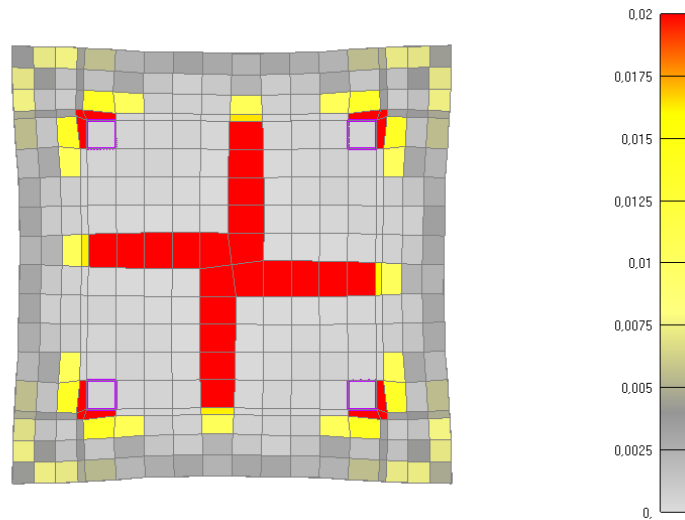
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



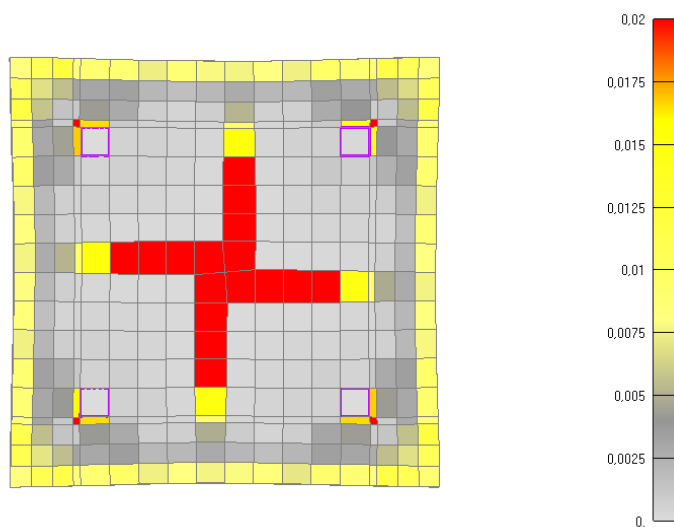
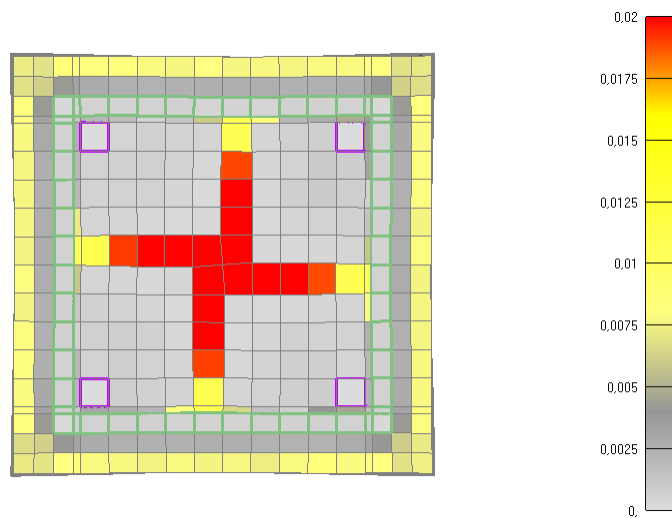
Slika 6.11: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



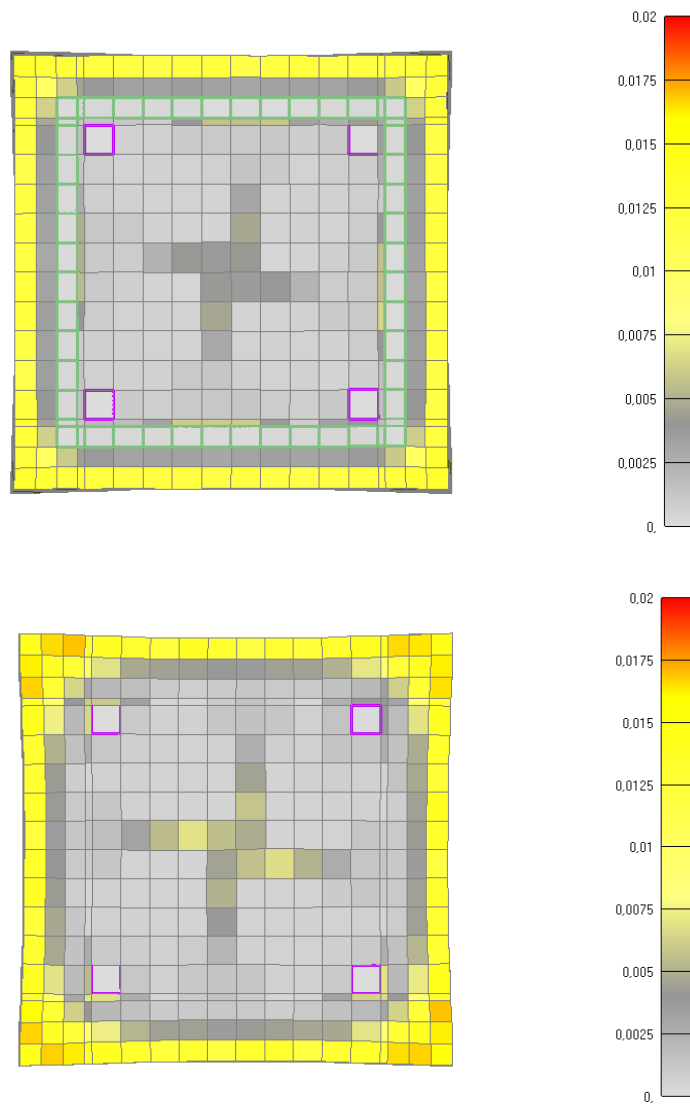
Slika 6.12: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



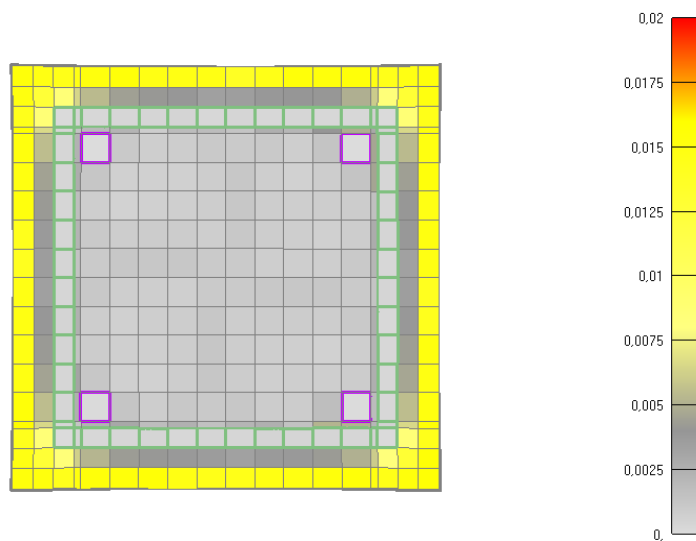
Slika 6.13: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLADENJA)



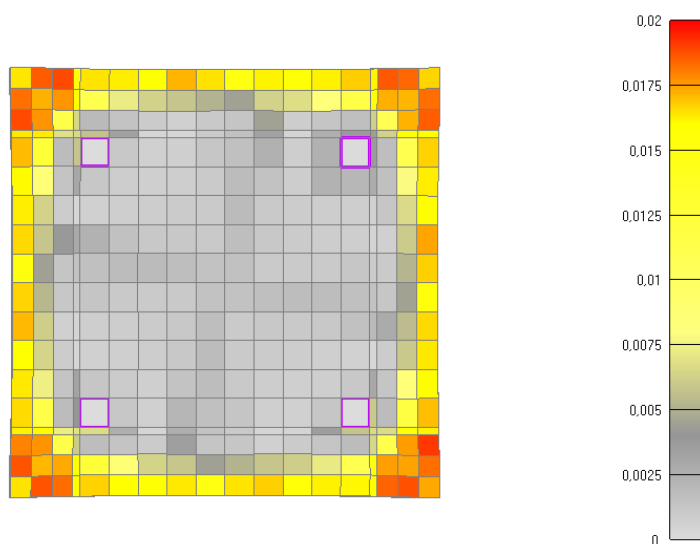
Slika 6.14: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 115 minuta (gore-sa sponama, dolje-bez spona)



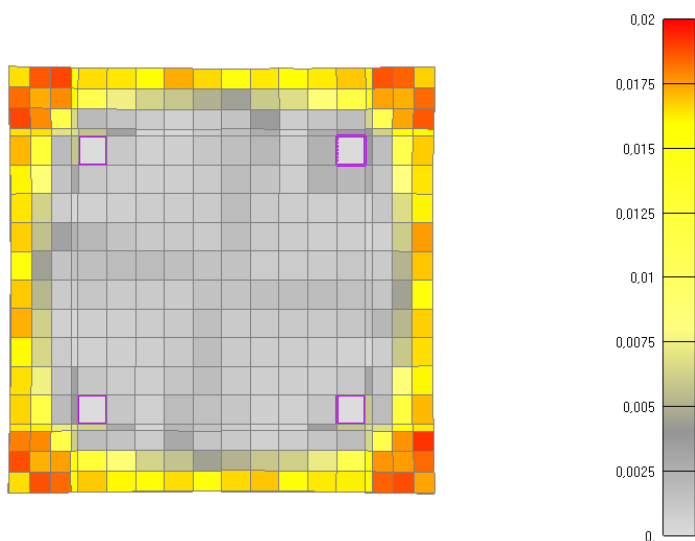
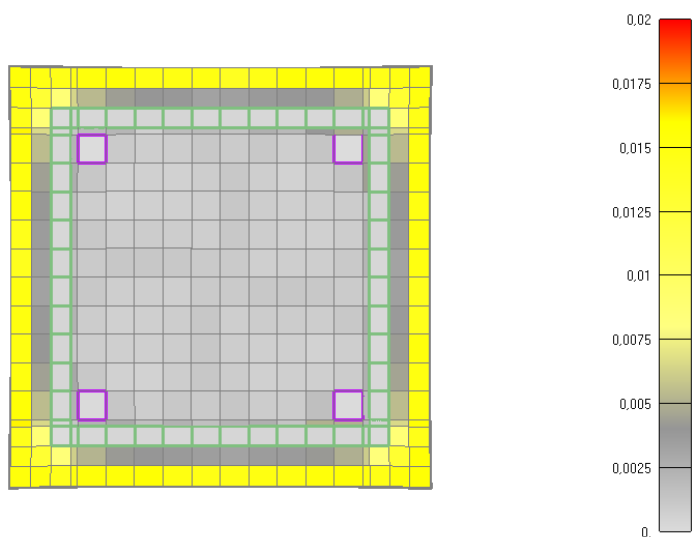
Slika 6.15: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 175 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-**KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA**



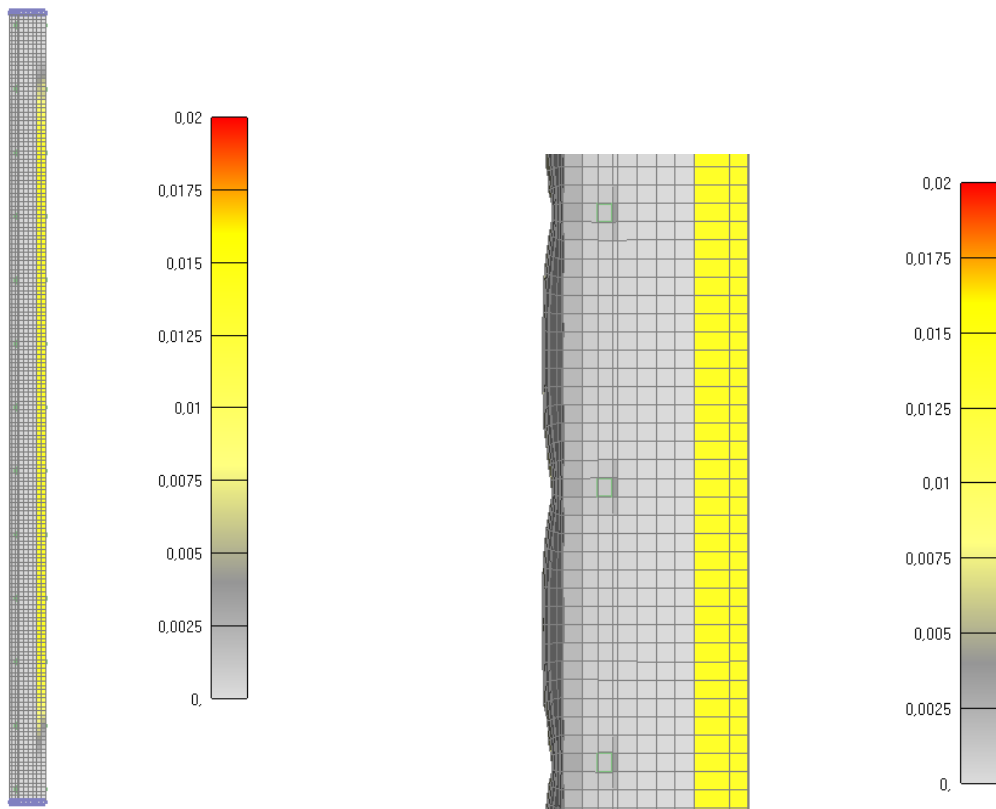
Slika 6.16: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta  
(sa sponama)



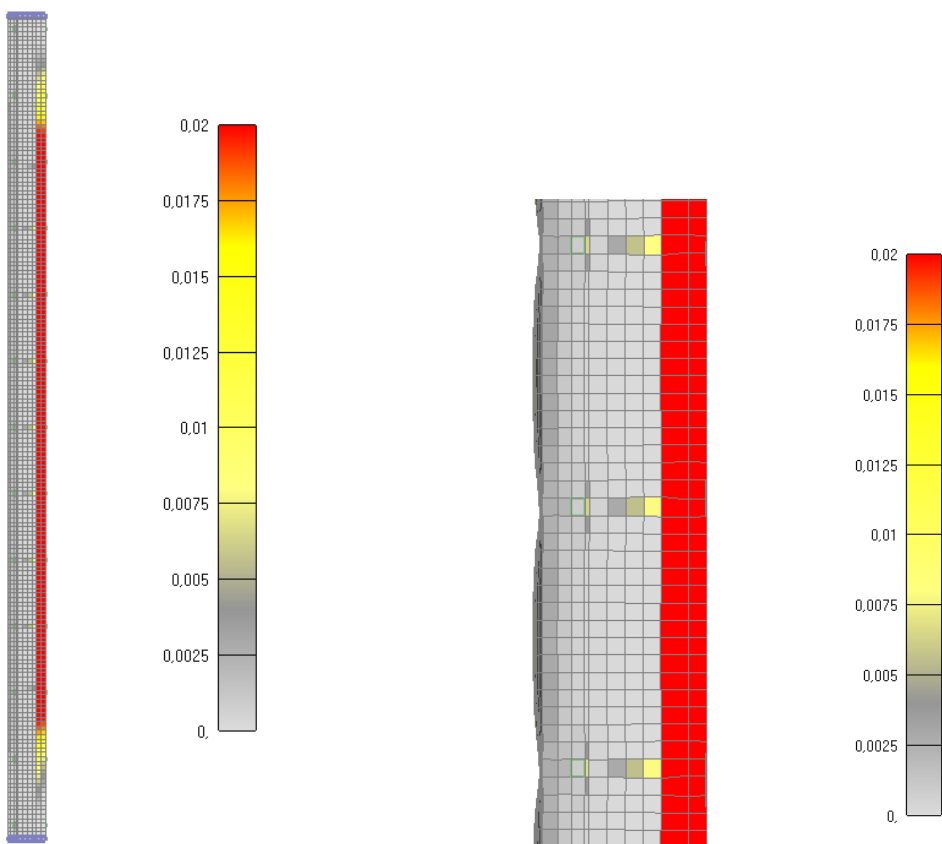
Slika 6.17: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta  
(bez spona)



Slika 6.18: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1615 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

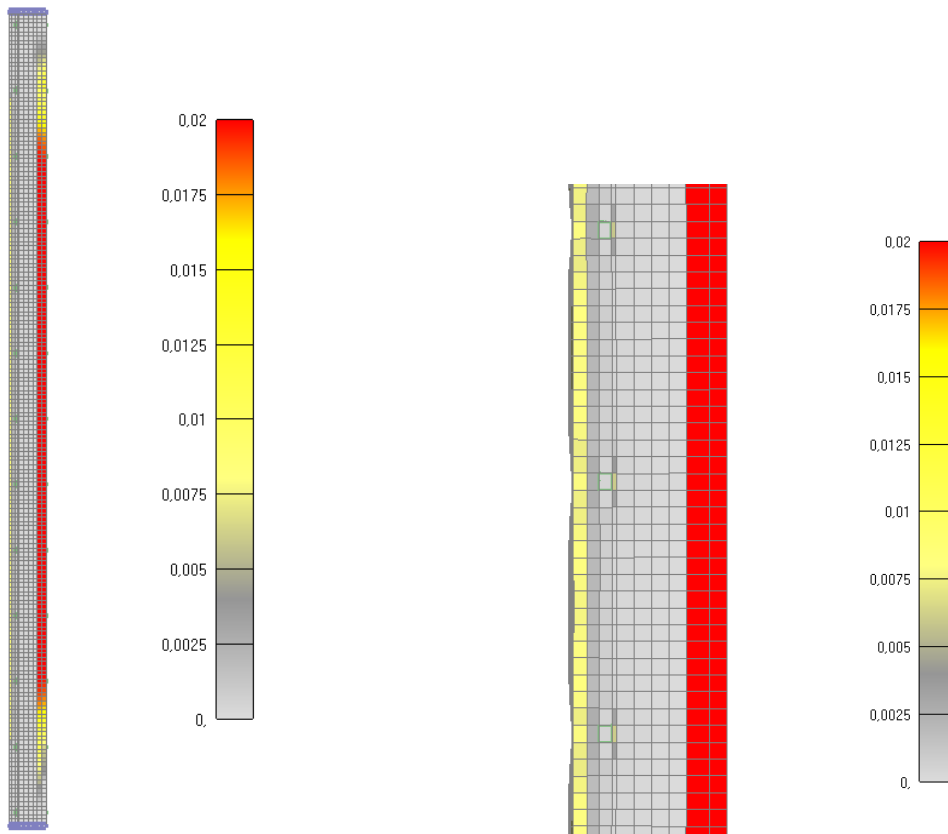


Slika 6.19: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

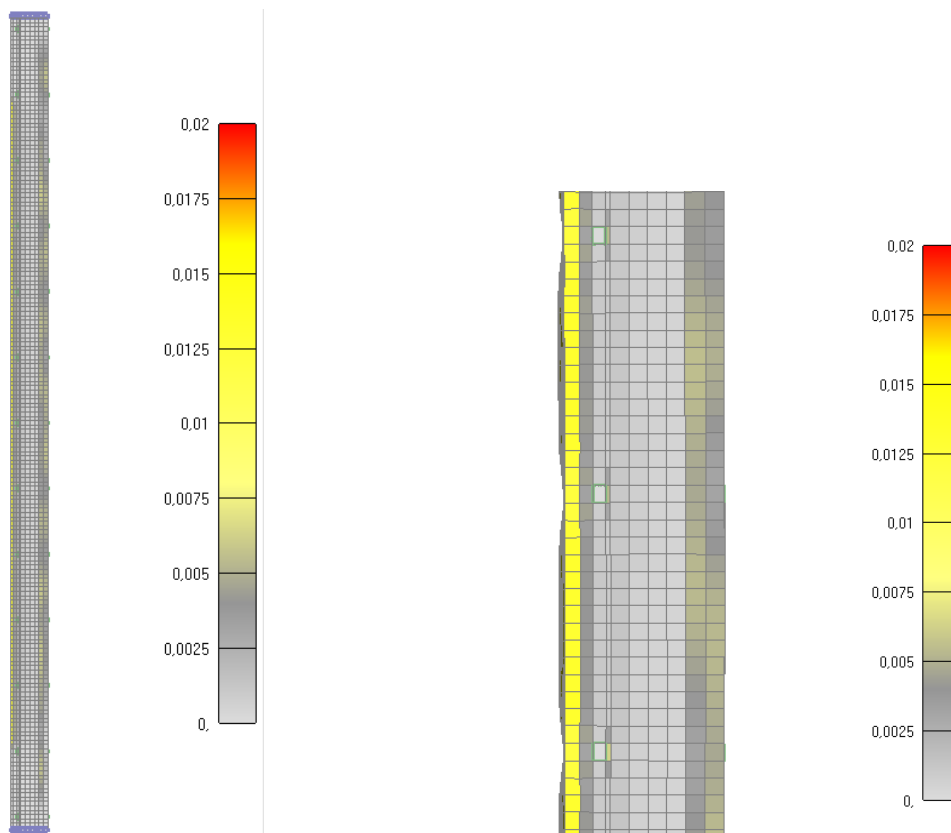


Slika 6.20: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA

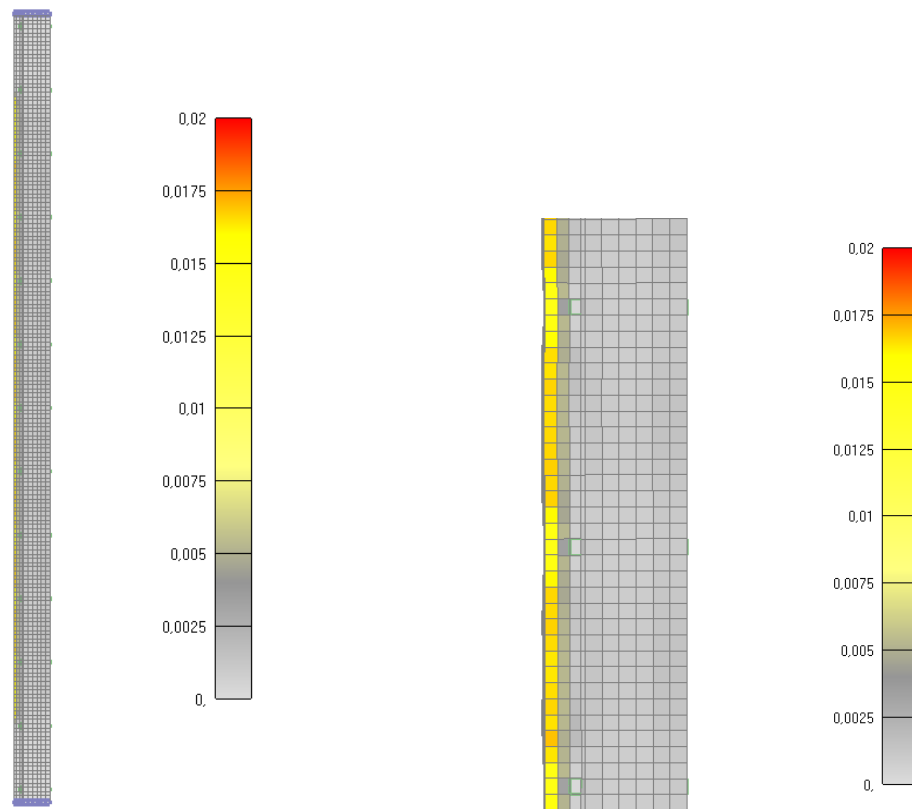




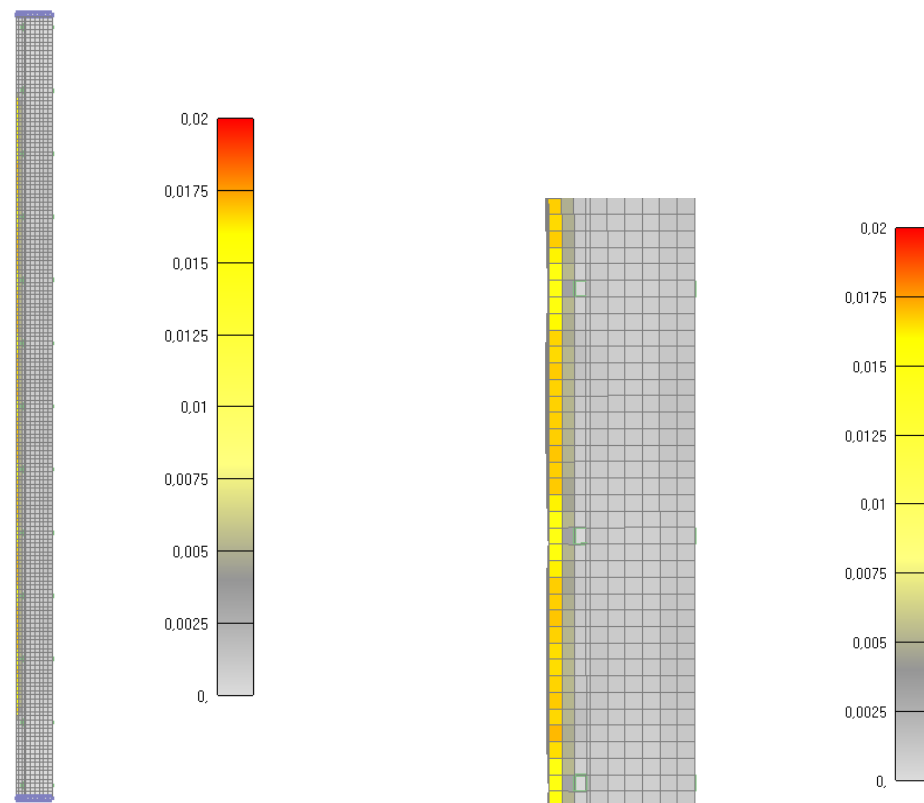
Slika 6.21: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 115 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



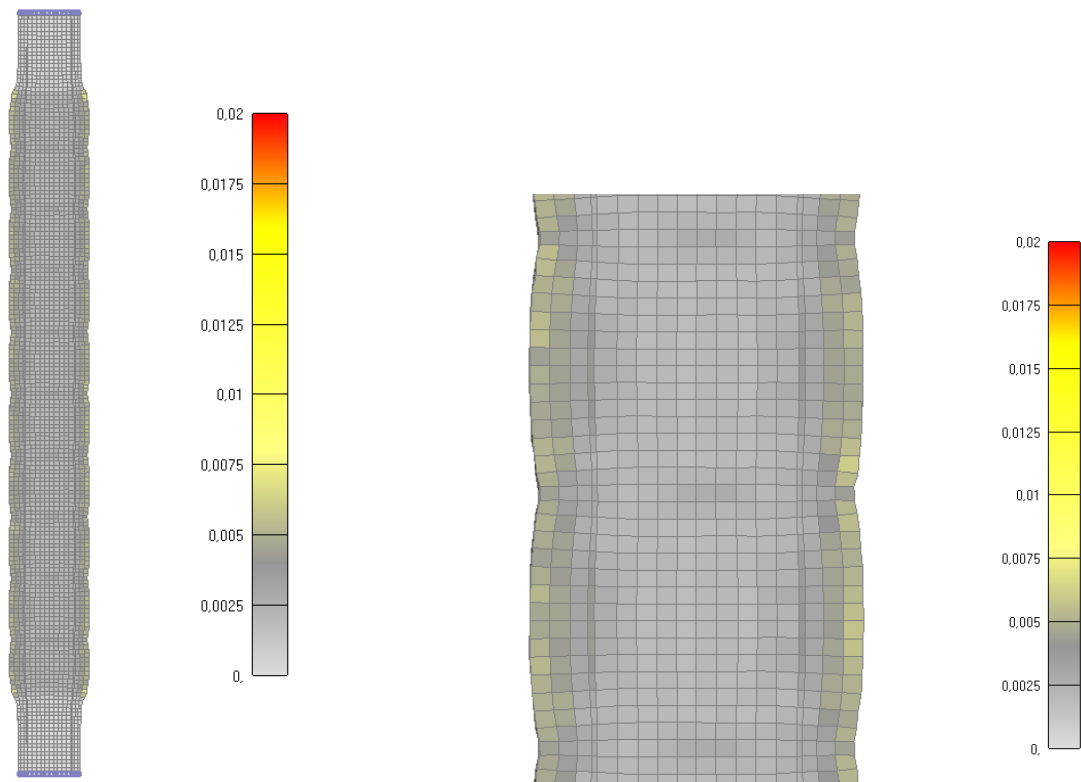
Slika 6.22: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 175 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA



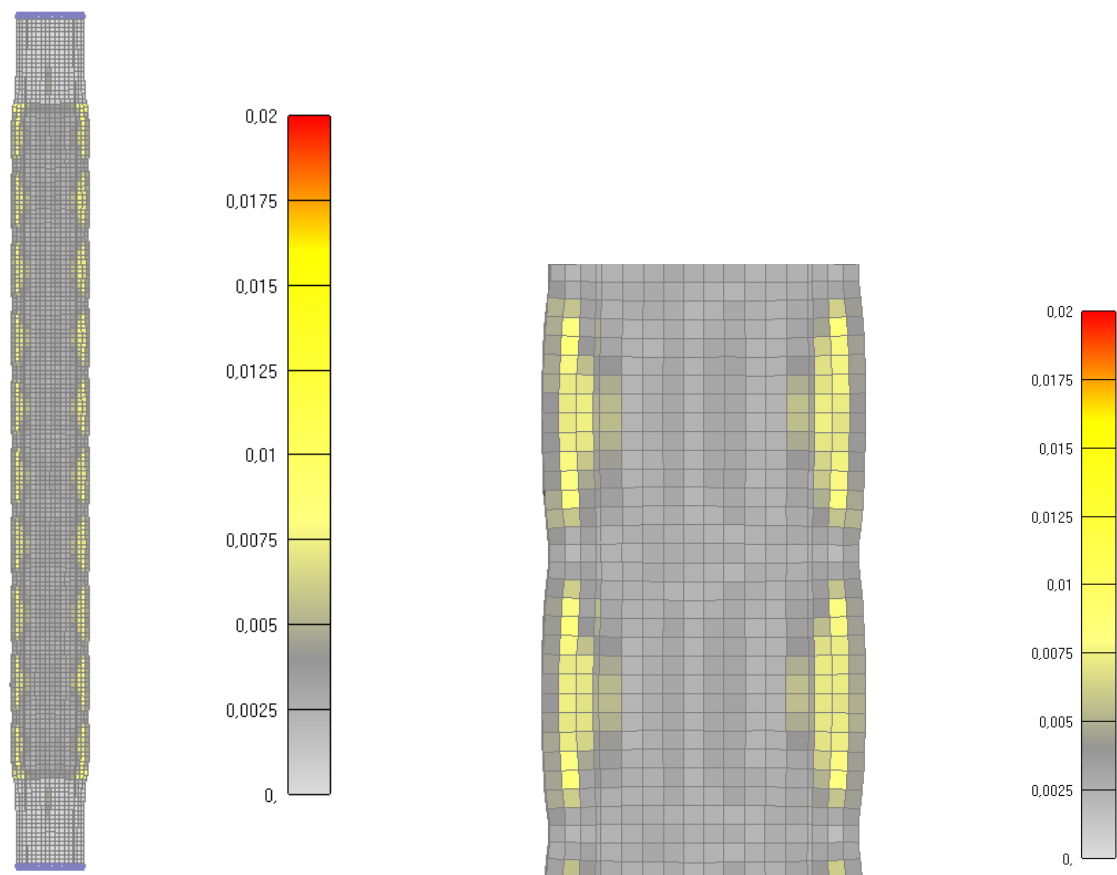
Slika 6.23: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 895 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



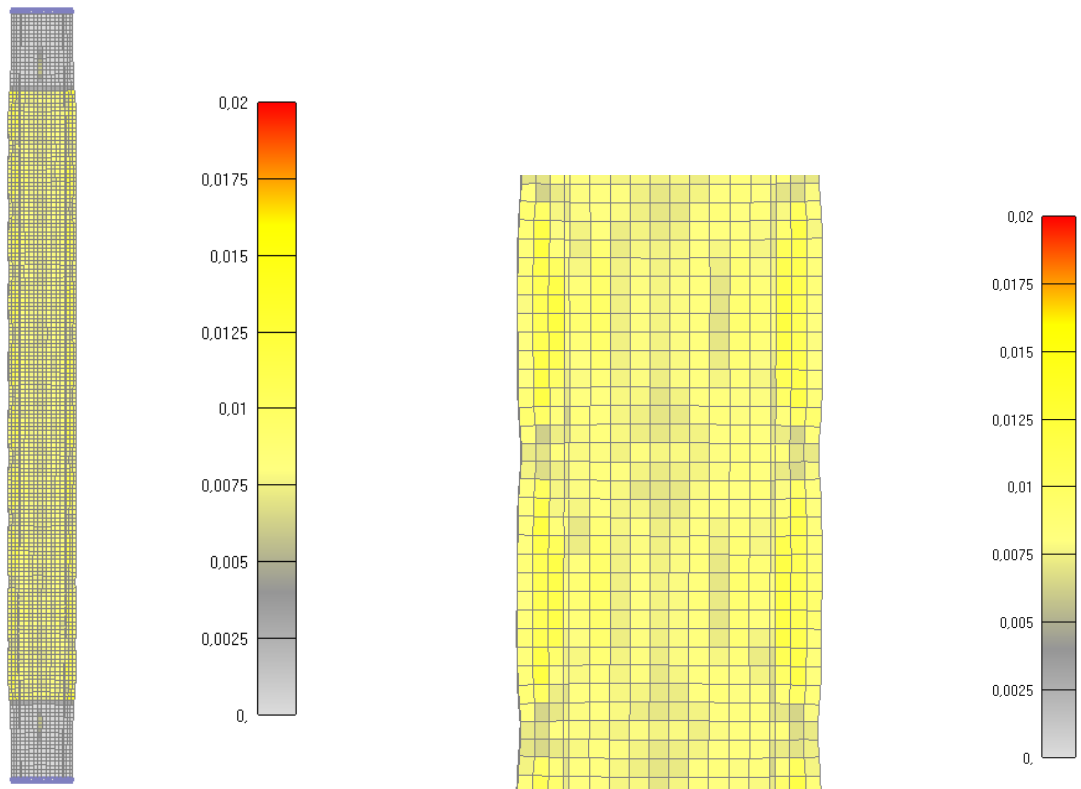
Slika 6.24: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1615 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



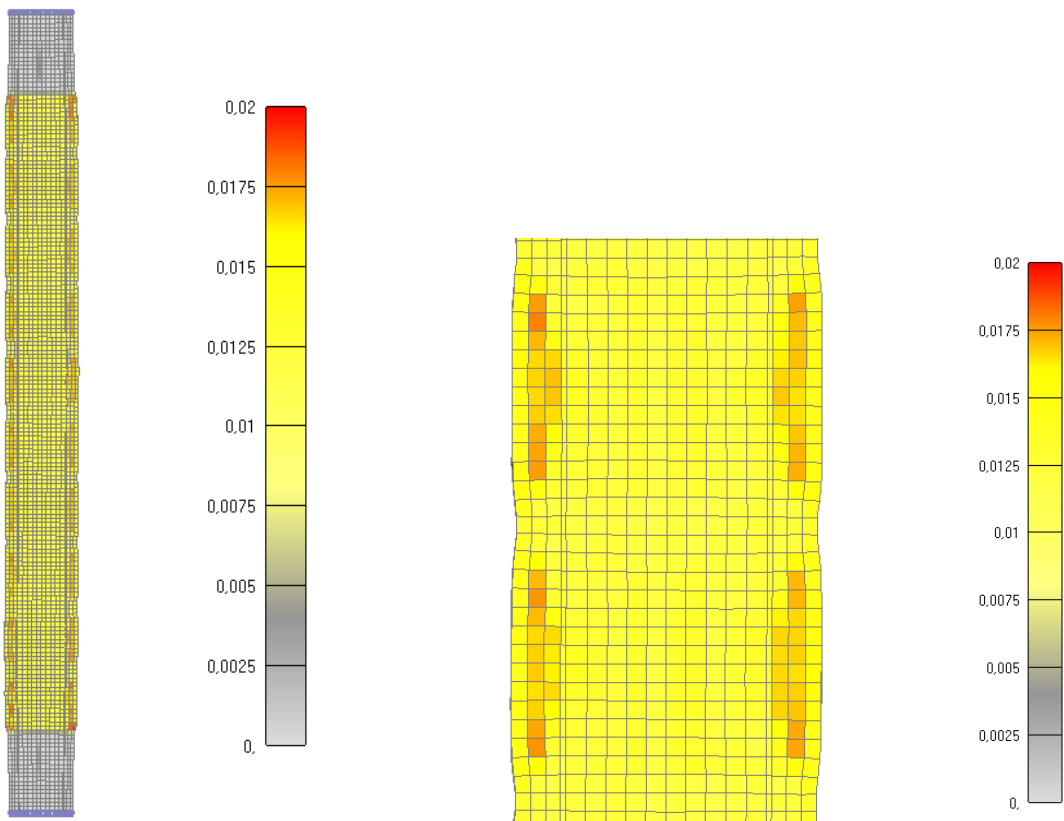
Slika 6.25: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



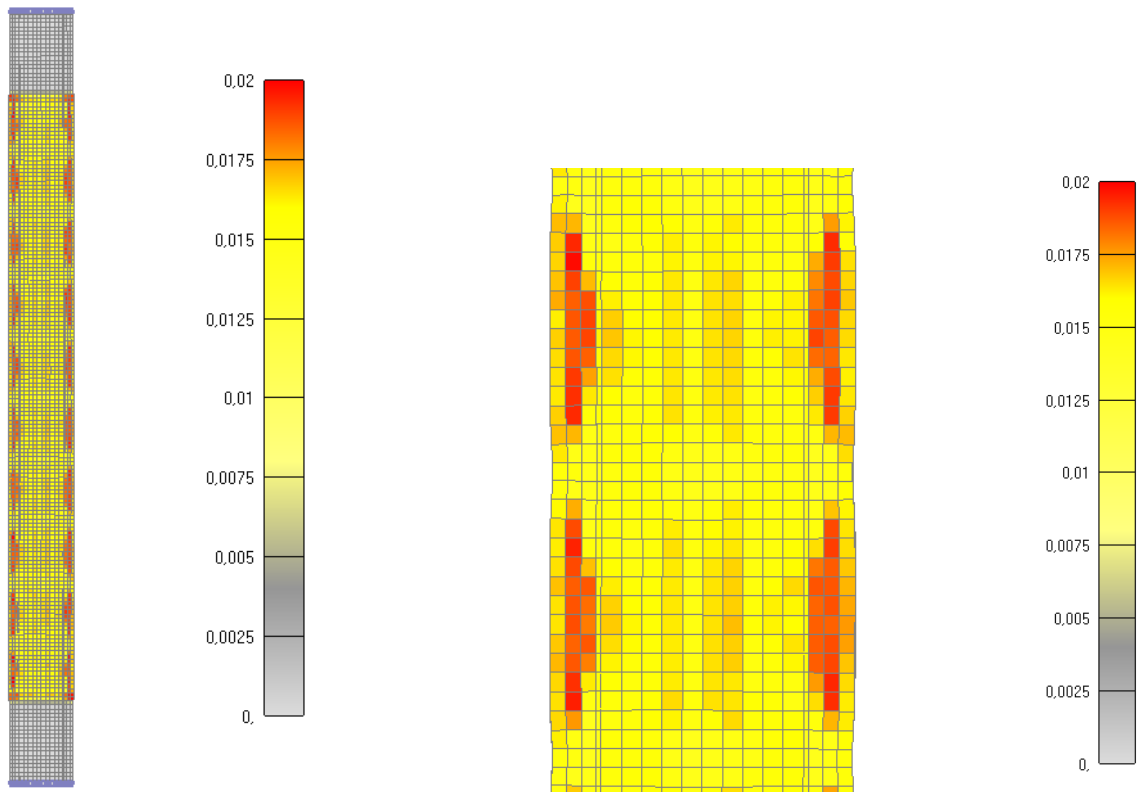
Slika 6.26: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA



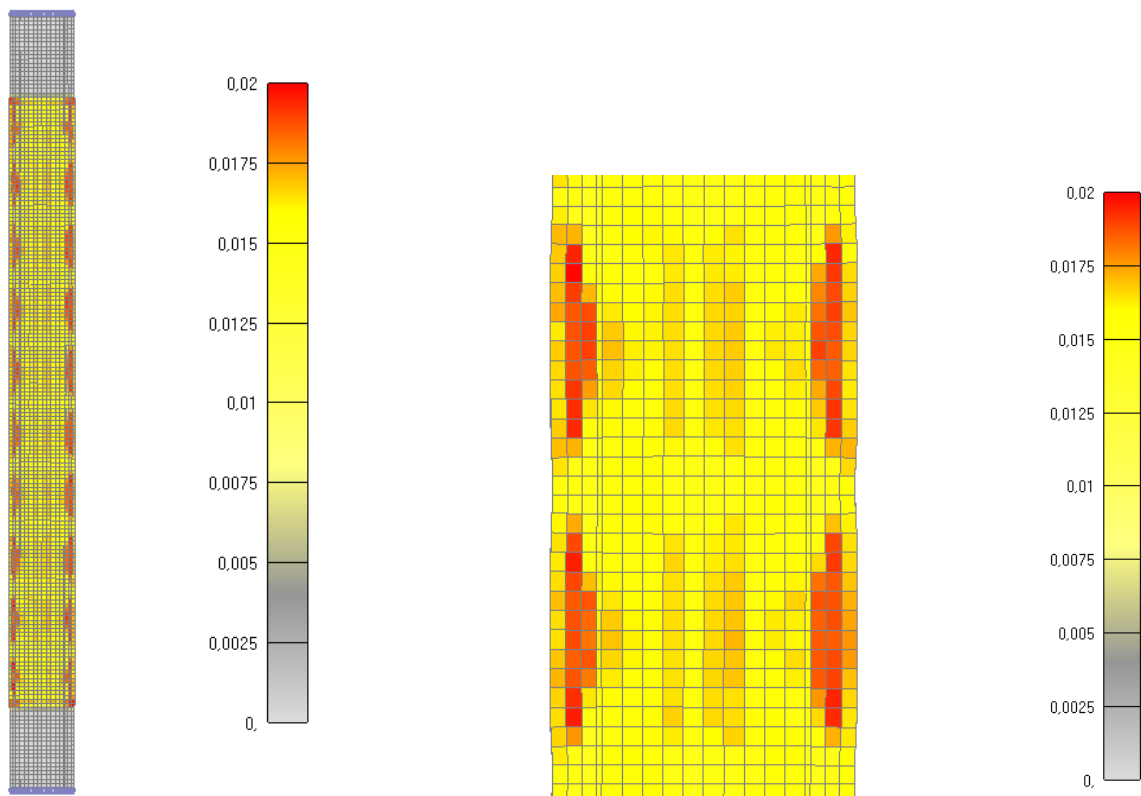
Slika 6.27: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 115 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



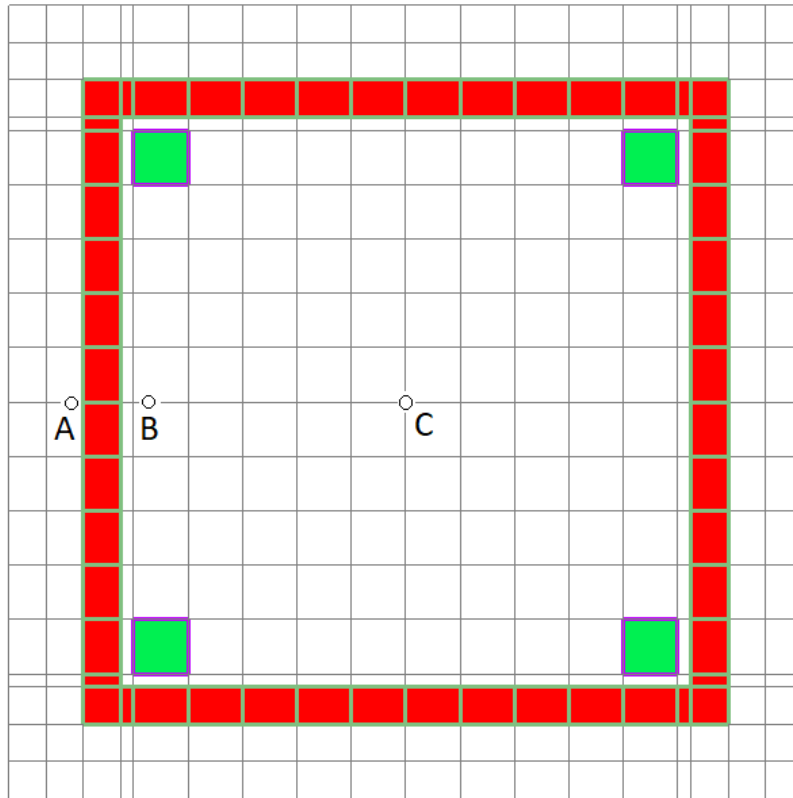
Slika 6.28: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 175 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.29: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 895 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



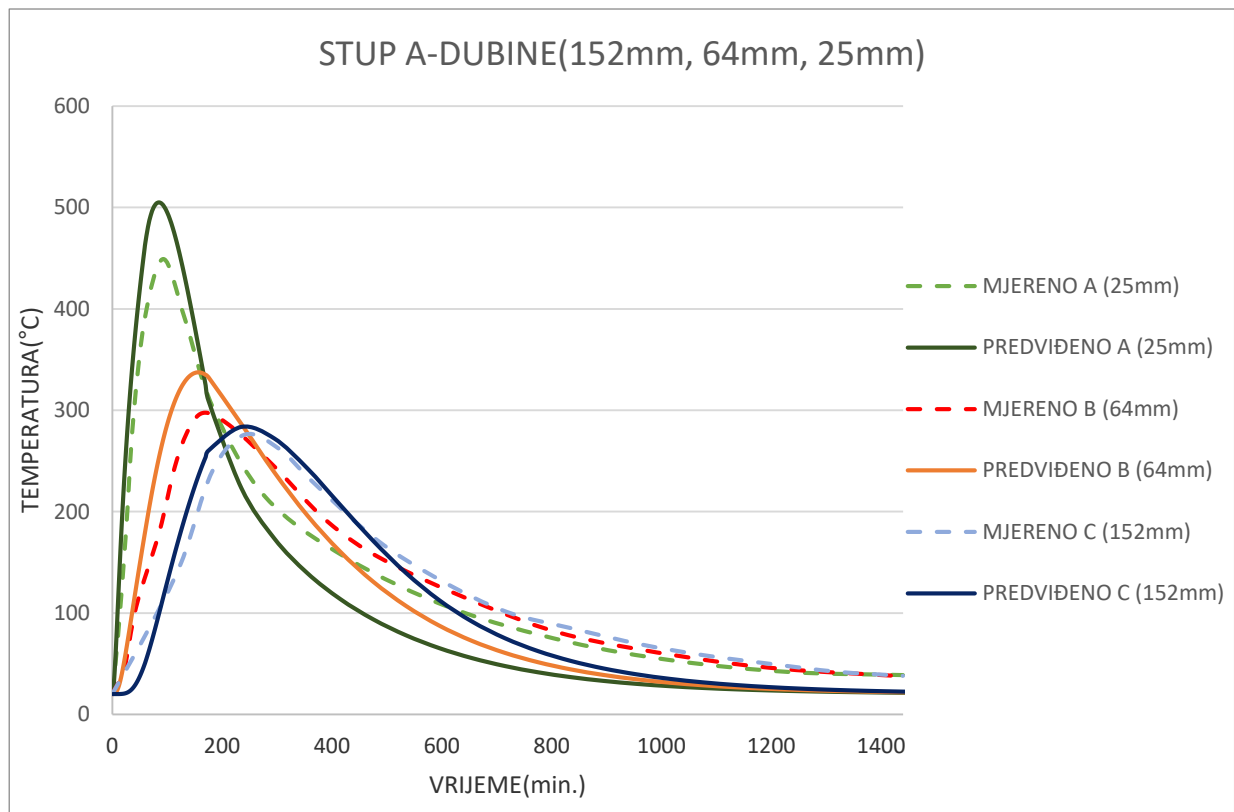
Slika 6.30: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1615 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



Slika 6.31: Prikaz promatranih točaka za distribuciju temperature

Na slici 6.31 su prikazane točke A, B i C u kojima se promatra distribucija temperature. Točka A se nalazi na dubini 25mm od površine stupa, točka B se nalazi na dubini 64mm od površine stupa, a točka C se nalazi u centru stupa. U njima se promatra distribucija temperature za vrijeme požarnog procesa(grijanja i hlađenja stupa). Cilj je bio da se računaska distribucija u tim točkama poklapa s eksperimentalnom(mjerenom) distribucijom prema eksperimentu. U nastavku će se prikazati dobivene krivulje za cijeli požarni proces.

(60min. zagrijavanja +115min. linearnog hlađenja + 1440min. konstantnog hlađenja). [2]



Slika 6.32: Prikaz dijagrama distribucije temperature

Iz prethodnog dijagrama se vidi da se predviđene temperature u promatranim točkama dosta dobro poklapaju s temperaturama izmjenjenim na modelu u stvarnosti osobito u dijelu gdje se stup zagrijava. Mala odstupanja su u dijelu hlađenja i na samom kraju procesa gdje se stup prema eksperimentu [2] nije potpuno ohladio na sobnu temperaturu, dok je u modelu predviđeno da će biti ohlađen na 20°C u svom cijelom volumenu. Isto tako se može vidjeti da se najviše temperature tijekom požara postižu u točki A zbog toga što se ona nalazi najbliže površini stupa dok se najniže temperature postižu u točki C koja se nalazi u centru stupa. U točki A maksimalna temperatura iznosi nešto više od 500°C, dok je u točki C u centru stupa maksimalna temperatura negdje oko 280°C što je gotovo dvostruka razlika.

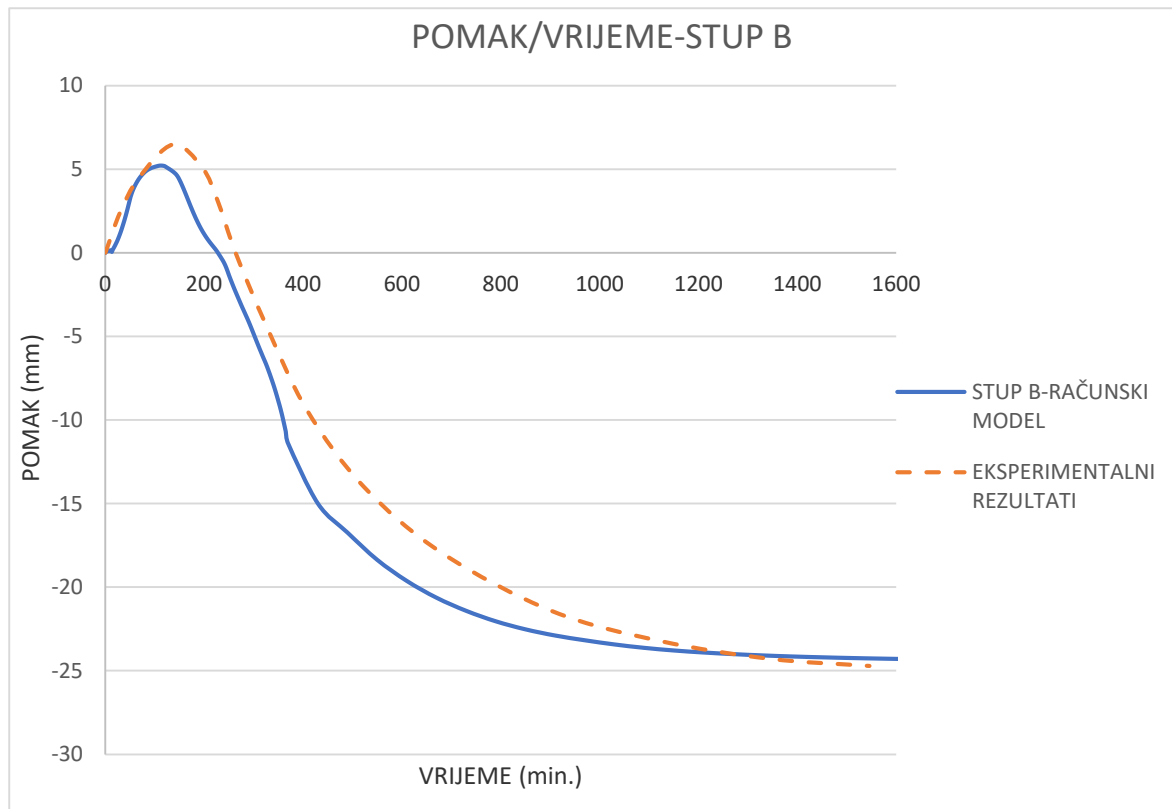
## 6.2.2. Rezultati za validacijski slučaj stupa B

Ovakva konstrukcija je analizirana eksperimentalno u radu [2]. Stup B je opterećen početnim iznosom sile od 25% inicijalne nosivosti (točnije 1022kN) prije djelovanja požara i nakon toga samim požarom u iznosu od 120 minuta. Nakon požara stup je linearno hlađen po krivulji hlađenja koja je predviđena za to vrijeme djelovanja požara ( $dT/dt=250\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ) koja vrijedi za požare koji traju 120 i više minuta. [2]

Prema toj krivulji je trebalo stup linearno hladiti 250 minuta, a nakon toga je ostavljen na sobnoj temperaturi od  $20^{\circ}\text{C}$  da se potpuno ohladi u svom cijelom volumenu. Nakon što se stup potpuno ohladio povećavalo se opterećenje silom na njega u inkrementima od 10kN do njegovog konačnog sloma. [2] U nastavku će se prikazati dijagram pomaka stupa kroz vrijeme požarnog procesa kao i dijagram pomaka stupa nakon požarnog procesa pri povećanju opterećenja silom do njegovog konačnog sloma. Prikazati će se postupak tečenja armature kroz vrijeme požarnog procesa stupa do njegovog sloma. Isto tako će se prikazati pukotine u stupu kako se propagiraju s vremenom požarnog procesa iz različitih pogleda (poprečni presjek stupa, jedna četvrtina stupa, cijeli stup). Konačno će se prikazati distribucija temperature u vremenu požarnog procesa u promatranim točkama stupa i uspoređivati s eksperimentalnim rezultatima.

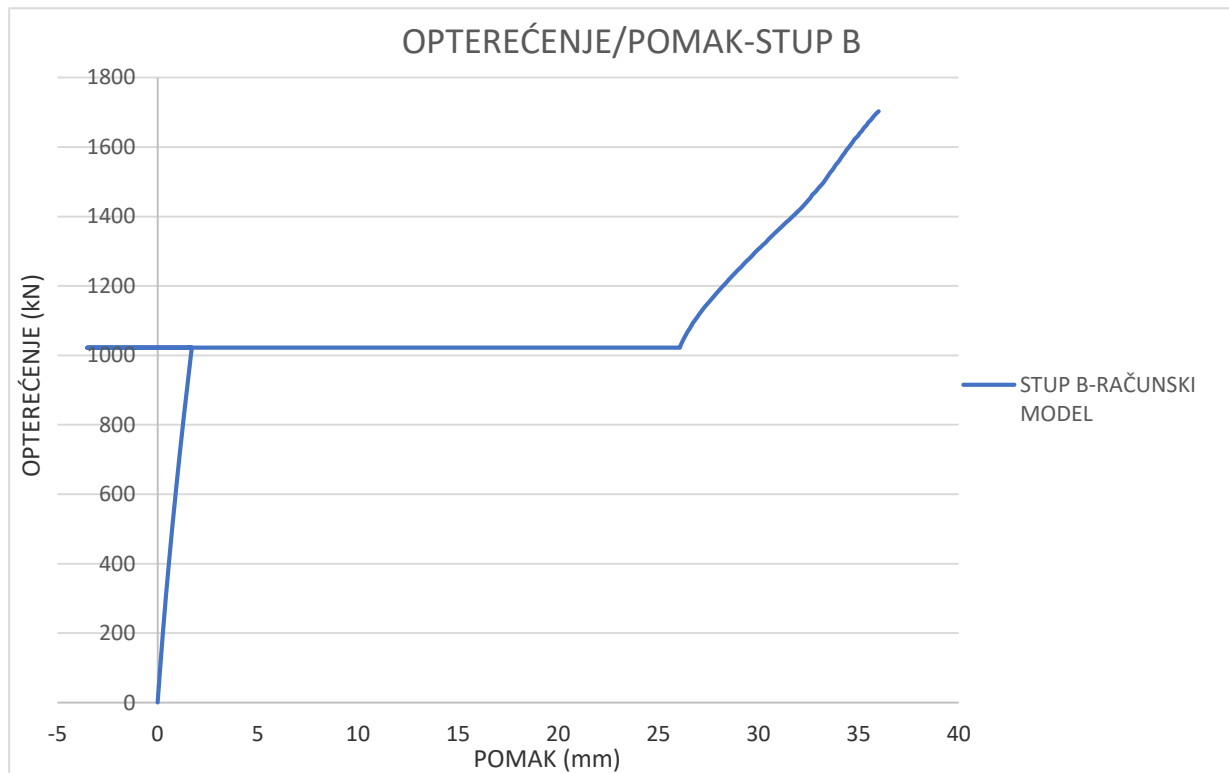
***(zagrijavanje 120min. + linearno hlađenje 250min. + konstantno hlađenje 1440min.)***





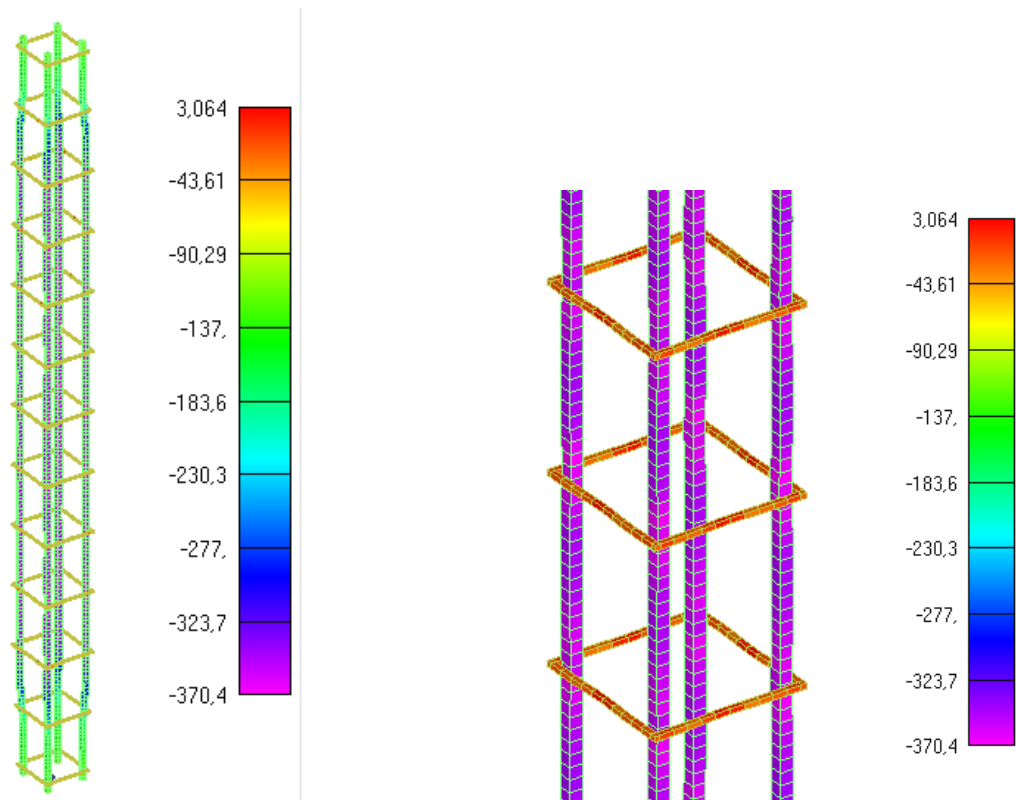
Slika 6.33: Prikaz dijagrama (pomak-vrijeme) za stup B

Prikazani dijagram opisuje kako se osni pomak stupa mijenja s vremenom tijekom požarnog procesa. Na početku se vidi kako usred djelovanja požara stup ekspandira, a nakon toga prilikom procesa hlađenja uz povećanje iznosa sile dolazi do sabijanja stupa. Vidi se i usporedba eksperimentalnog procesa i računskog modela, te njihovo jako dobro poklapanje osobito u prvoj fazi djelovanja požara te u zadnjoj fazi konstantnog hlađenja. Puna plava linija predstavlja računski model, a narančasta isprekidana linija predstavlja eksperimentalne rezultate. Razlika između stupa B i stupa A, a samim time i njihovih dijagrama pomak-vrijeme je u tome što vrijeme djelovanja požara na stup A iznosi 60min, a na stup B iznosi 120min. To se na ovom dijagramu najbolje vidi u fazi hlađenja gdje pomaci u sabijanju stupa iznose približno 25mm, dok pomaci u sabijanju stupa A iznose približno 7mm što se može i vidjeti na dijagramu pomak-vrijeme za stup A na slici 6.2.

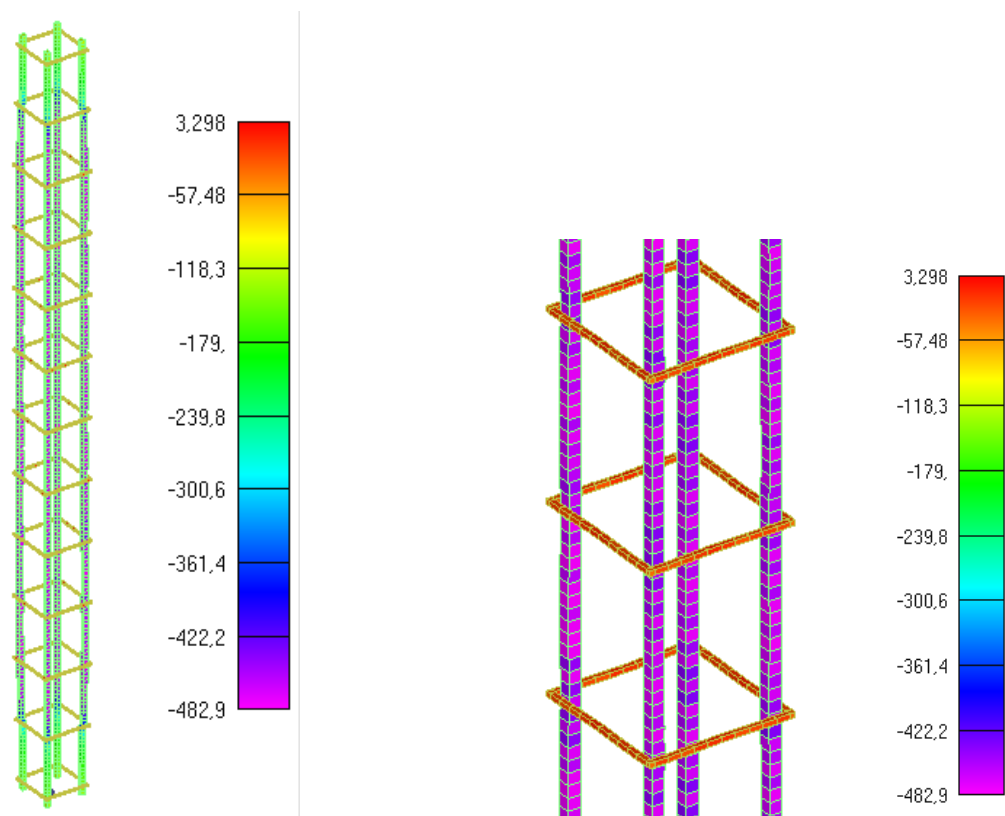


Slika 6.34: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) za stup B

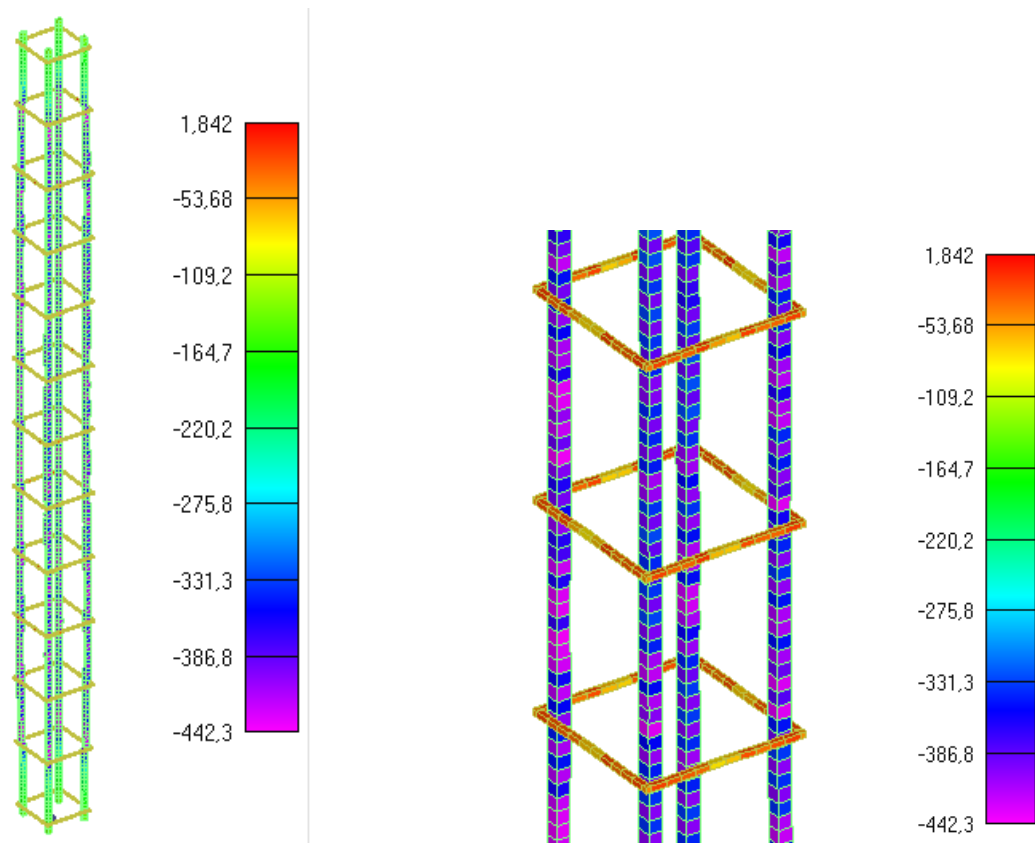
Prikazani dijagram opisuje kako se osni pomak stupa mijenja s djelovanjem opterećenja. Ovdje djeluje sila u iznosu od 25% inicijalne nosivosti stupa, nakon toga djeluje požar i na kraju nakon što je stup ohlađen postupno se povećava sila u inkrementima do konačnog sloma stupa. Na dijagramu se može vidjeti kako je nagib krivulje(krutost) stupa poprilično smanjena nakon što je na stup djelovao požar. Prikazani stup se slomio pri opterećenju od 1702kN, dok mjerena eksperimentalna čvrstoća stupa iznosi 1987kN što je poprilično dobro poklapanje stvarnog i eksperimentalnog modela. Pri usporedbi iznosa sile loma stupova A i B se vidi da je sila loma stupa B oko 30 % manja u odnosu na silu loma stupa A, što se može vidjeti usporedbom dijagrama 6.3. i 6.34.



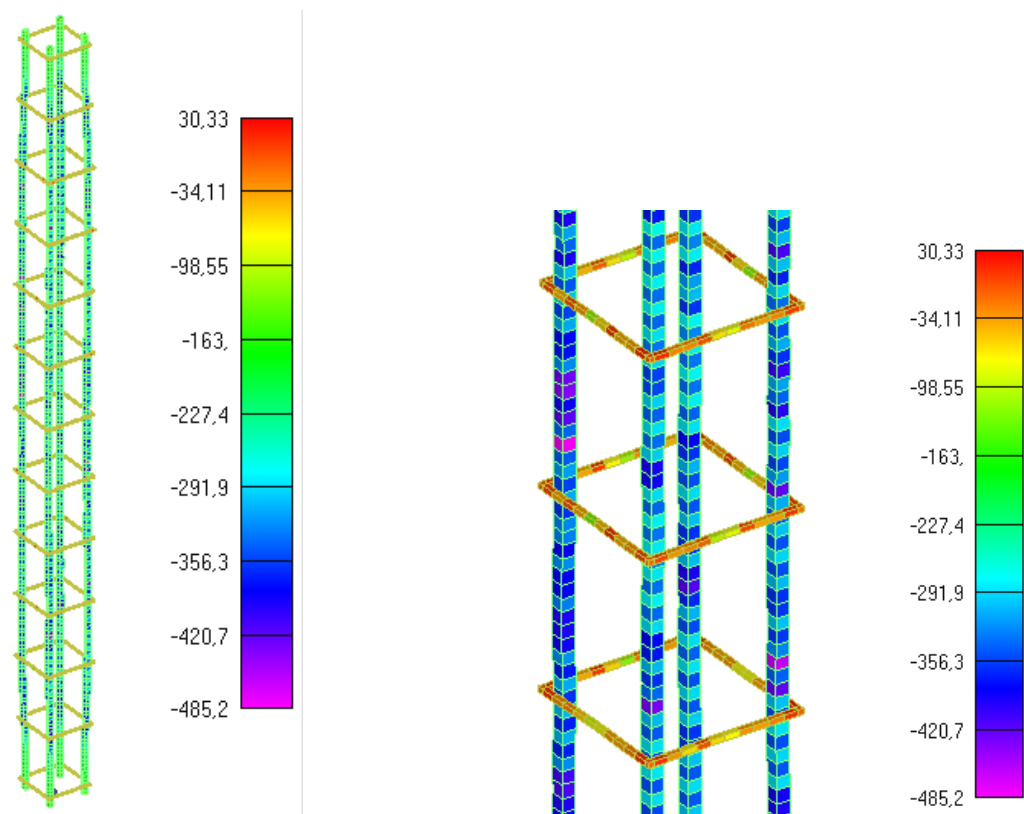
Slika 6.35: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 30min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



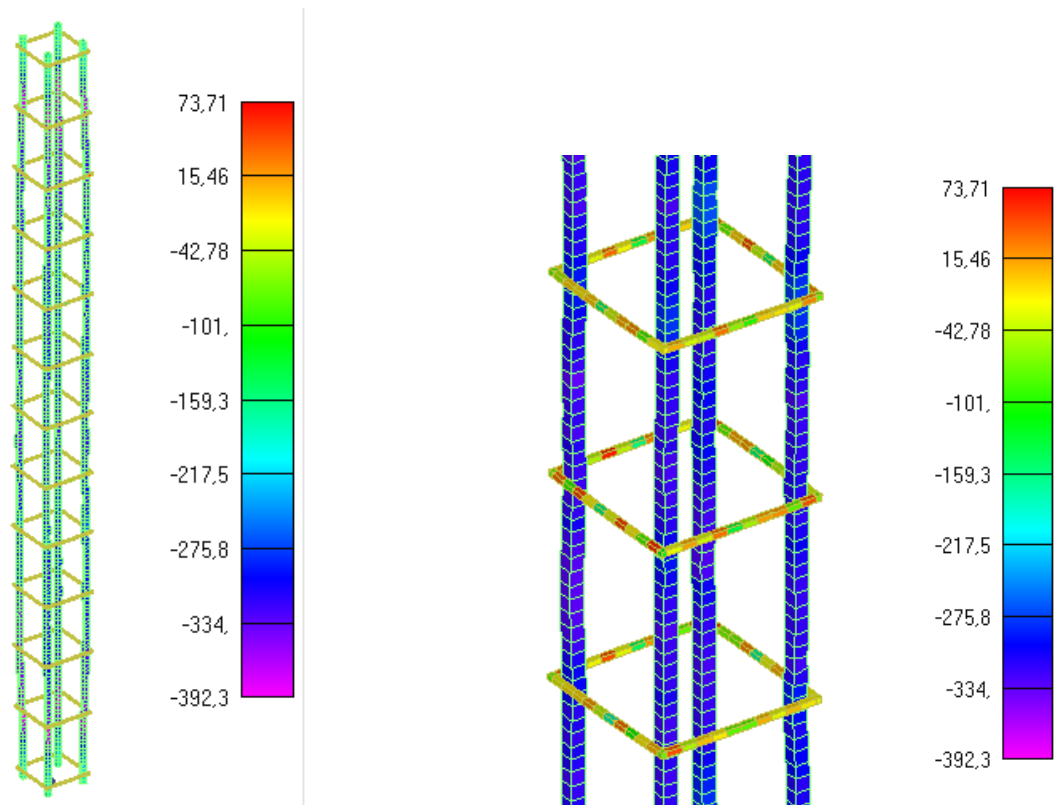
Slika 6.36: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 60min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



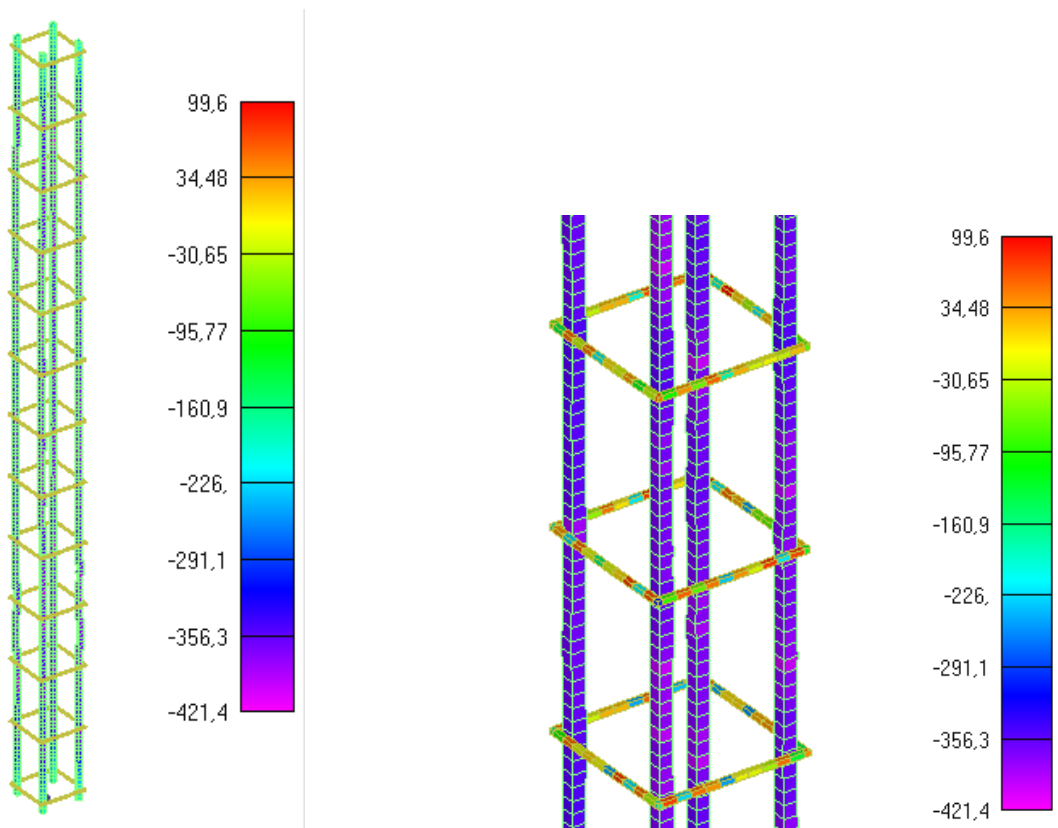
Slika 6.37: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 90min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



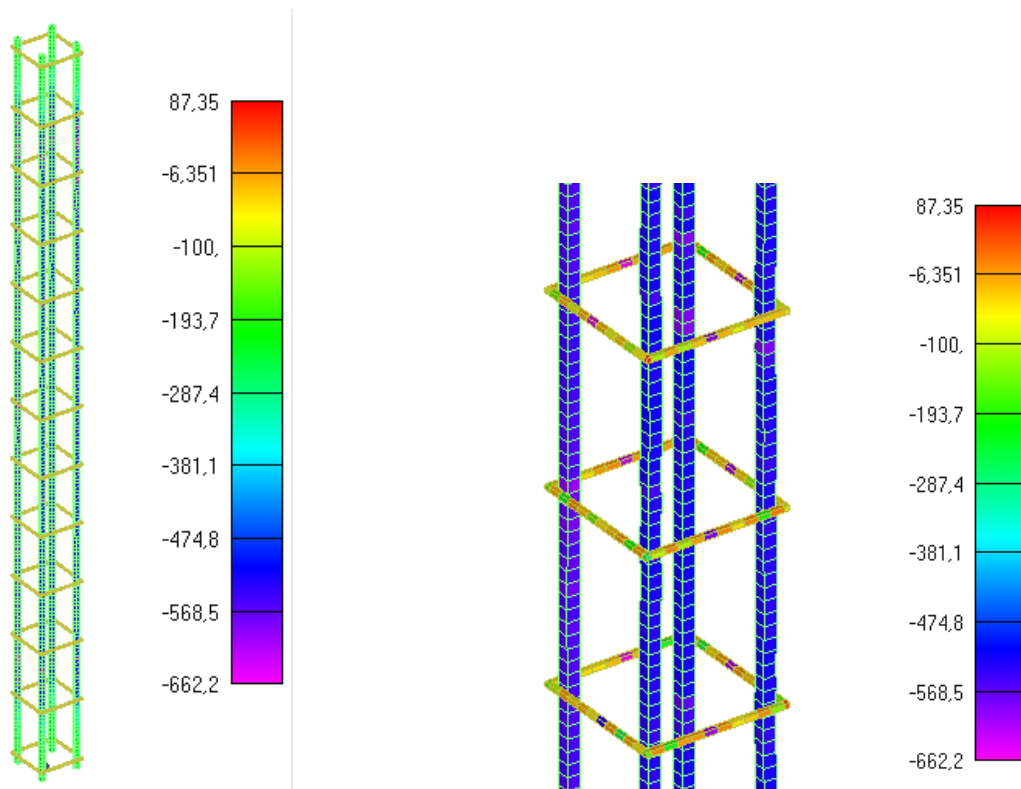
Slika 6.38: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 120min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA



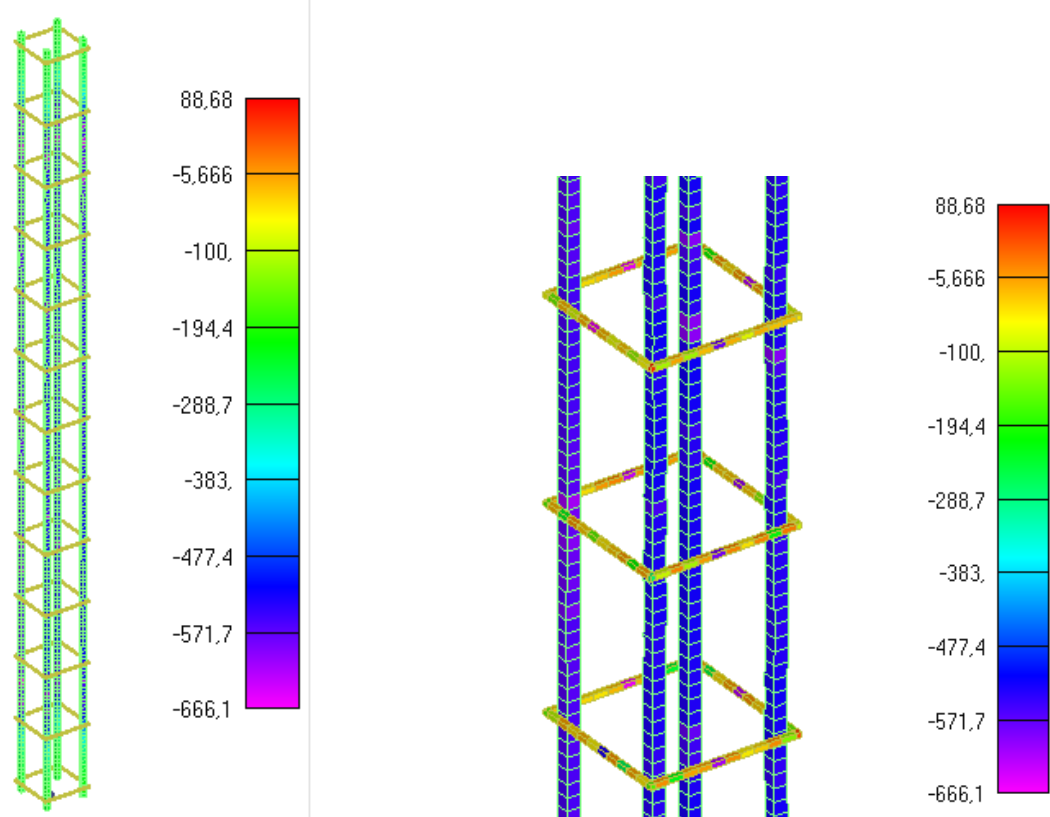
Slika 6.39: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 275min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



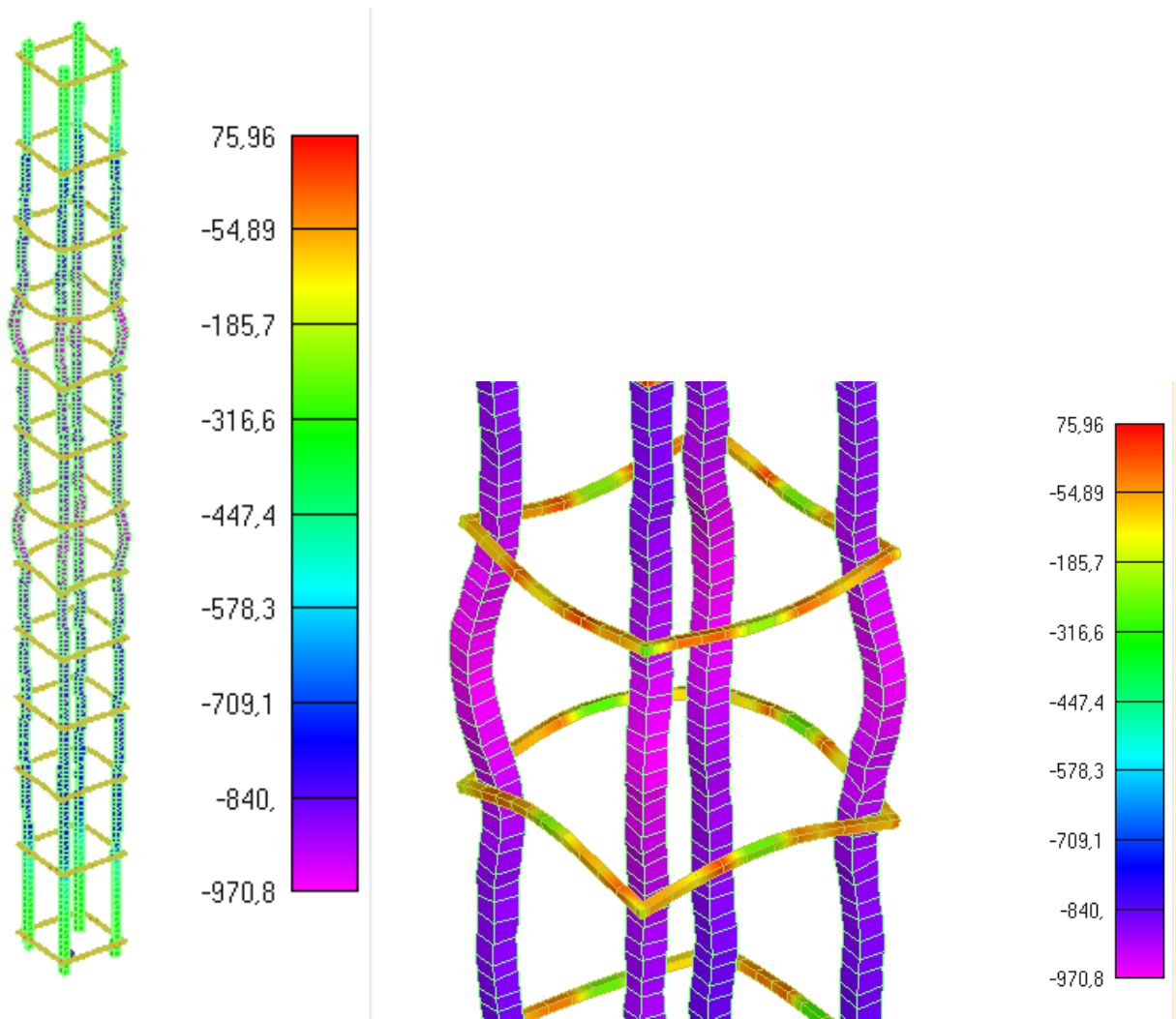
Slika 6.40: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 370min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.41: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 1090min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

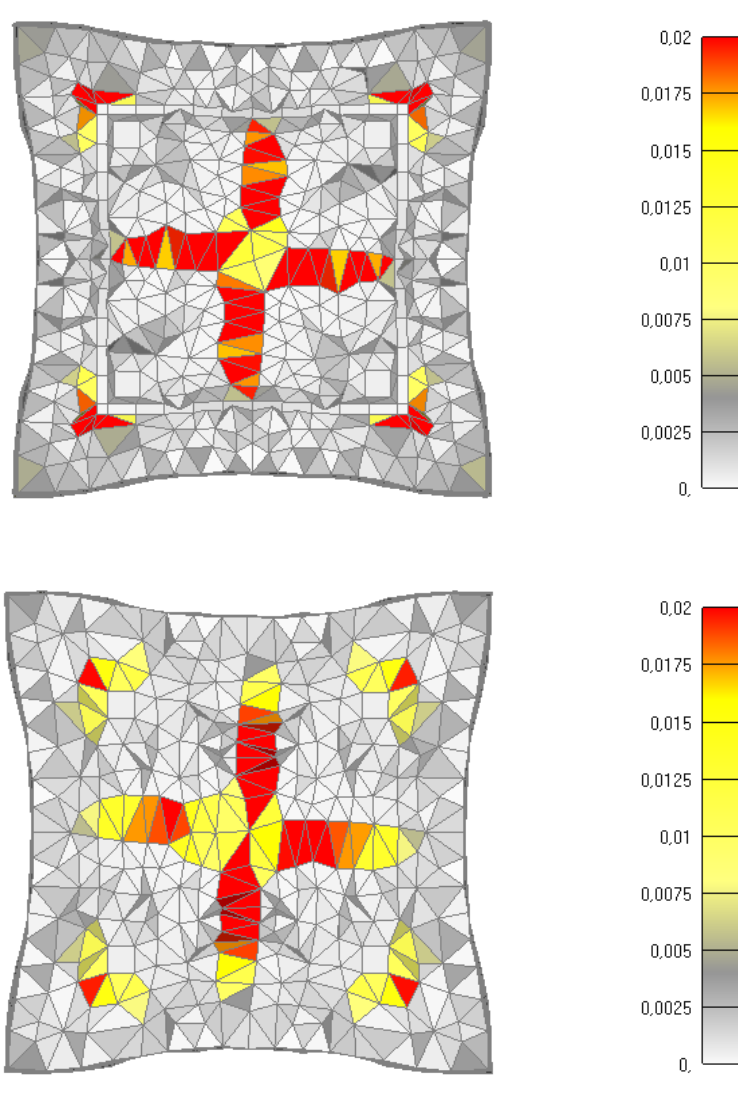


Slika 6.42: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona za djelovanje požara od 1810min (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ POŽARNOG PROCESA

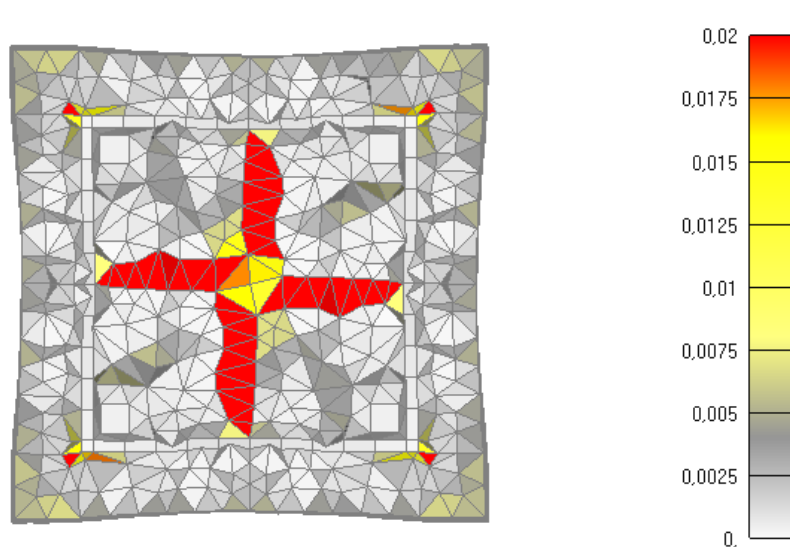


Slika 6.43: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.

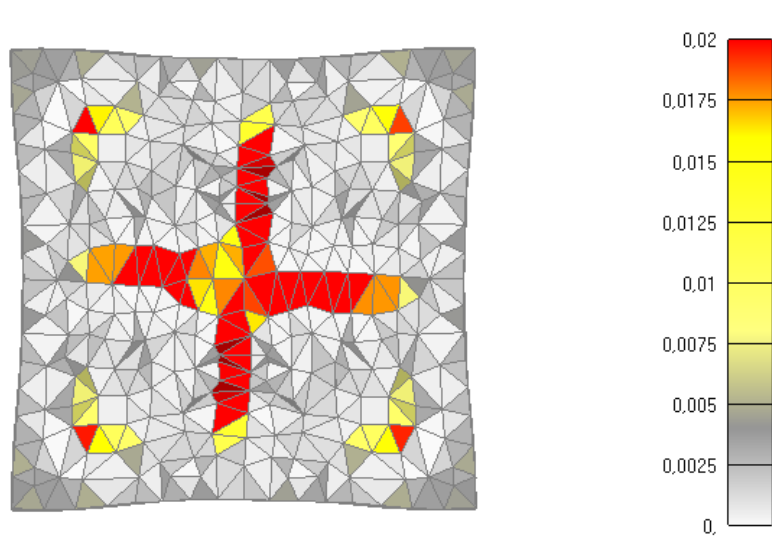


Slika 6.44: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)

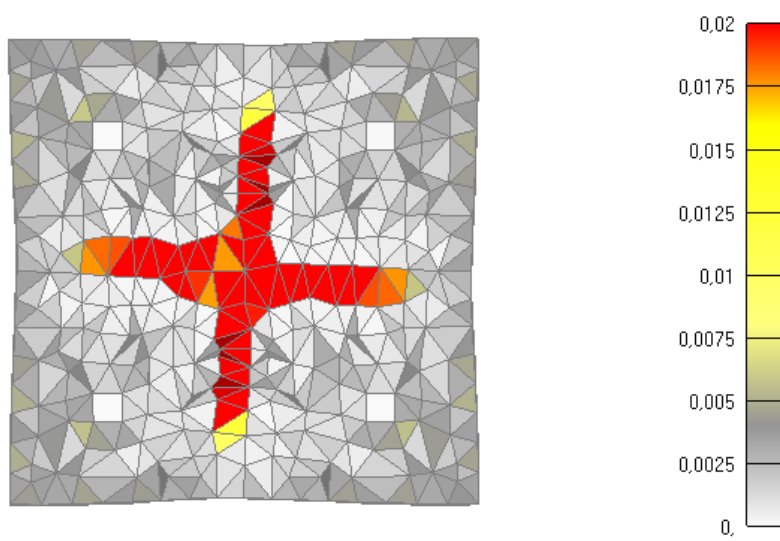
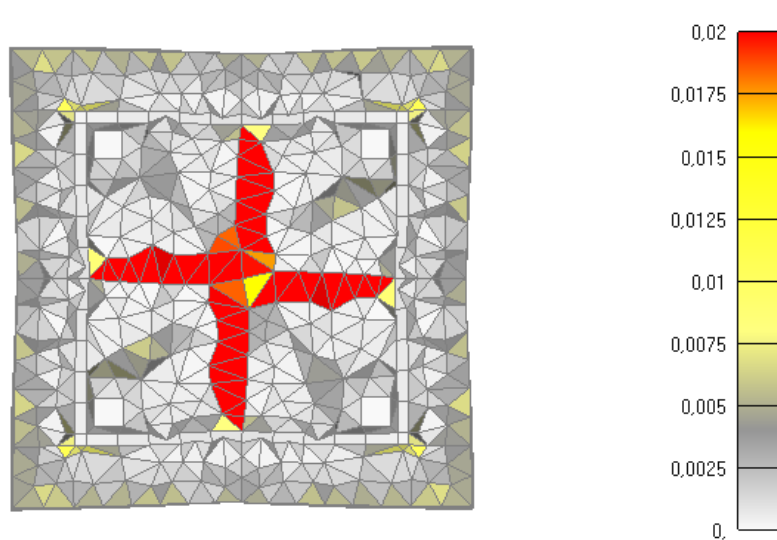


Slika 6.45: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)

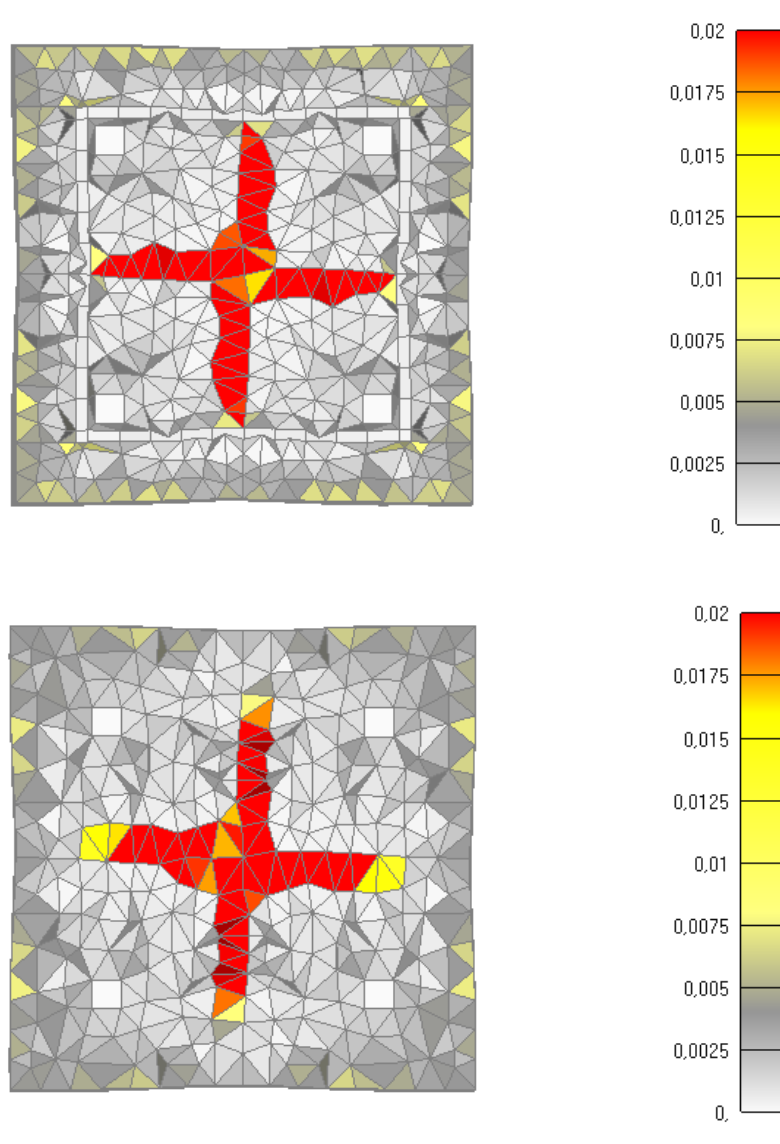




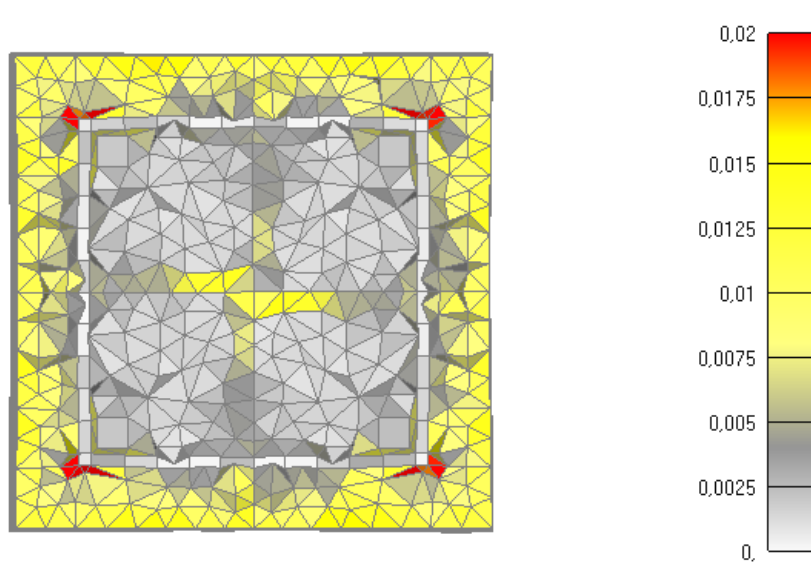
Slika 6.46: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(bez spona)



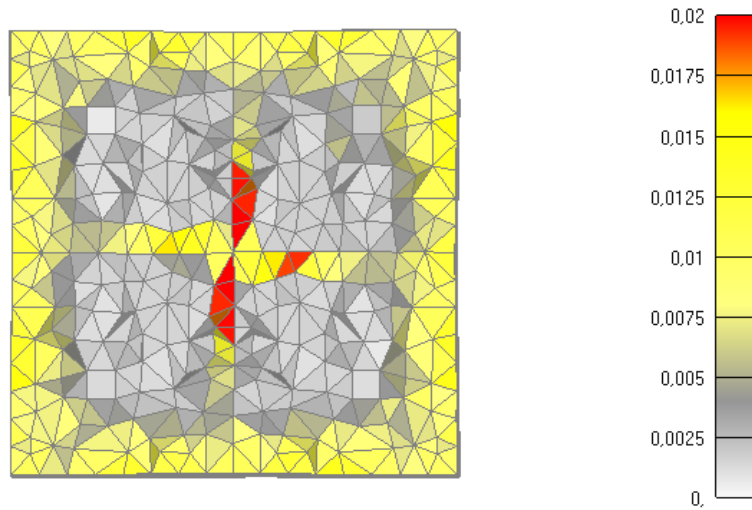
Slika 6.47: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



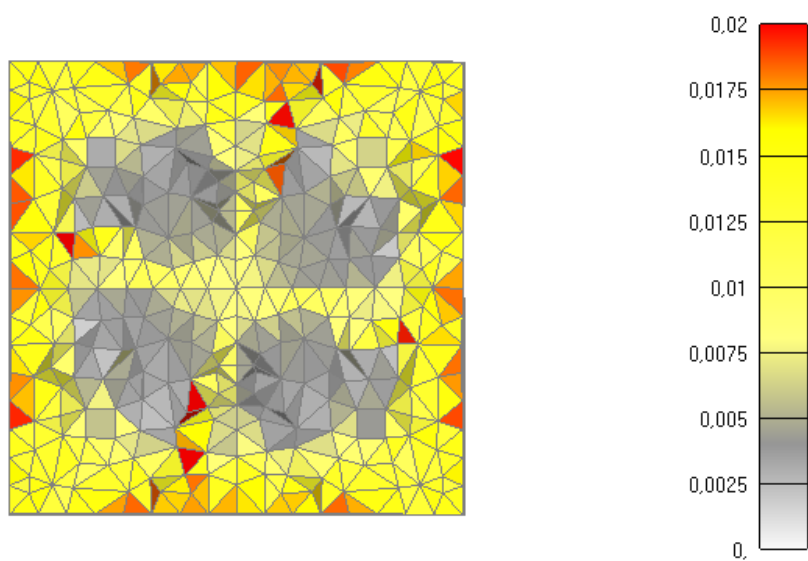
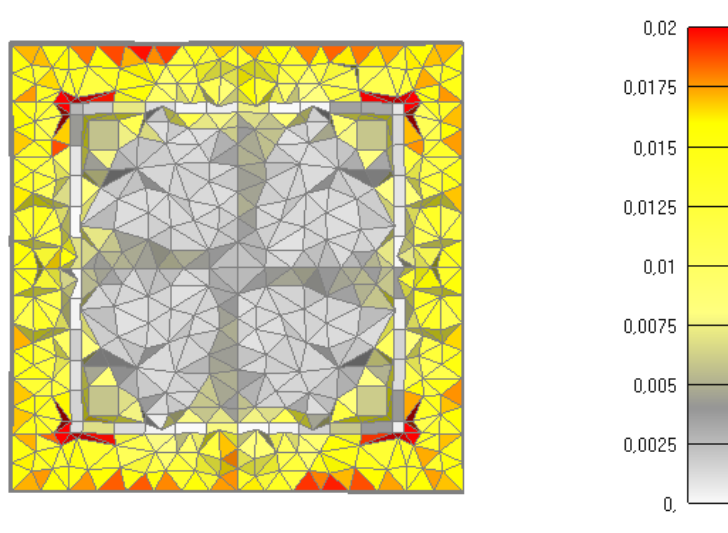
Slika 6.48: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 120 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



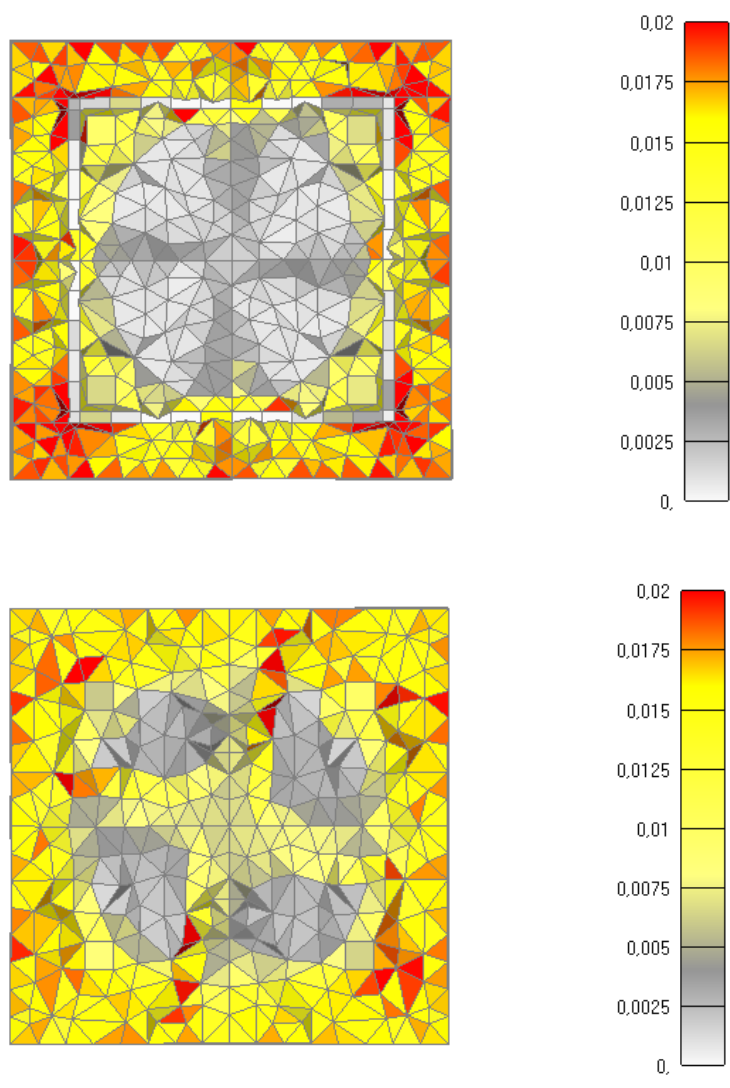
Slika 6.49: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 275 minuta požara  
(sa sponama)



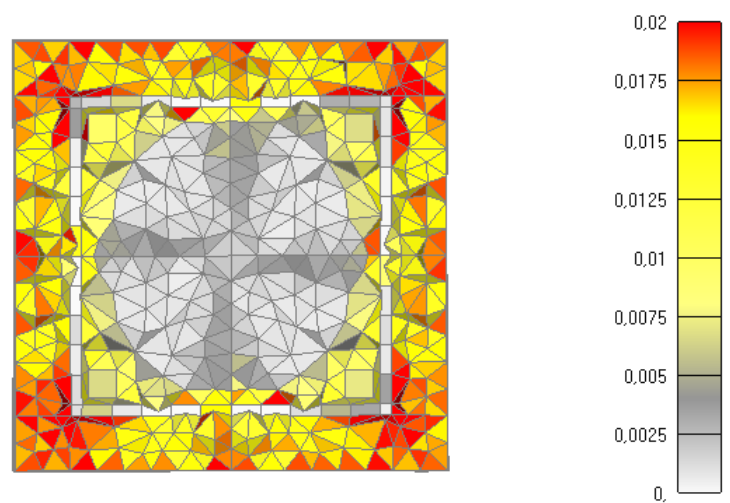
Slika 6.50: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 275 minuta požara  
(bez spona)



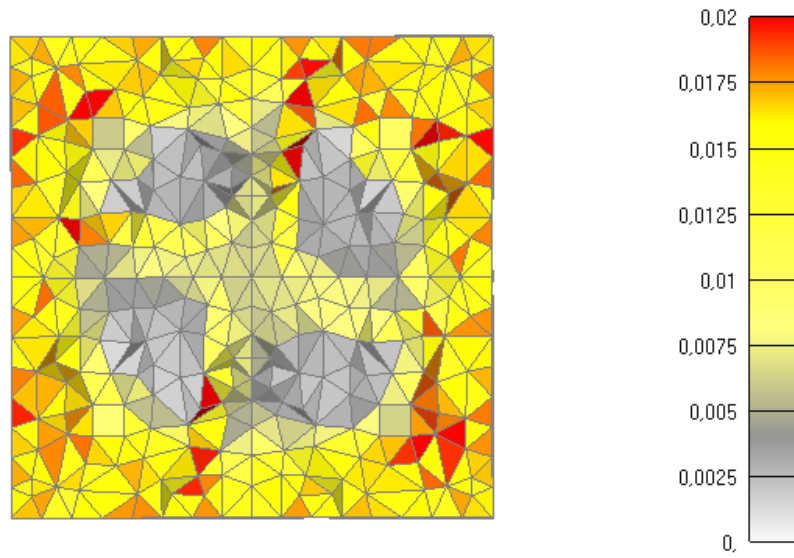
Slika 6.51: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 370 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG  
HLADENJA



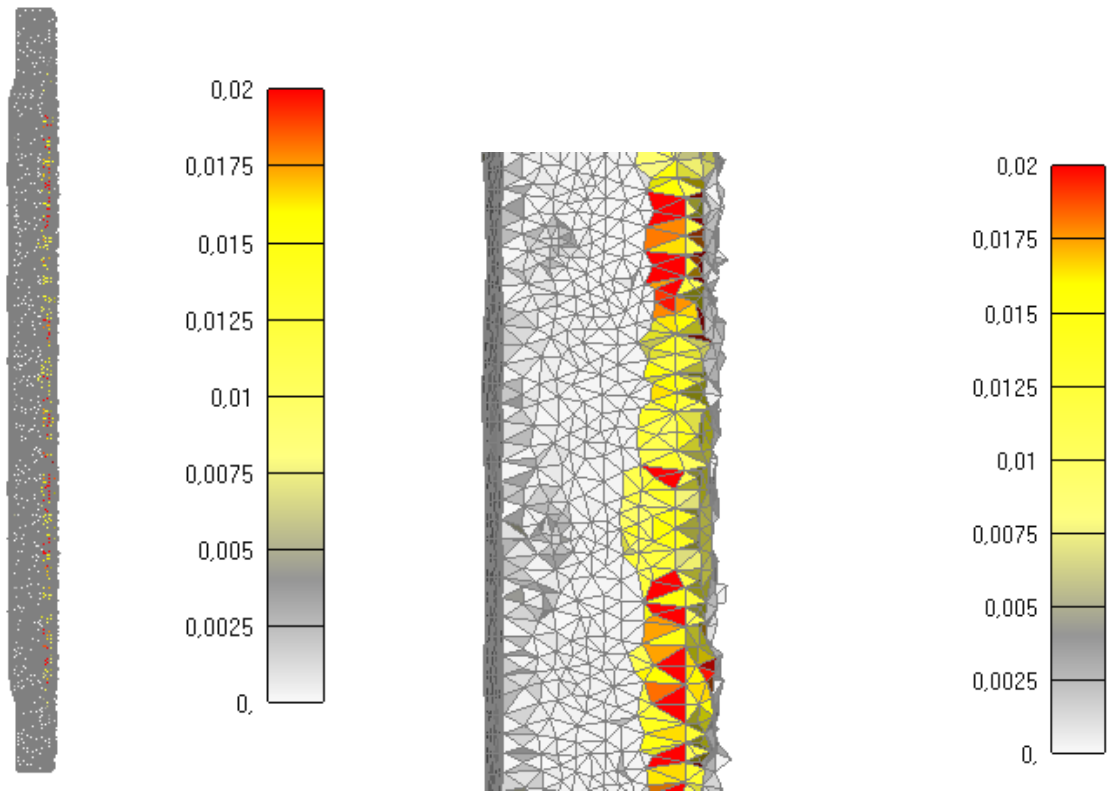
Slika 6.52: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1090 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



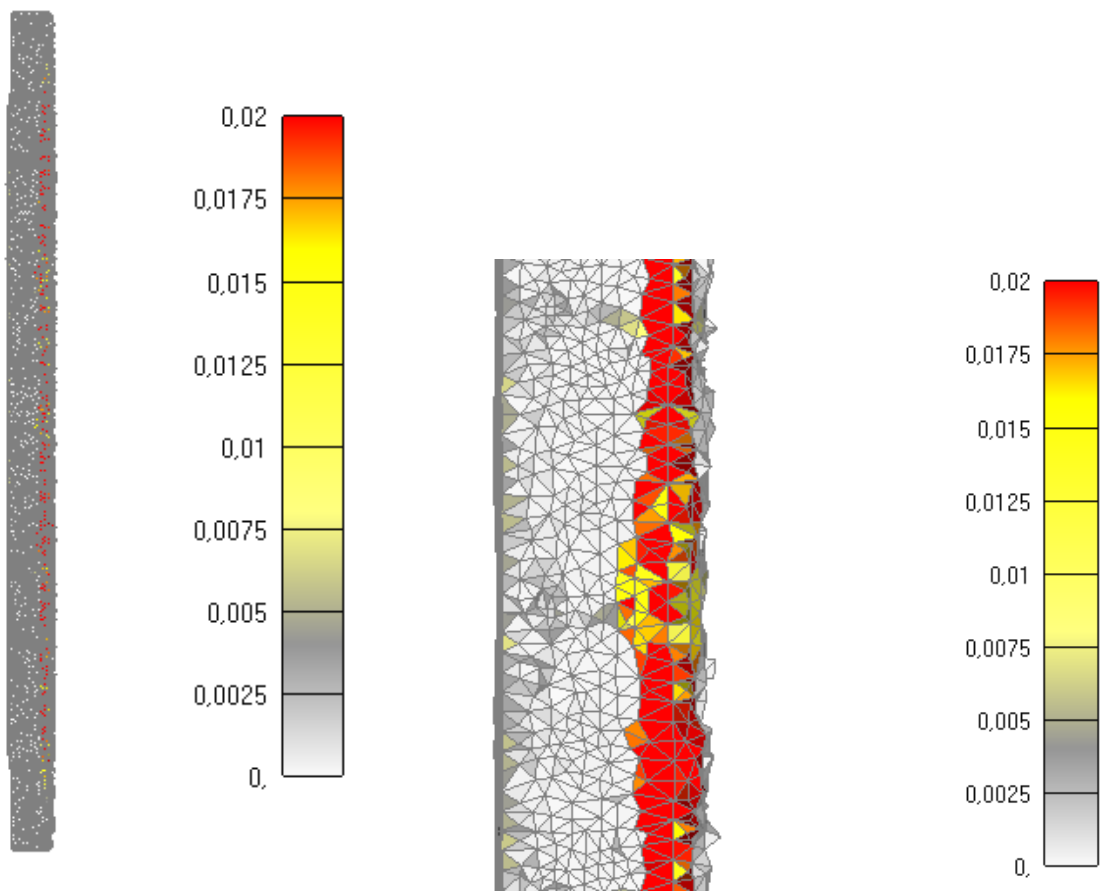
Slika 6.53: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1810 minuta  
(sa sponama)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



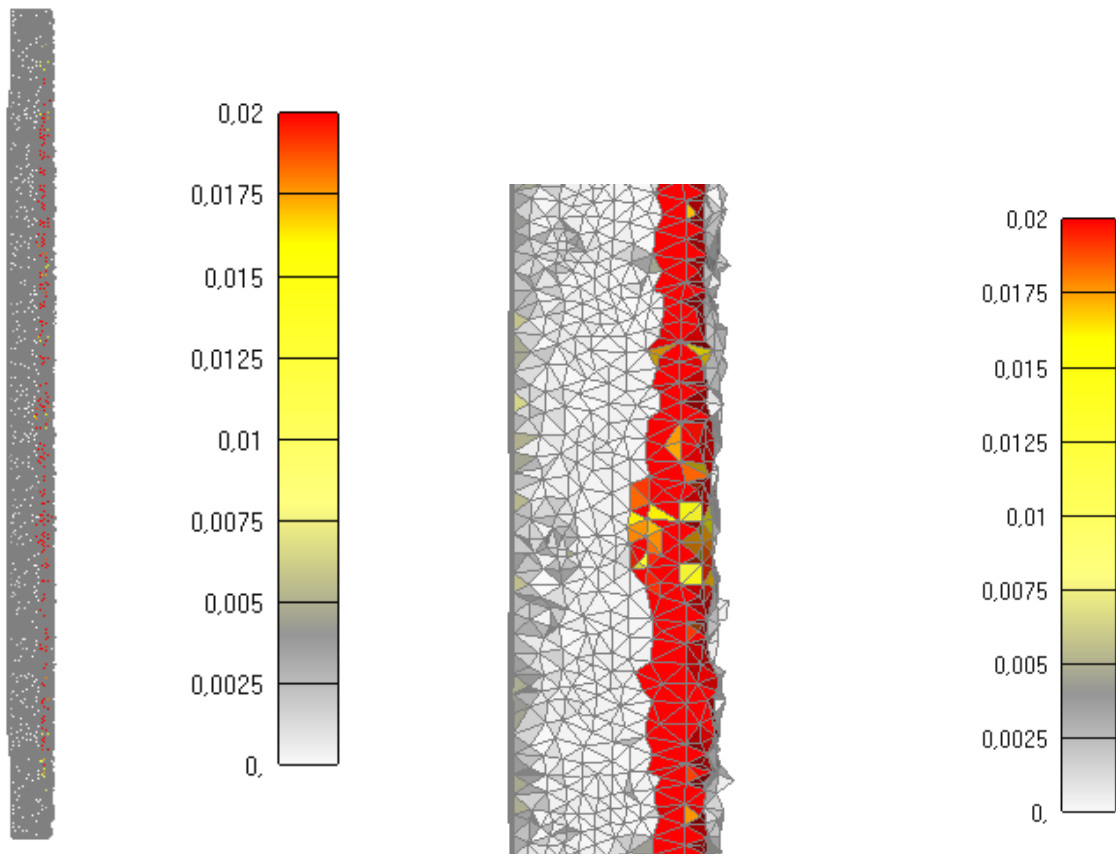
Slika 6.54: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1810 minuta  
(bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



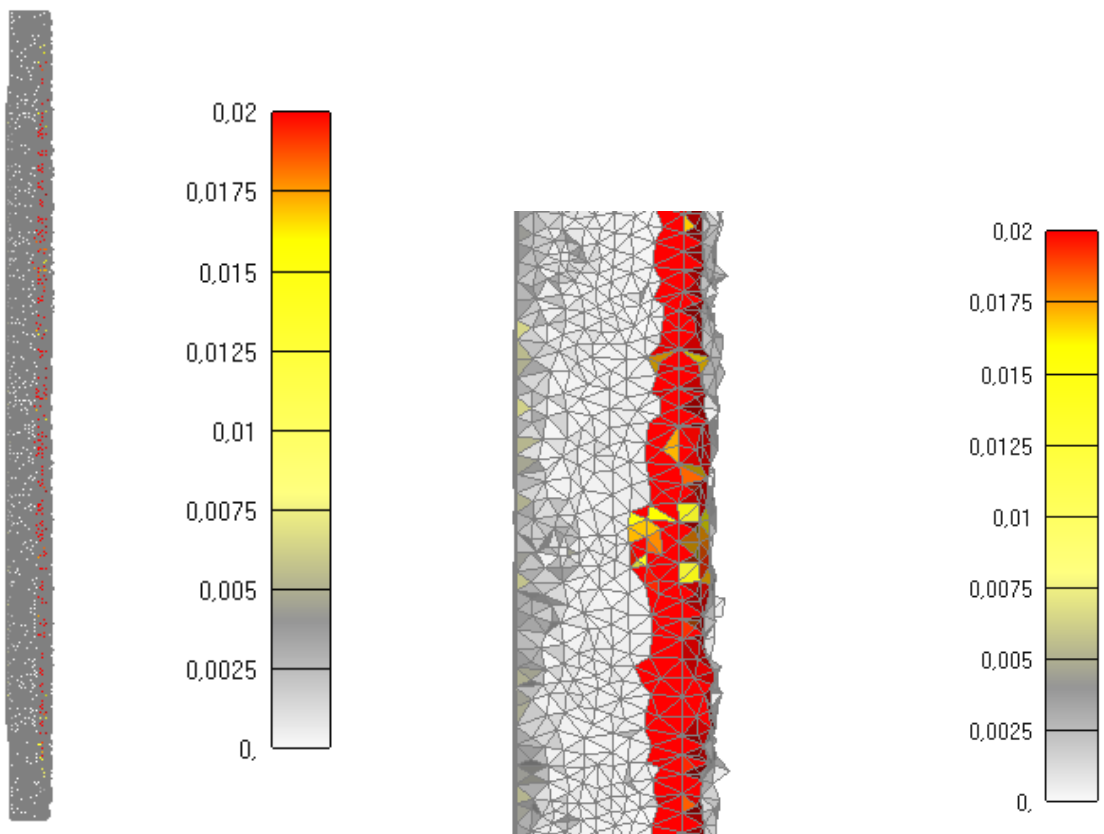
Slika 6.55: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



Slika 6.56: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

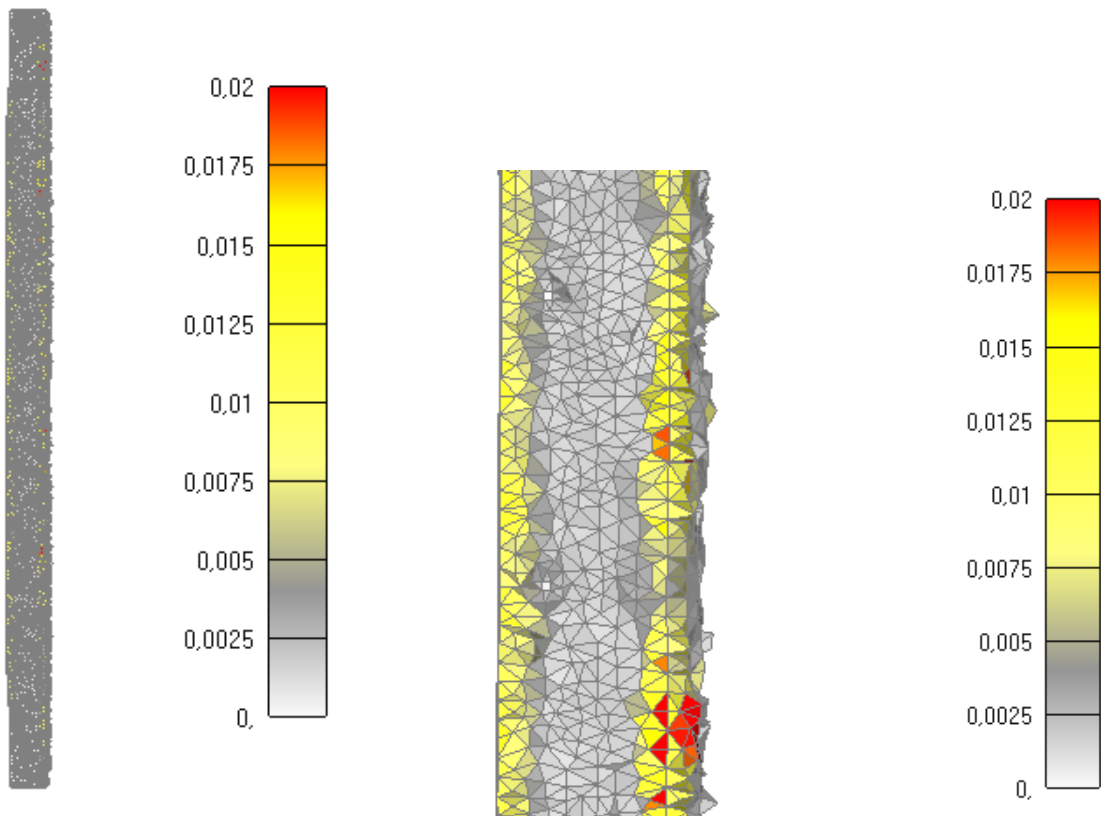


Slika 6.57: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

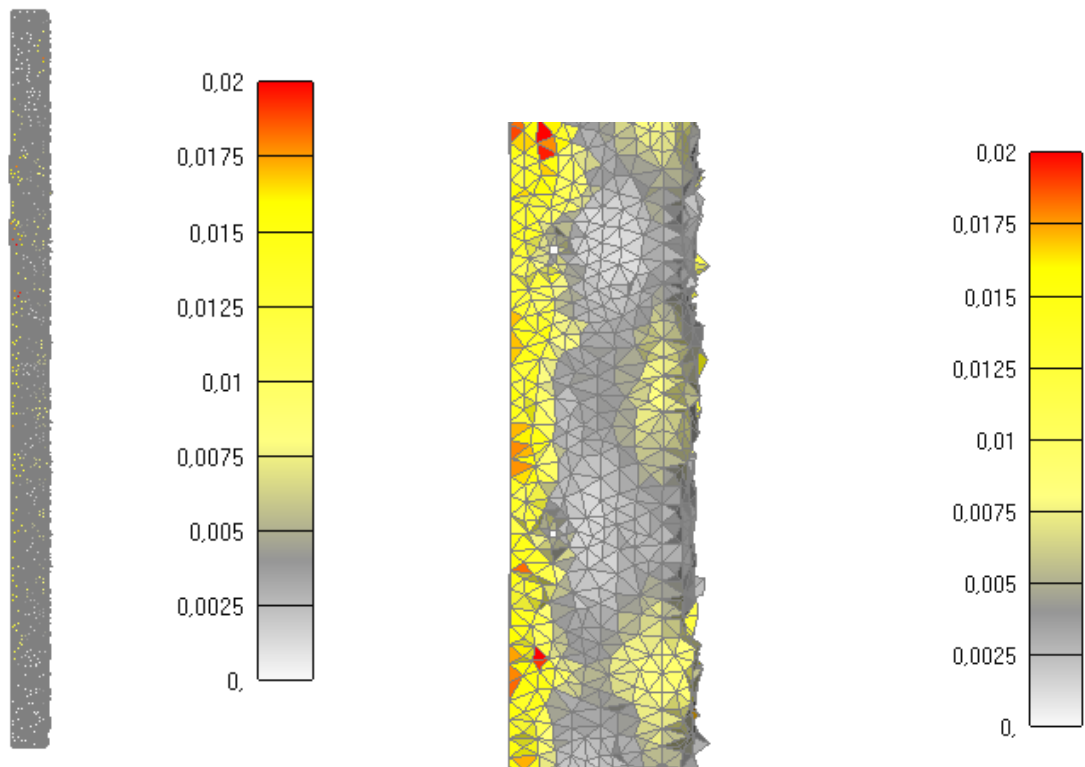


Slika 6.58: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 120 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



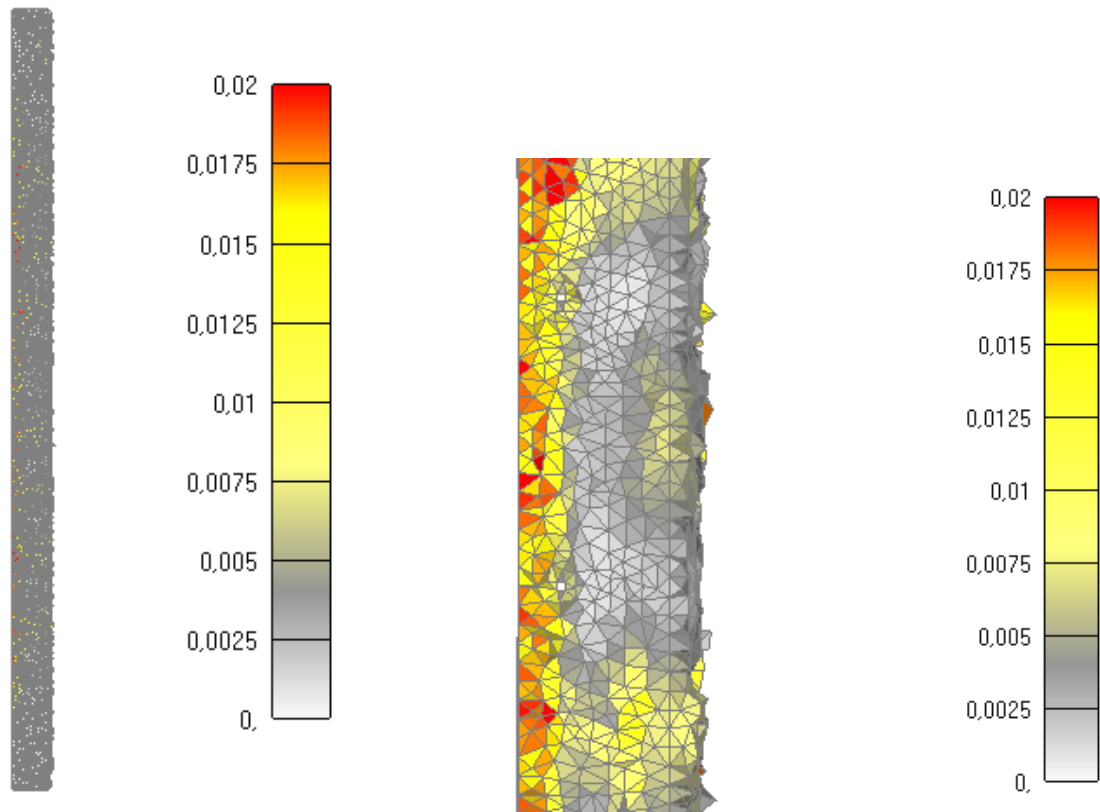


Slika 6.59: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 275 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

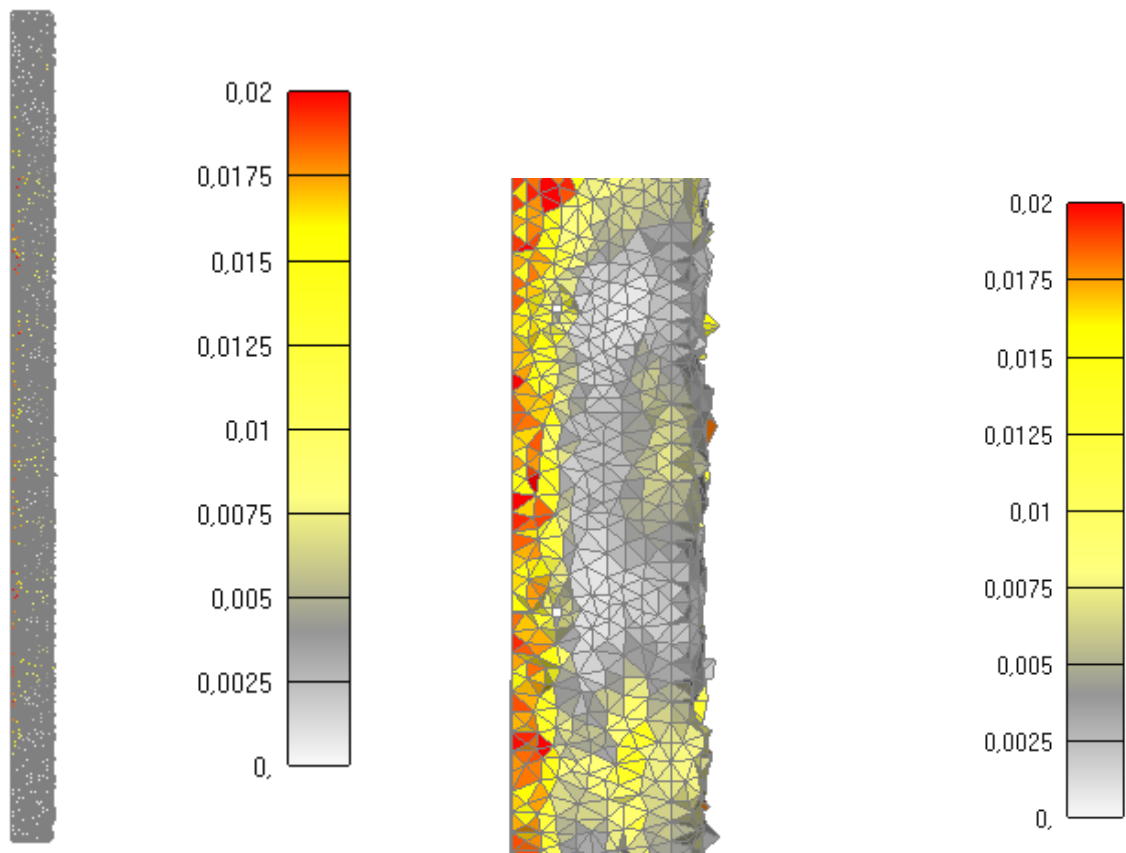


Slika 6.60: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 370 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA

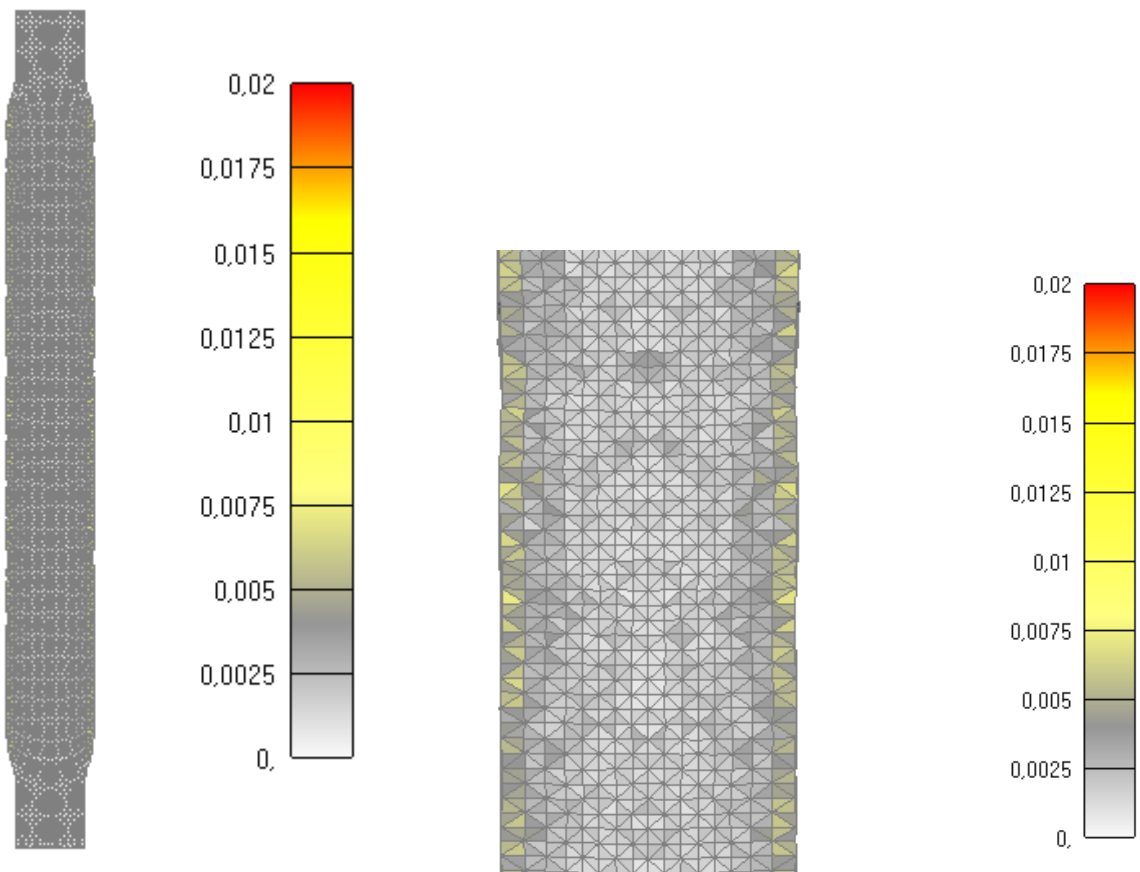




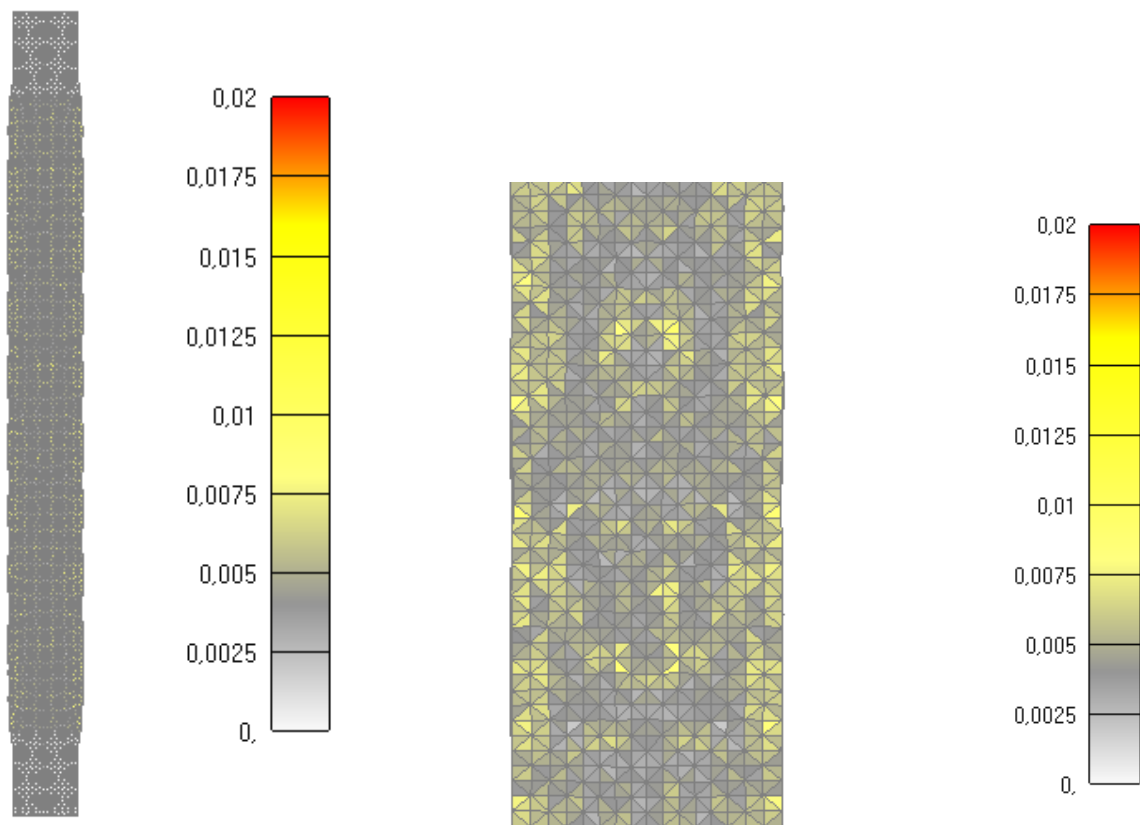
Slika 6.61: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1090 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



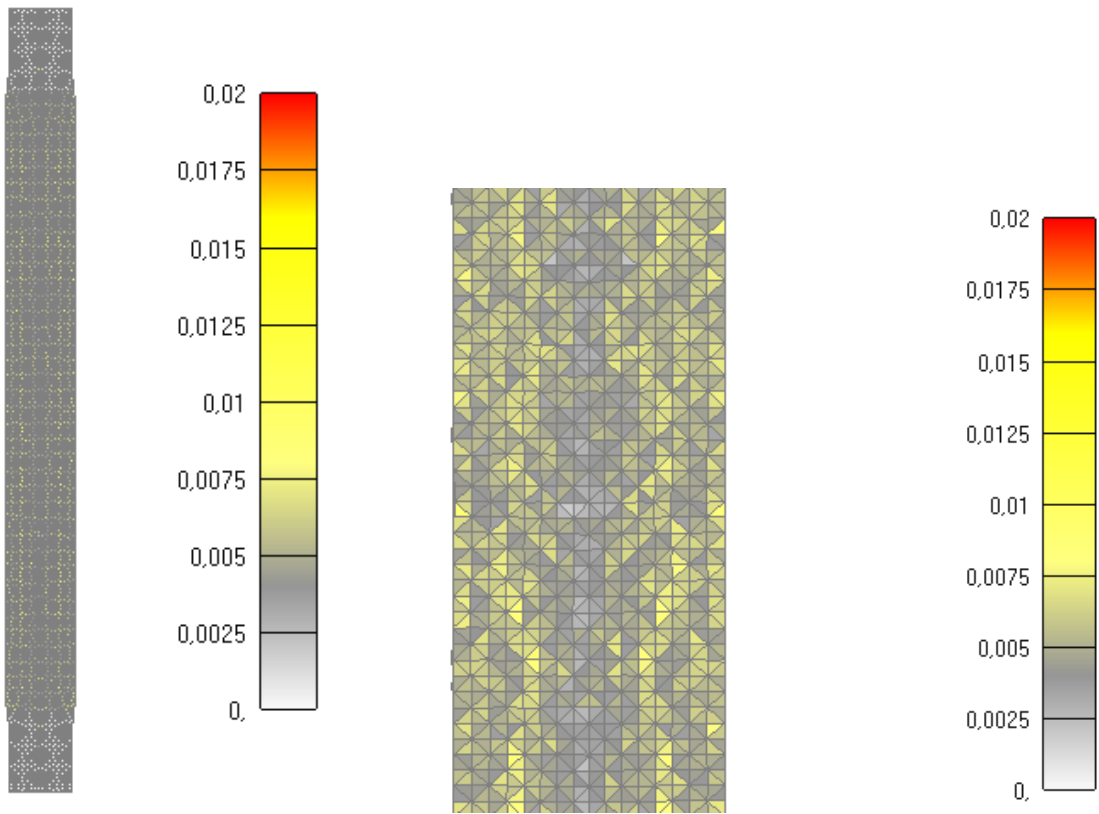
Slika 6.62: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1810 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



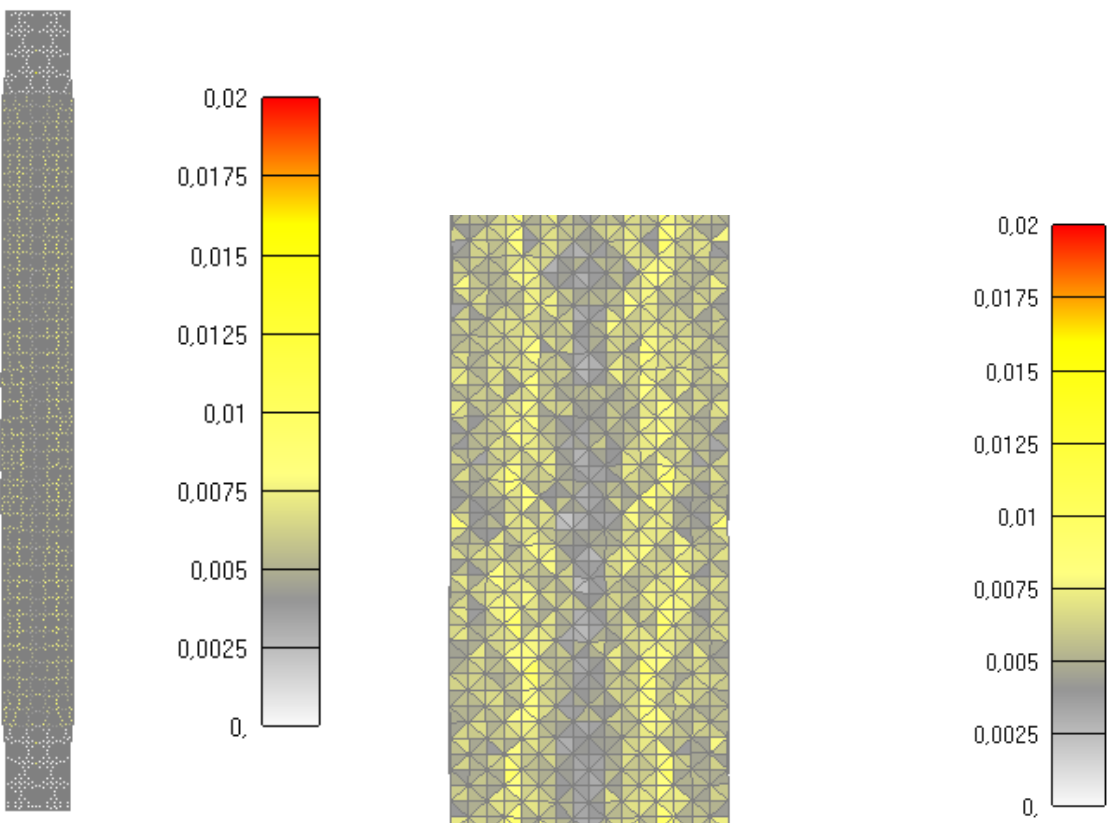
Slika 6.63: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stup*)



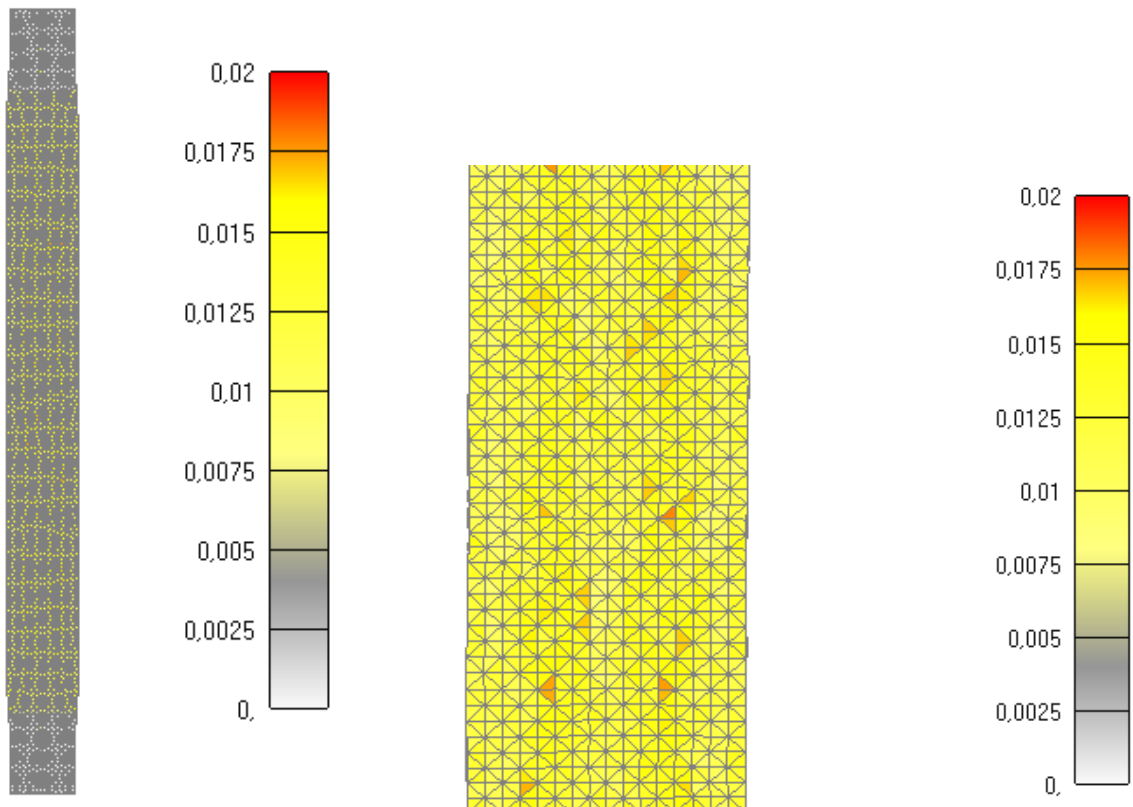
Slika 6.64: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



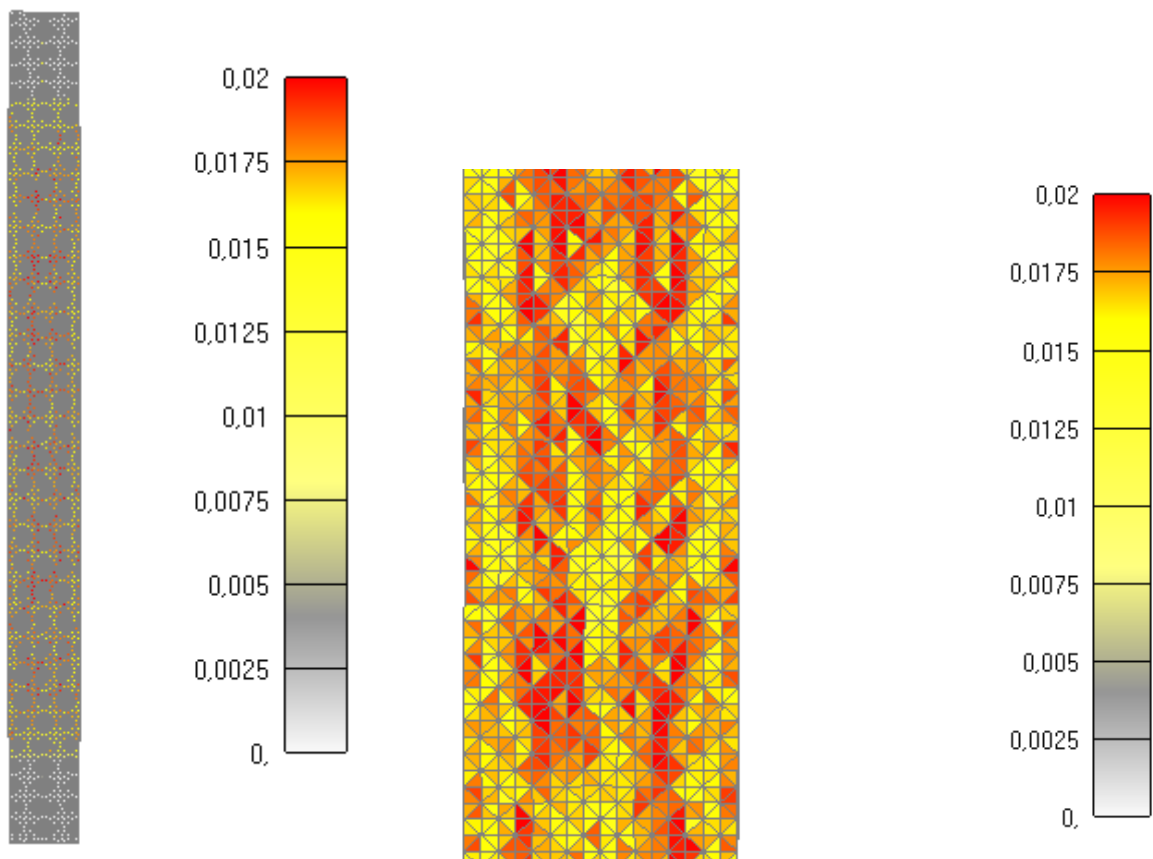
Slika 6.65: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



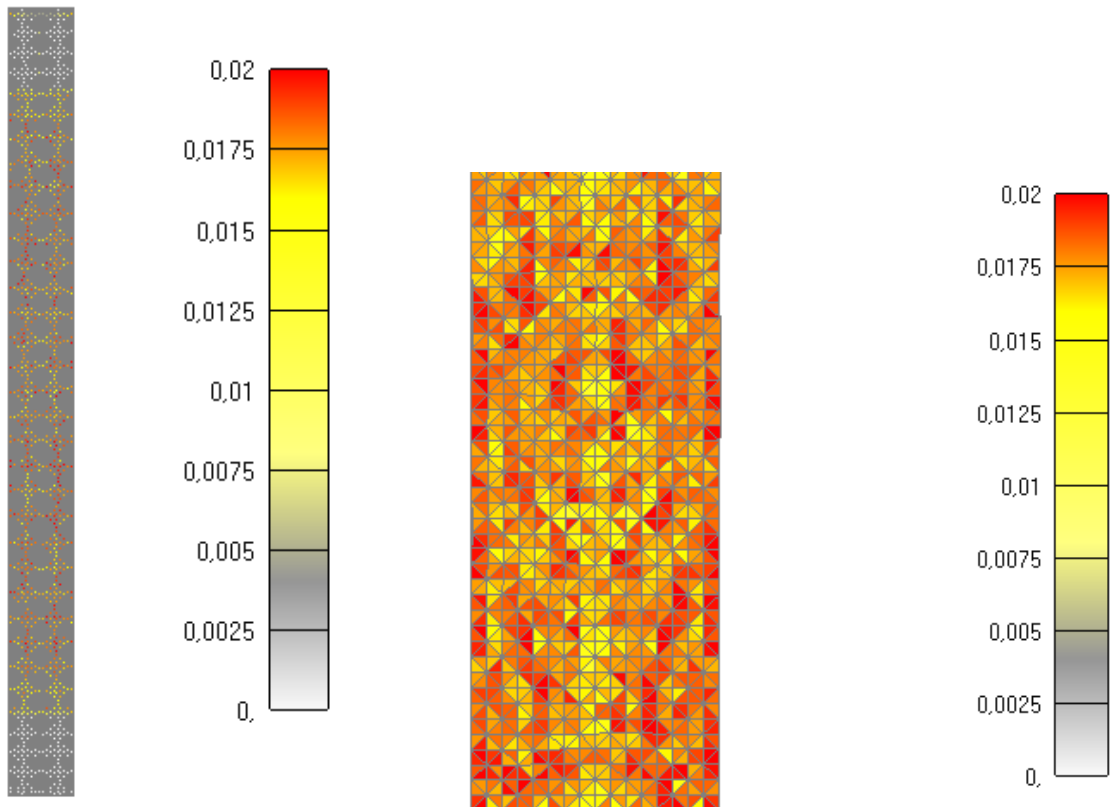
Slika 6.66: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 120 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA



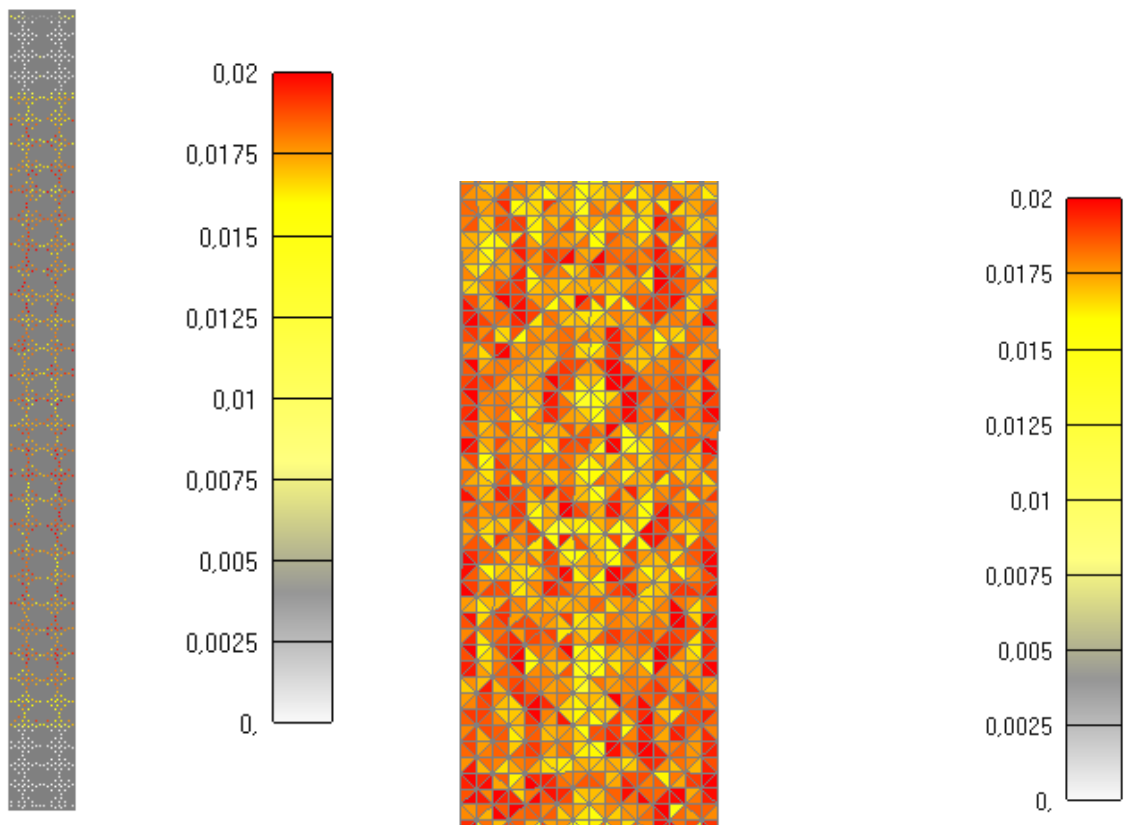
Slika 6.67: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 275 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



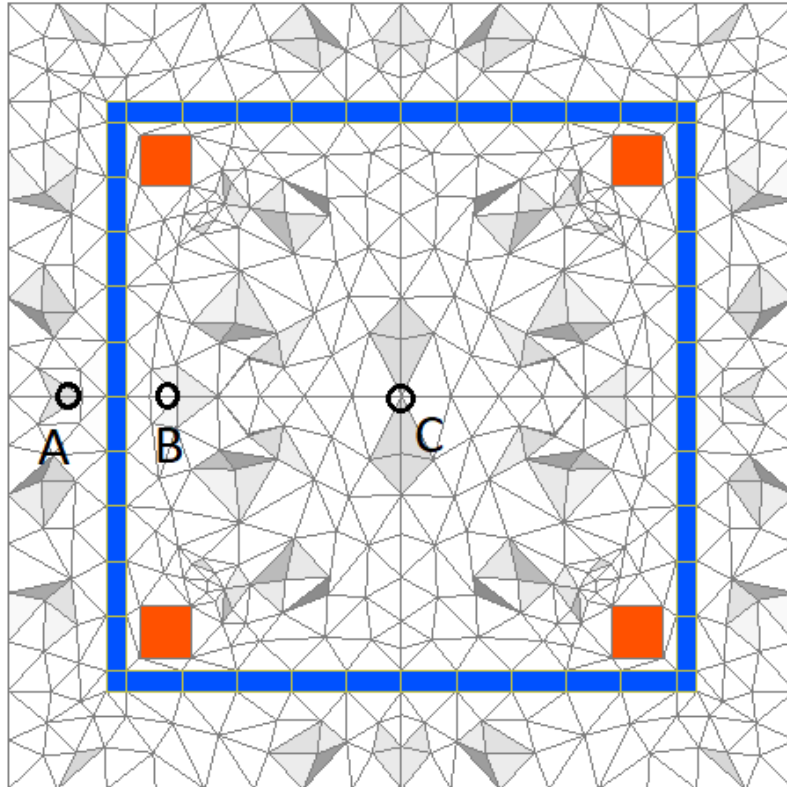
Slika 6.68: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 370 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.69: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1090 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

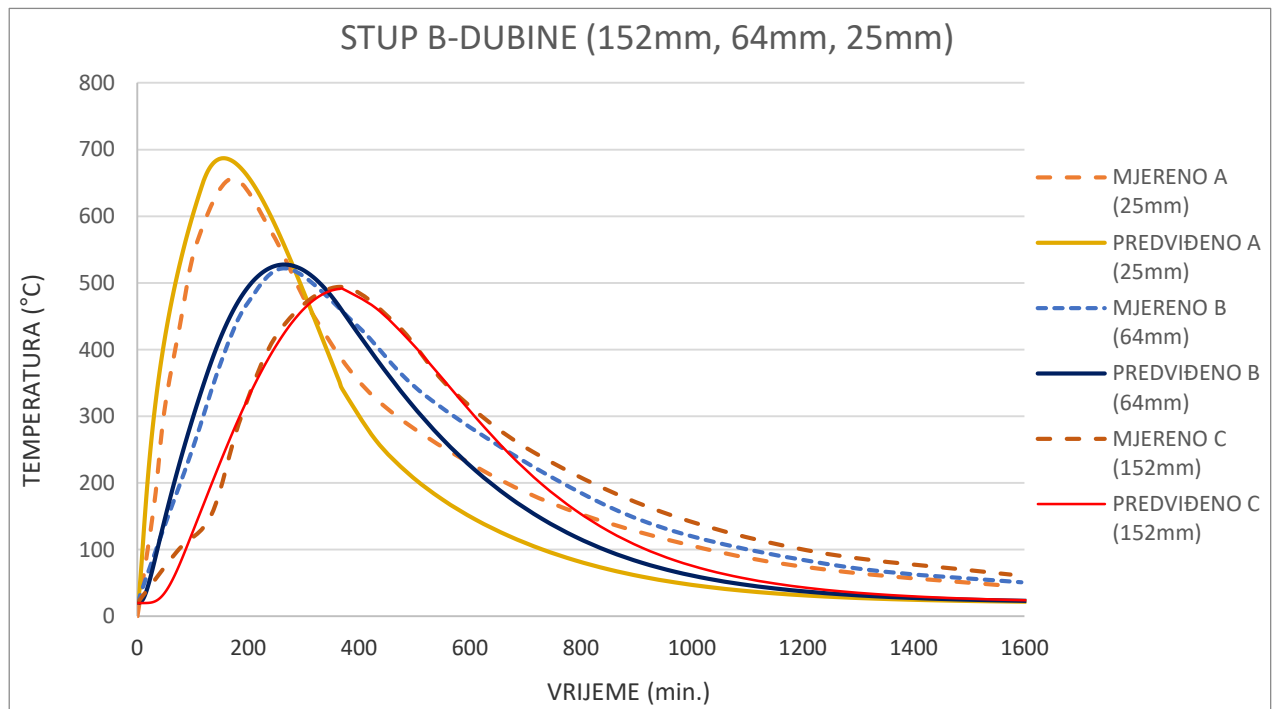


Slika 6.70: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1810 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.71: Prikaz promatranih točaka za distribuciju temperature

Na slici 6.71 su prikazane točke A, B i C u kojima se promatra distribuciju temperature. Točka A se nalazi na dubini 25mm od površine stupa, točka B se nalazi na dubini 64mm od površine stupa, a točka C se nalazi u centru stupa. U njima se promatra distribucija temperature za vrijeme požarnog procesa (grijanja i hlađenja stupa). Cilj je da se računaska distribucija u tim točkama poklapa s eksperimentalnom (mjerenom) distribucijom prema eksperimentu [2]. U nastavku će se prikazati dobivene krivulje za cijeli požarni proces (120min. zagrijavanja +250min. linearnog hlađenja + 1440min. konstantnog hlađenja). [2]



Slika 6.72: Prikaz dijagrama distribucije temperature

Iz prethodnog dijagrama se vidi da se predviđene temperature u promatranim točkama dosta dobro poklapaju s eksperimentalnim mjerenjima [2] osobito u prvom dijelu gdje se stup zagrijava. Isto tako se može vidjeti da se najviše temperature tijekom požara postižu u točki A zbog toga što se ona nalazi najbliže površini stupa dok se najniže temperature postižu u točki B koja se nalazi u centru stupa. U točki A maksimalna temperatura iznosi nešto manje od 700°C, dok je u točki C u centru stupa maksimalna temperatura negdje oko 500°C.



### 6.2.3. Parametarska studija stupa A

U parametarskoj studiji se analizira odgovor armiranobetonskog stupa kad je on opterećen drugačijim iznosom sile i drugačijim vremenom djelovanja požara u odnosu na standardni validacijski slučaj. Ovdje će se konkretno taj odgovor promatrati na stupu A. Stup A je u standardnom slučaju prema eksperimentu [2] opterećen početnim iznosom sile od 25% inicijalne nosivosti stupa (točnije 992kN) prije djelovanja požara i nakon toga samim požarom u iznosu od 60 minuta. Nakon požara stup je linearno hlađen po krivulji hlađenja koja je predviđena za to vrijeme djelovanja požara ( $dT/dt=250(3-t_h)$  °C/h) koja vrijedi za požare koji traju od 30 minuta do 120 minuta. [2]

Prema toj krivulji trebalo je stup linearno hladiti 115 minuta, a nakon toga je ostavljen na sobnoj temperaturi od 20°C da se potpuno ohladi u svom cijelom volumenu. Nakon što se stup potpuno ohladio nastavljeno je povećevanje opterećenje silom na njega u inkrementima od 10kN do njegovog konačnog sloma. [2]

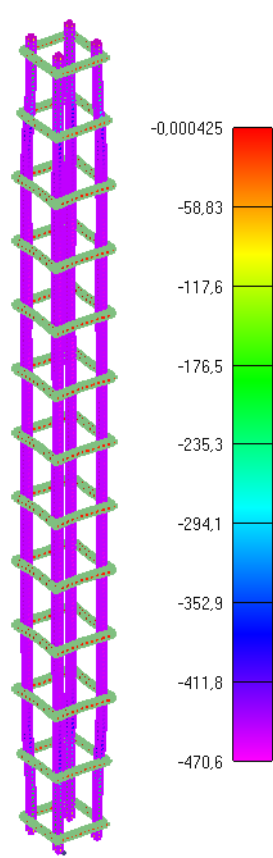
U parametarskoj studiji su promijenjeni iznosi opterećenja stupa tako da je sad stup opterećen iznosima sile u prvom slučaju 35% i u drugom slučaju 50% od inicijalne nosivosti stupa što konkretno iznosi 1450kN i 2100kN.

Isto tako je stup opterećen i različitim vremenom djelovanja požara od 90 minuta u prvom slučaju i 120 minuta u drugom slučaju. Ukupno ima 9 različitih kombinacija opterećenja od kojih je jedna validacijski slučaj koji je već prikazan. U nastavku će se prikazati rezultati svih preostalih 8 kombinacija i vidjeti će se koje od njih stup neće uspjeti “preživjeti“ još za vrijeme samog požarnog procesa.

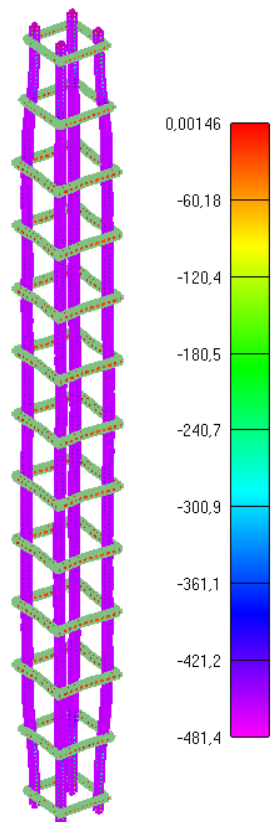


### **6.2.3.1. 1.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 60 minuta)**

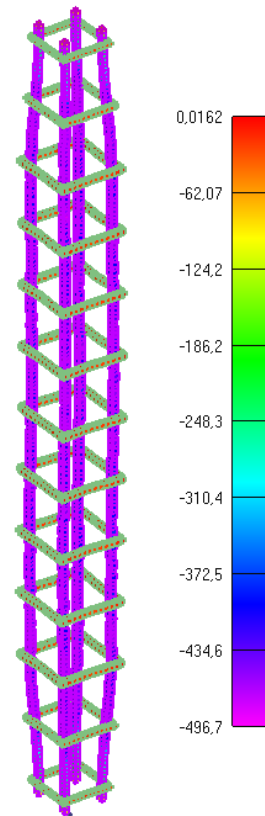
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu), te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrami pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će biti prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 60 minuta i svi skupa će biti uspoređeni. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 60 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna iznosu sile tako da taj dijagram nema potrebe ponovno prikazivati jer je on identičan dijagramu prikazanom u poglavlju za validacijski slučaj stupa A (6.32.)



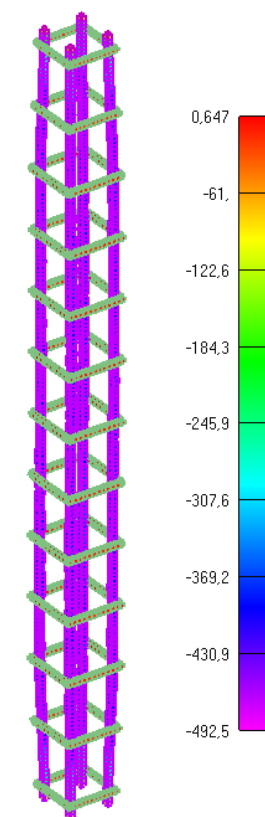
Slika 6.73: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



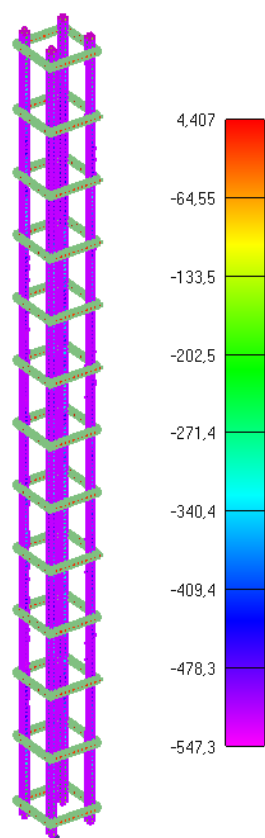
Slika 6.74: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA*



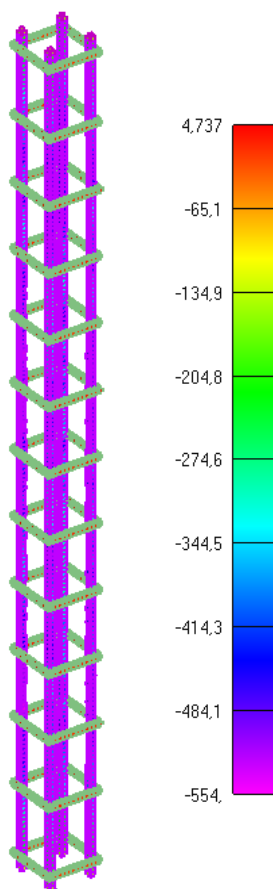
Slika 6.75: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 115min



Slika 6.76: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 175min  
*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*

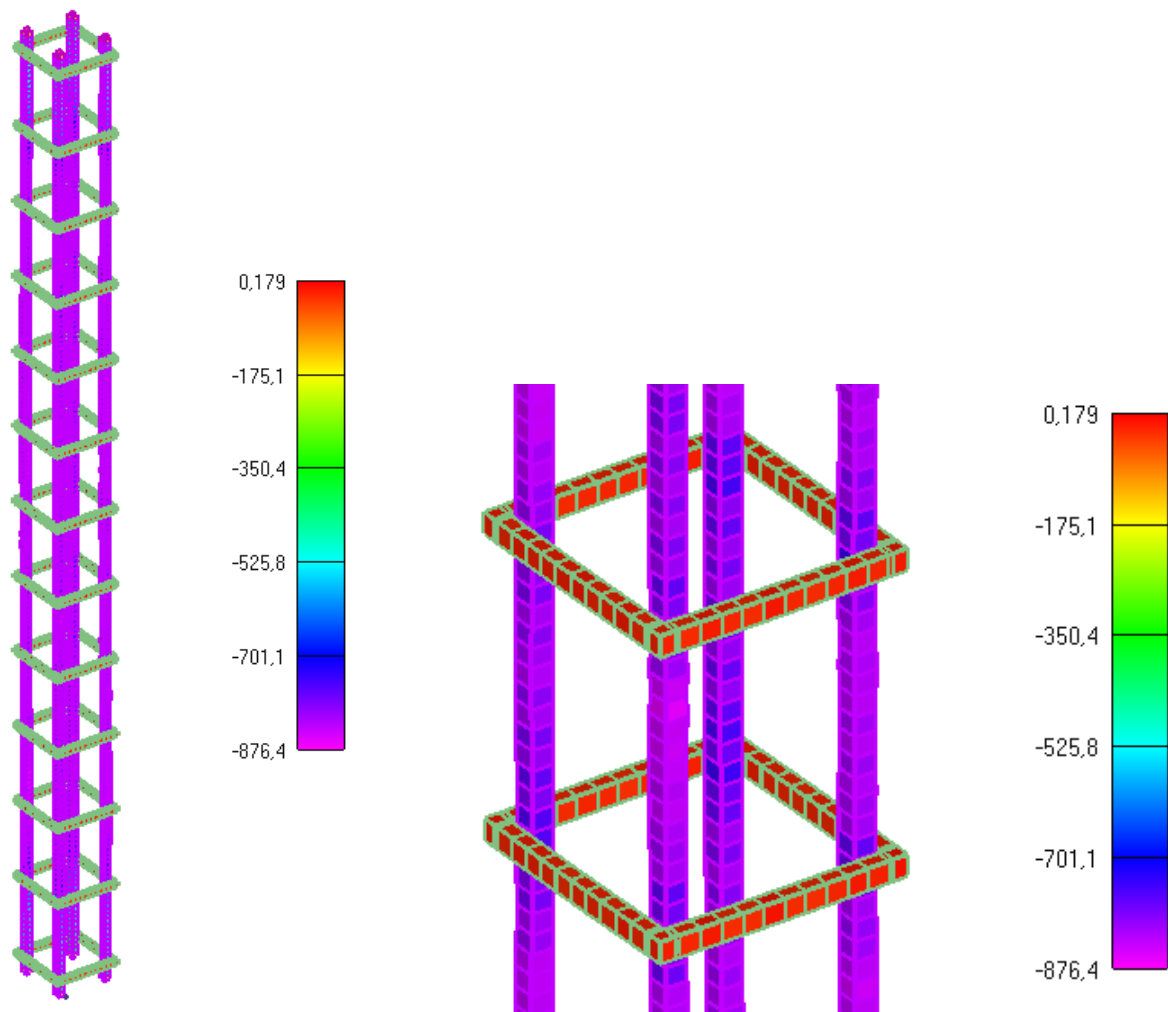


Slika 6.77:Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 895min



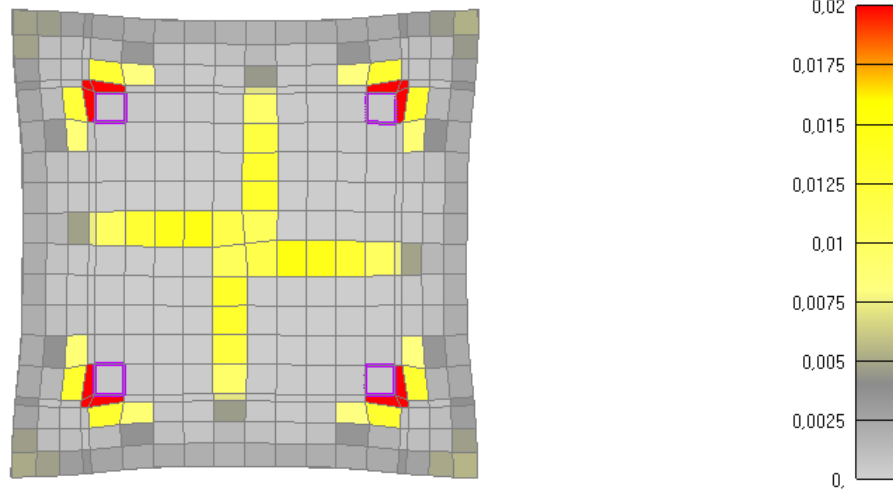
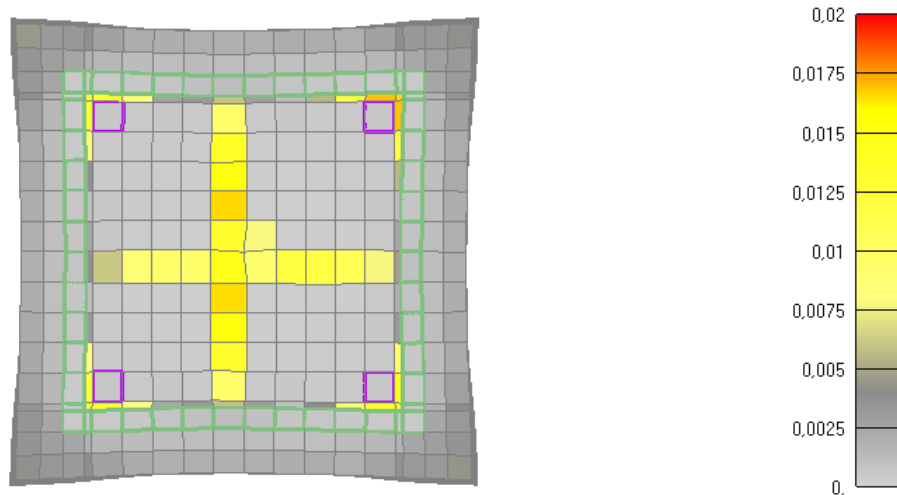
Slika 6.78:Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1615min

*KRAJ POŽARNOG PROCESA*

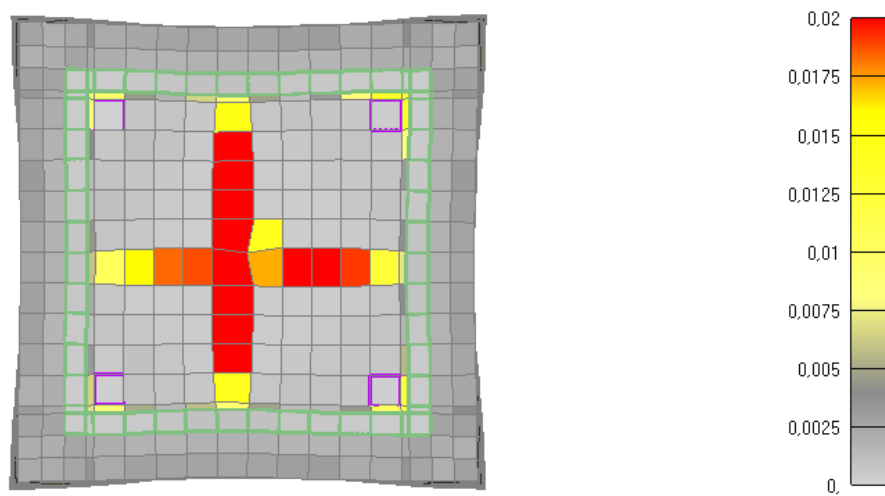


Slika 6.79: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

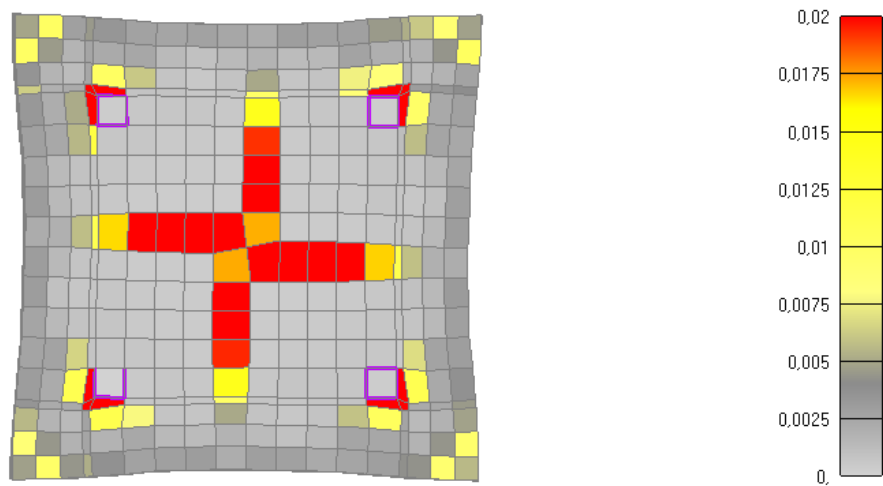
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



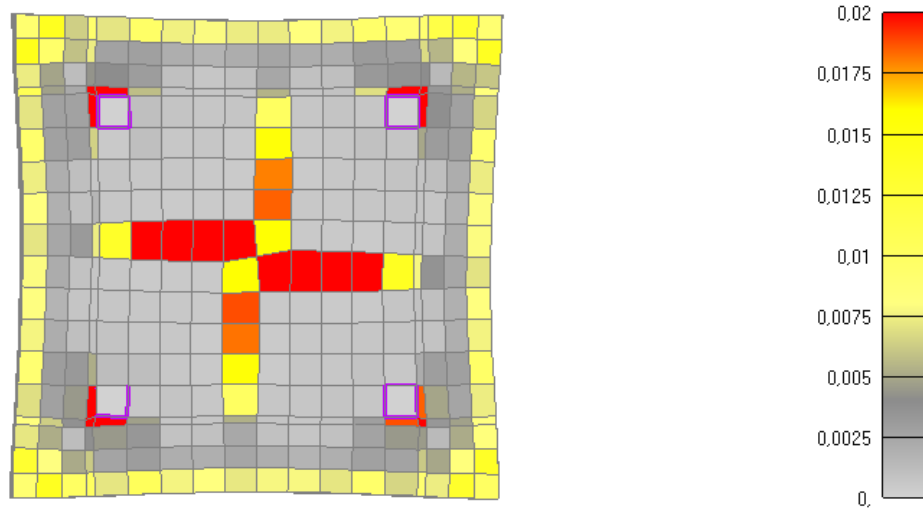
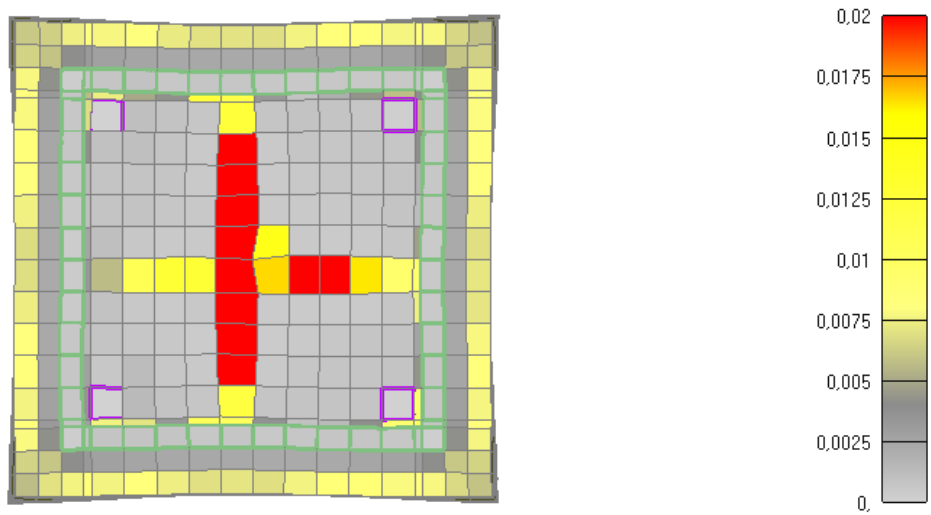
Slika 6.80: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



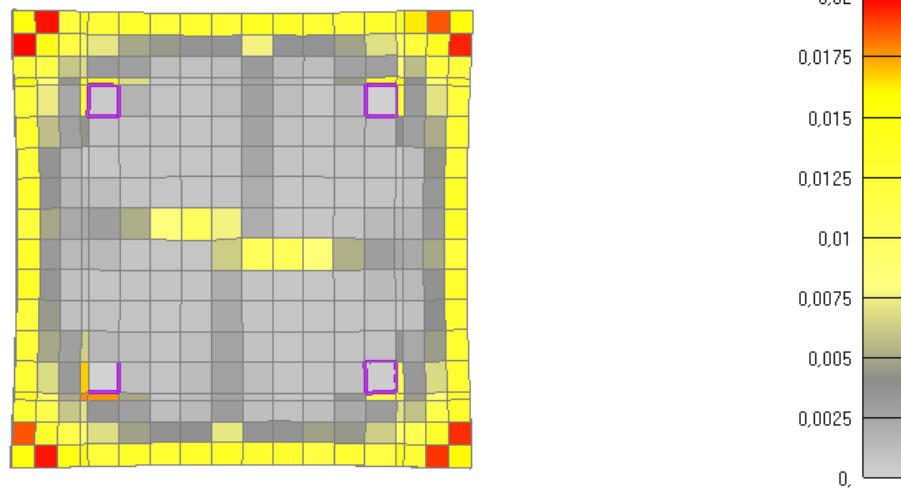
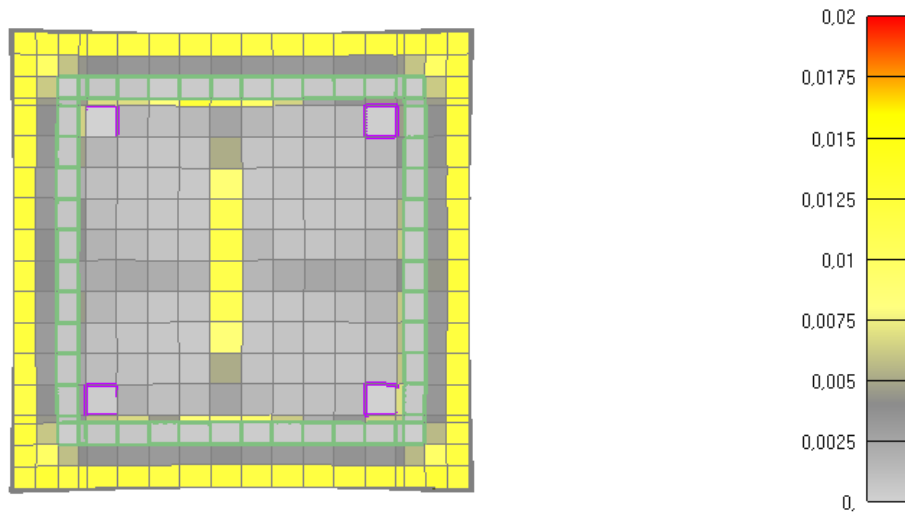
Slika 6.81: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



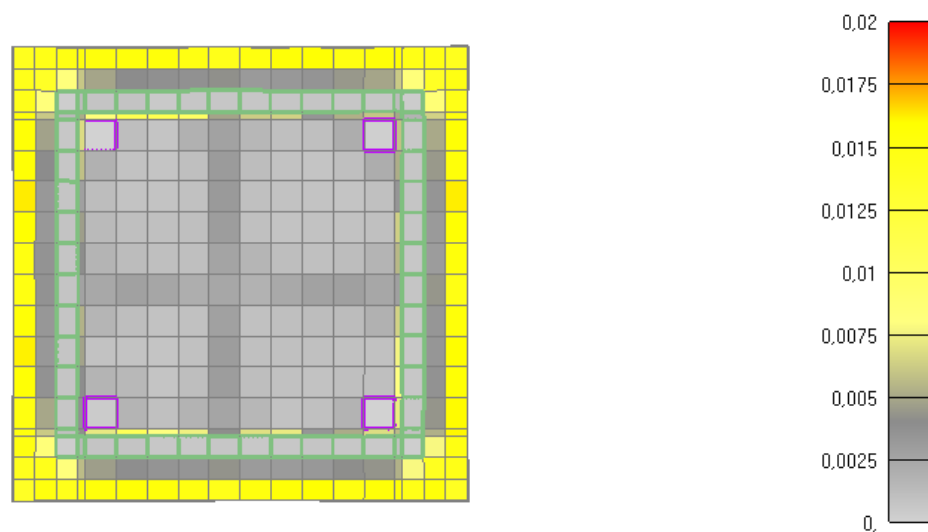
Slika 6.82: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



Slika 6.83: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 115 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona)

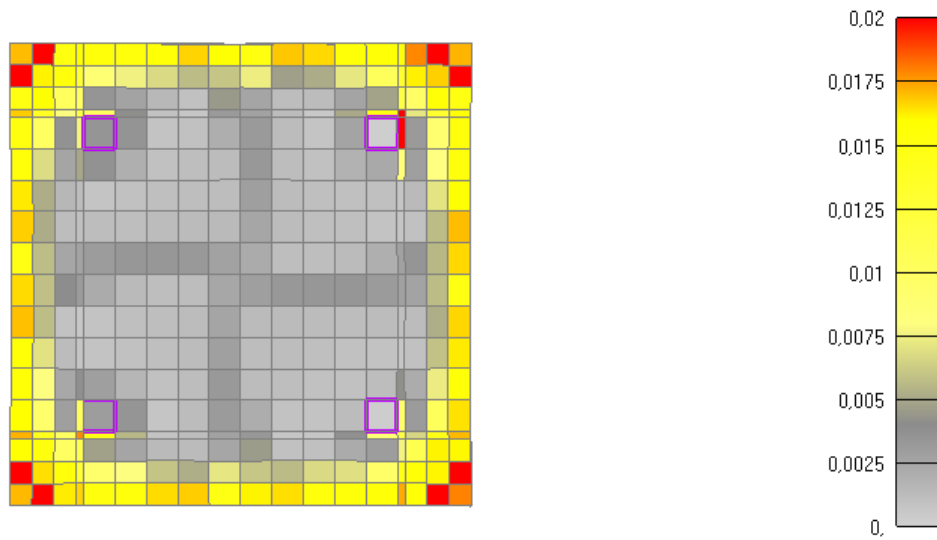


Slika 6.84: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 175 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA

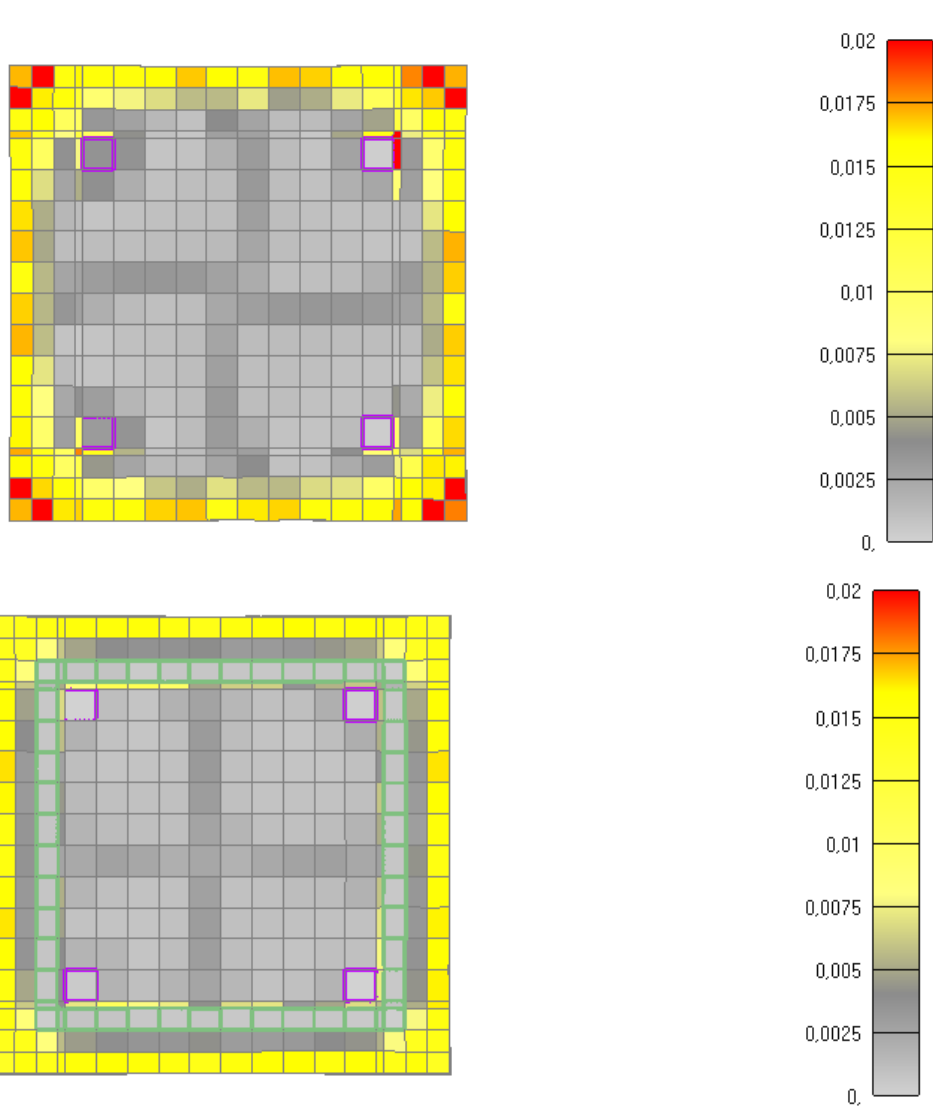


Slika 6.85: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta požara (sa sponama)

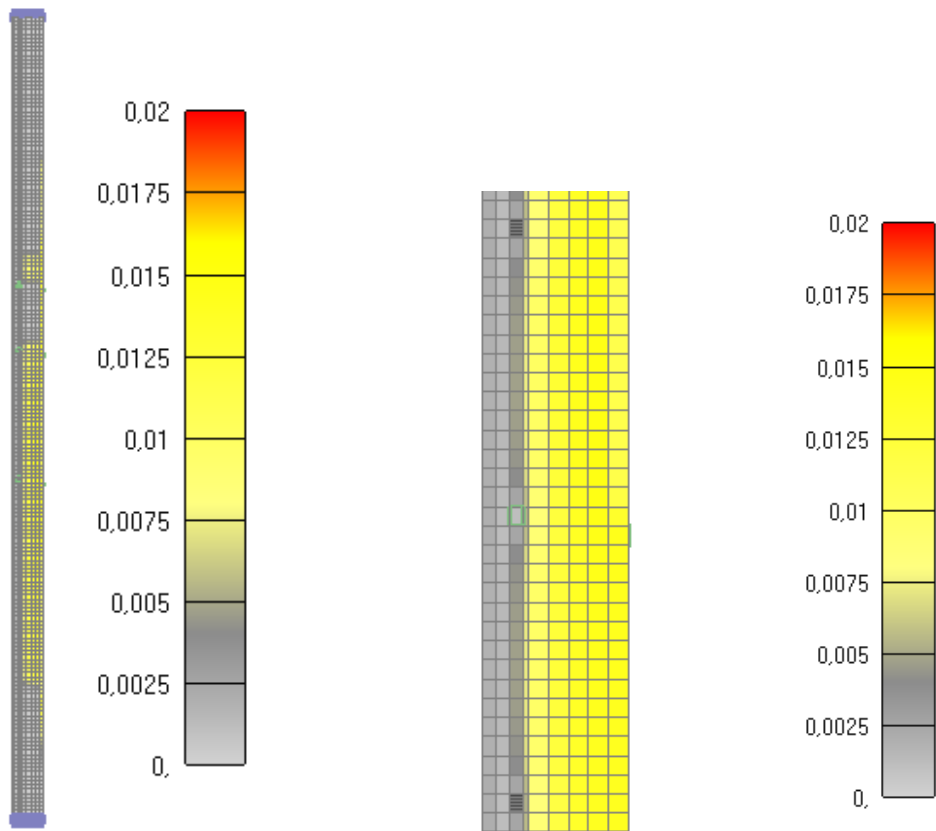




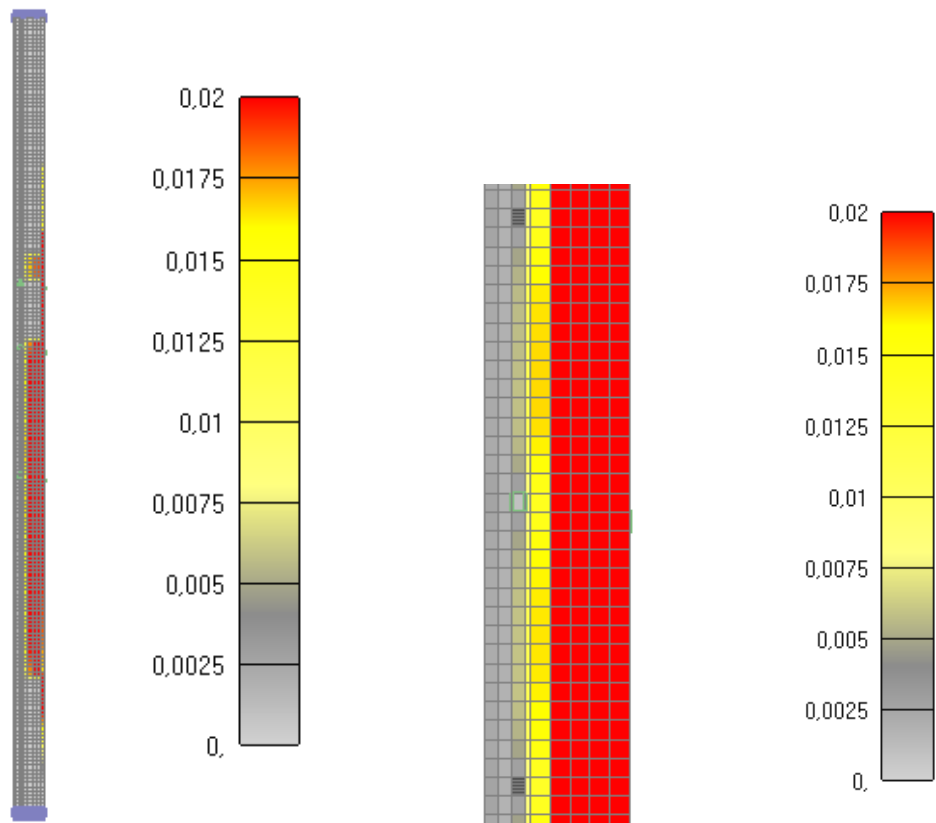
Slika 6.86: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta požara (bez spona)



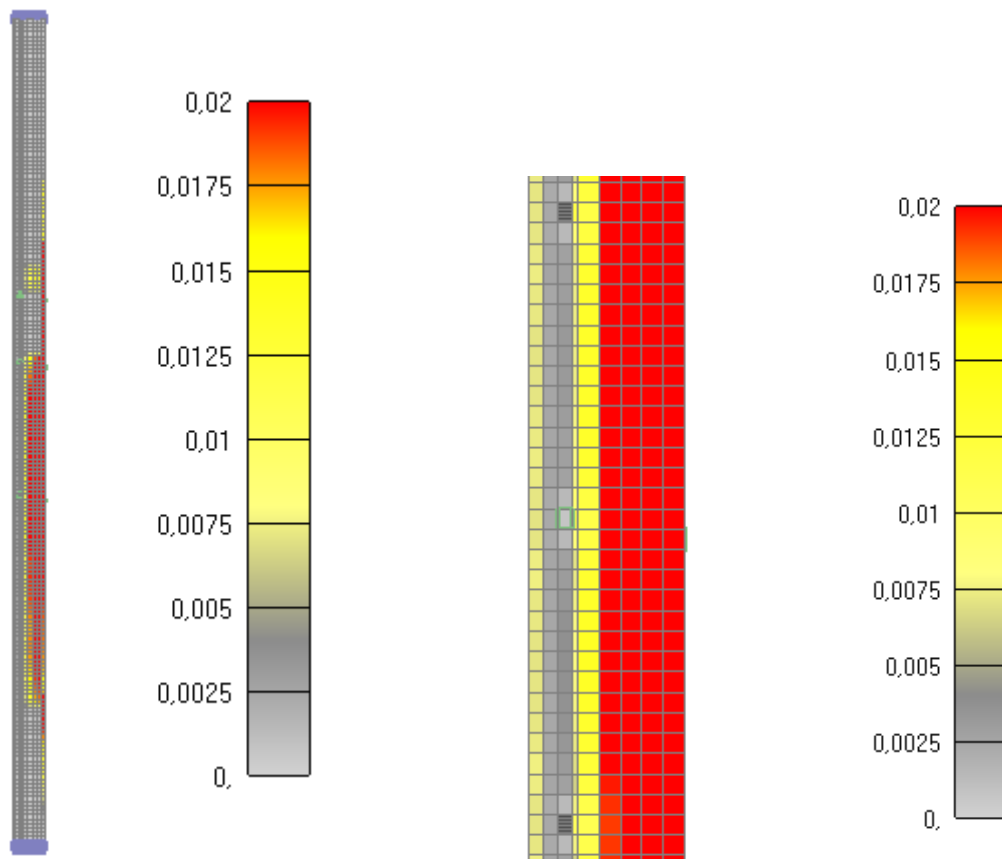
Slika 6.87: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1615 minuta (gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



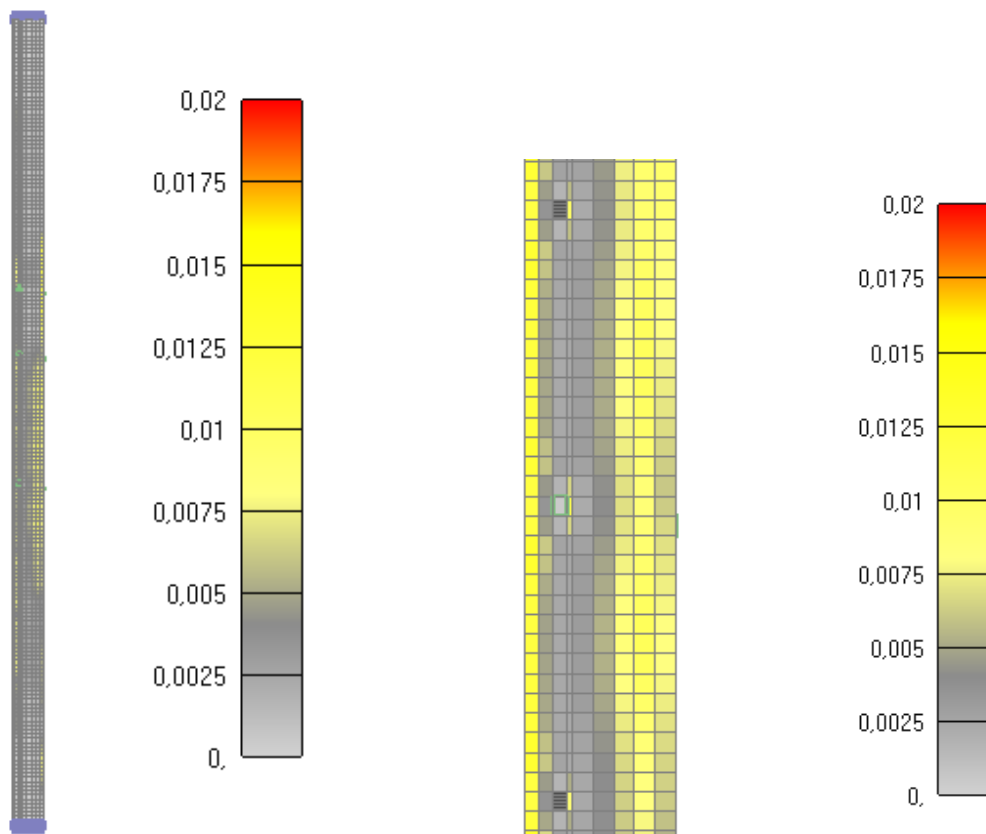
Slika 6.88: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



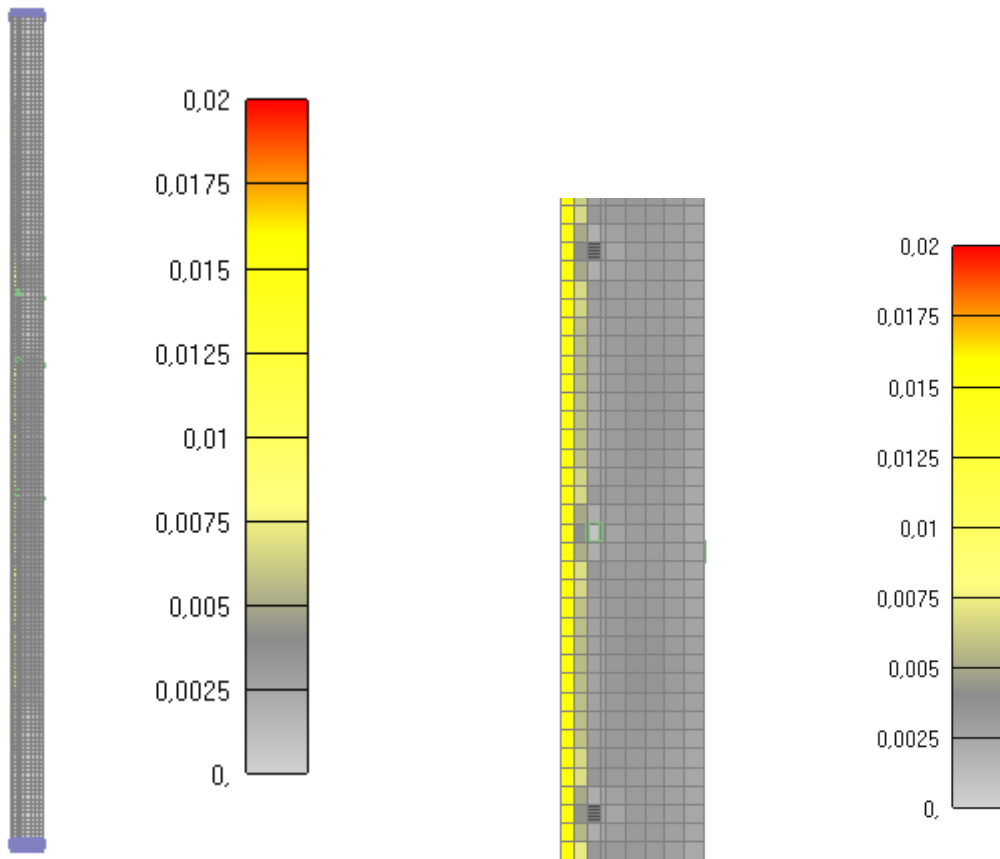
Slika 6.89: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



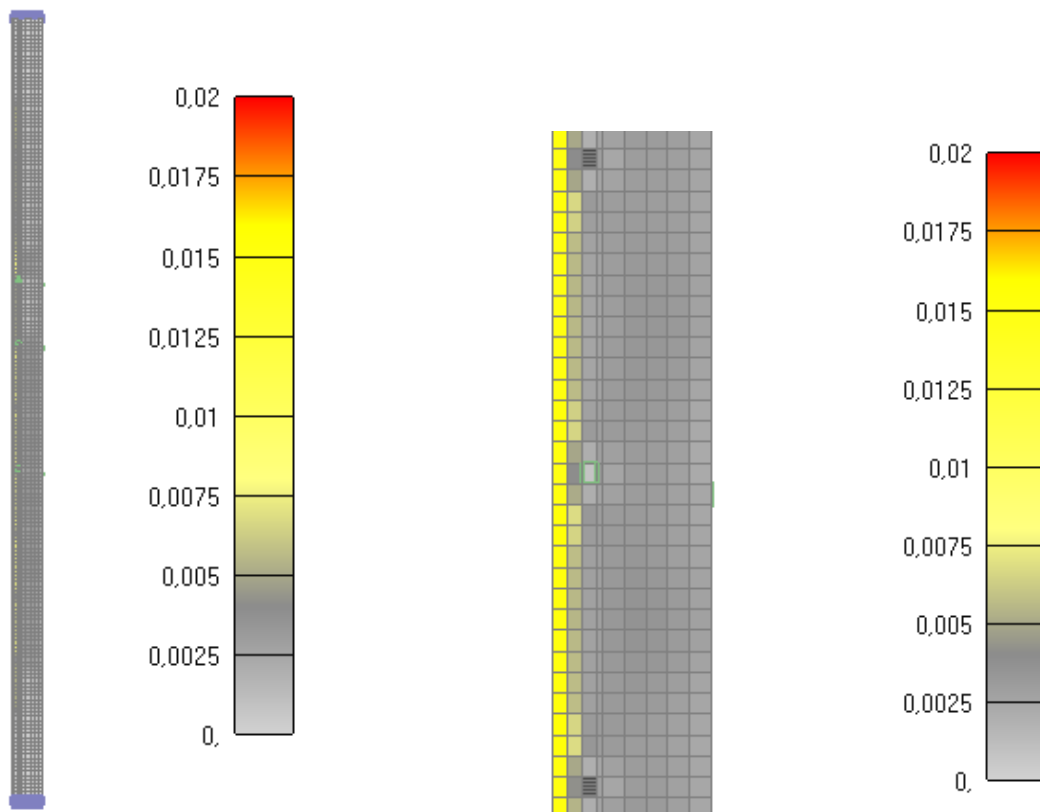
Slika 6.90: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 115 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



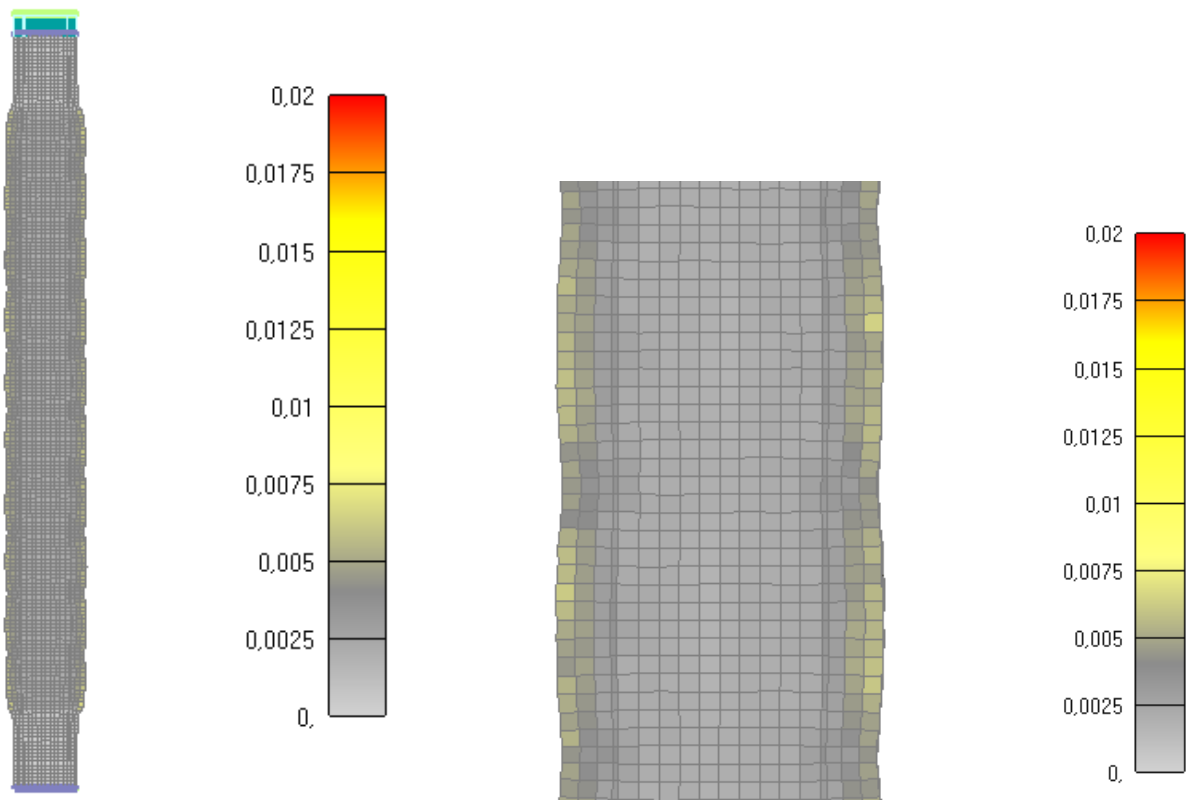
Slika 6.91: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 175 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA



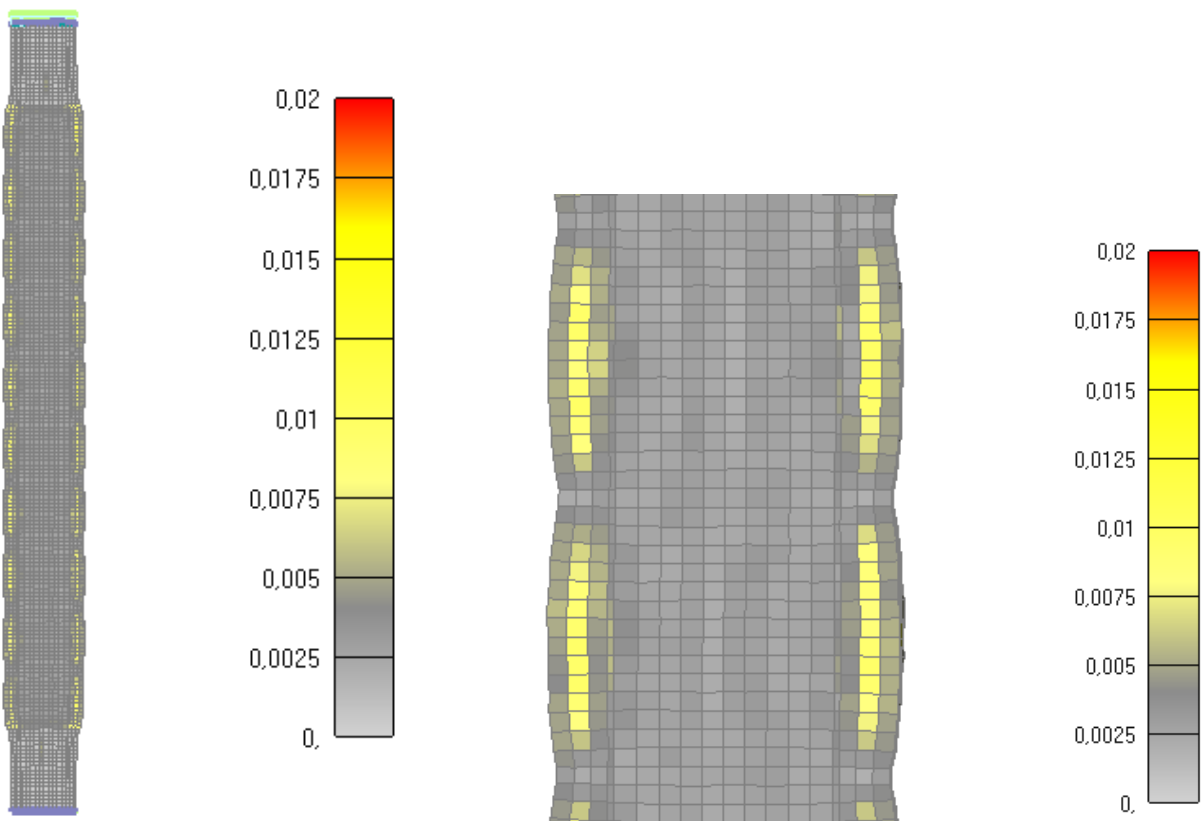
Slika 6.92: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 895 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



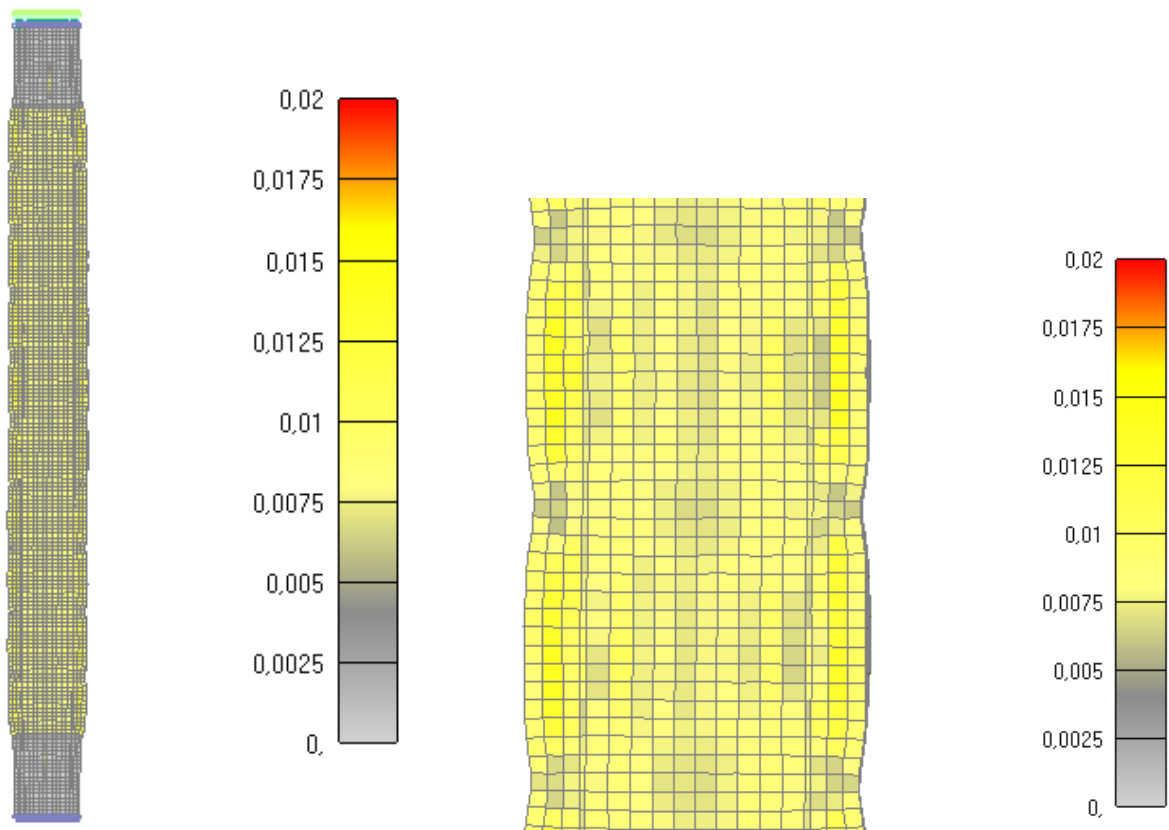
Slika 6.93: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1615 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



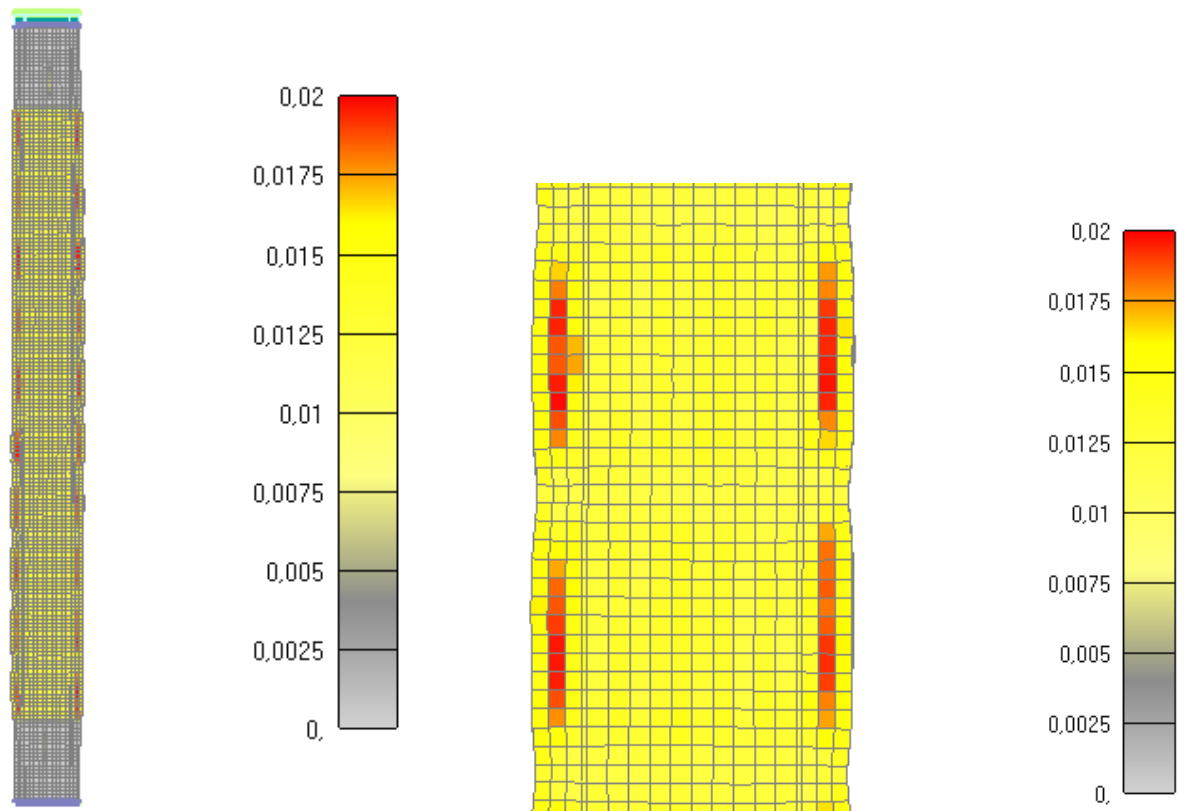
Slika 6.94: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



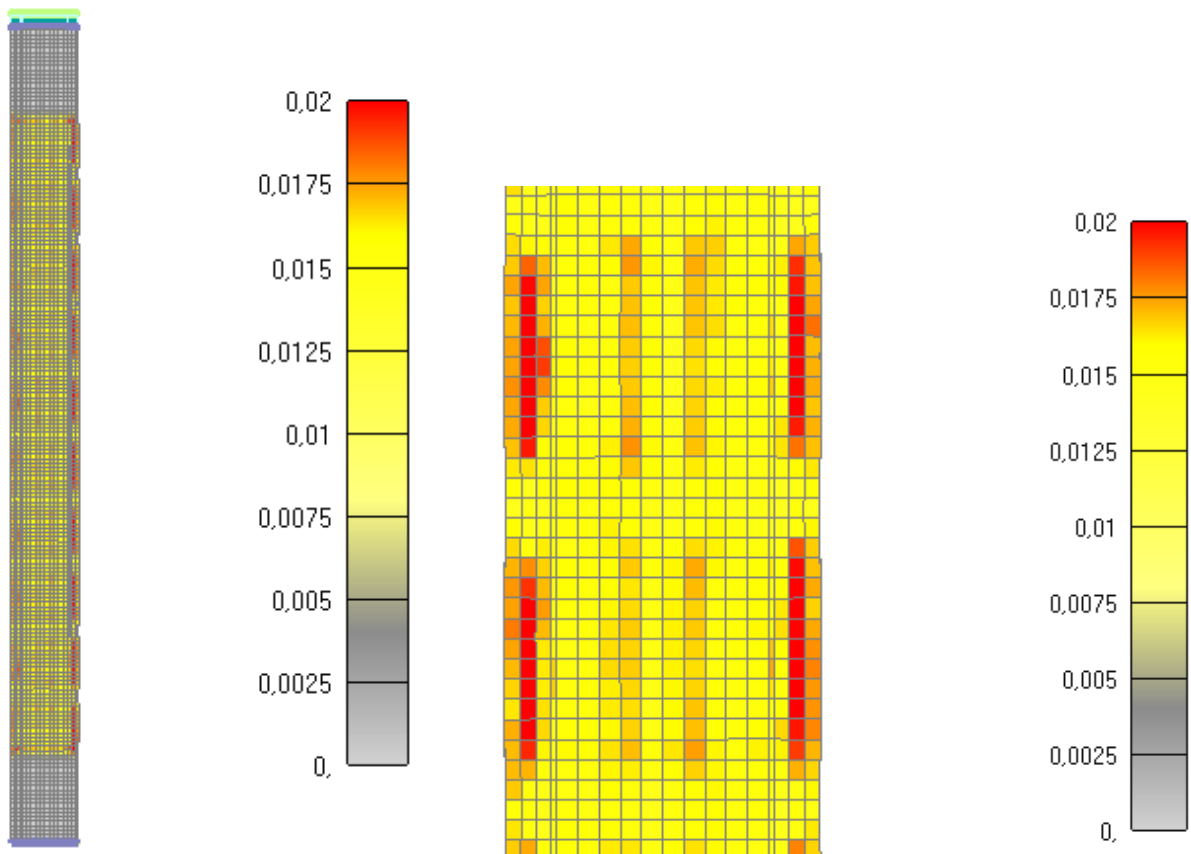
Slika 6.95: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



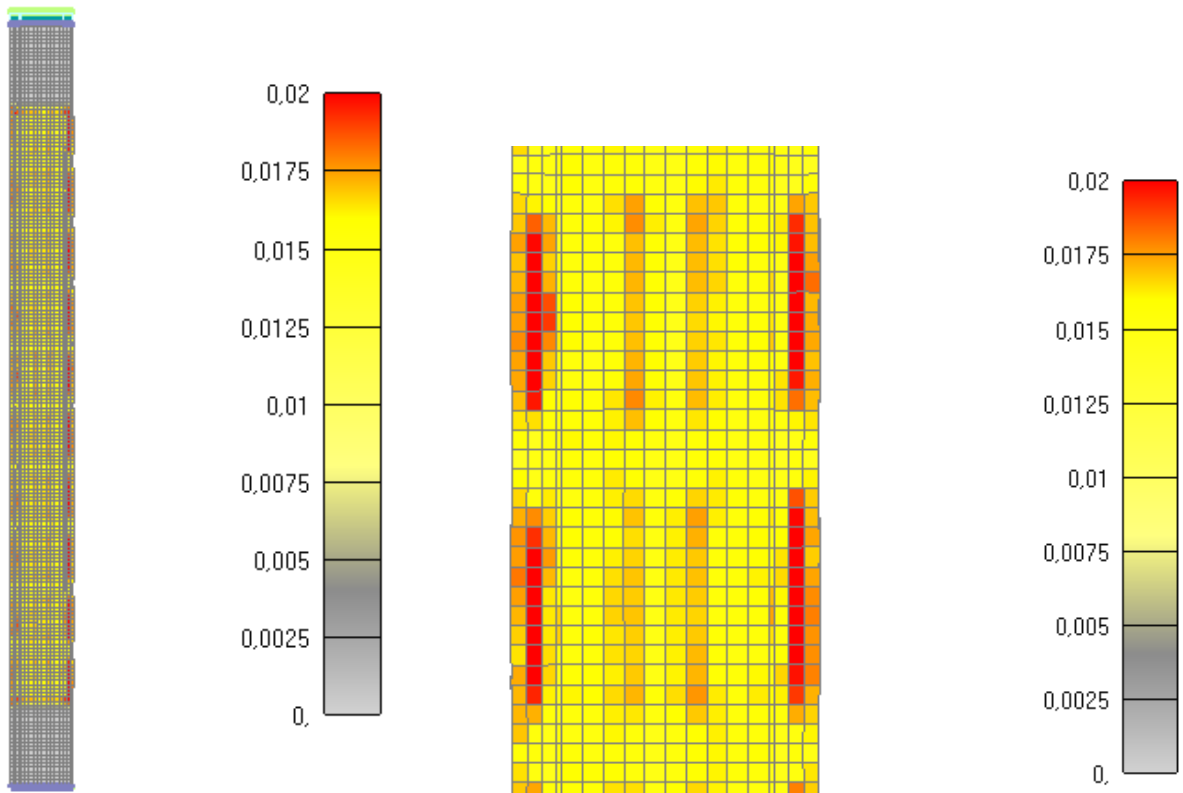
Slika 6.96: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 115 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.97: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 175 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.98: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 895 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

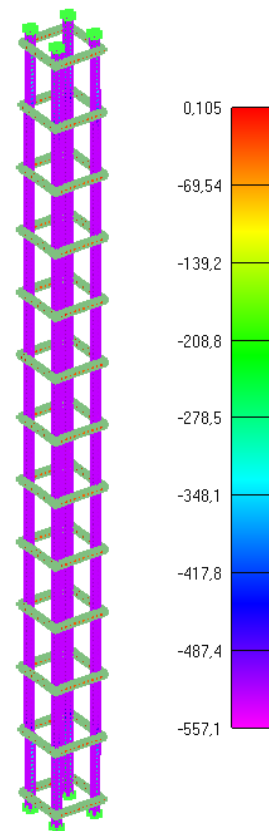


Slika 6.99: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1615 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA

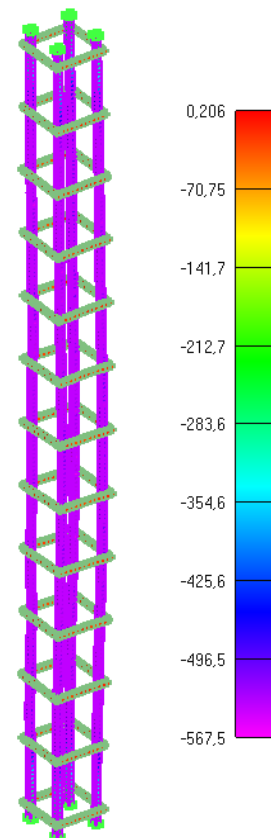
### **6.2.3.2. 2.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 60 minuta)**

U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu) te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 60 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 60 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna iznosu sile tako da taj dijagram nema potrebe ponovno prikazivati jer je on identičan dijagramu prikazanom u poglavlju za validacijski slučaj stupa A (6.32.)

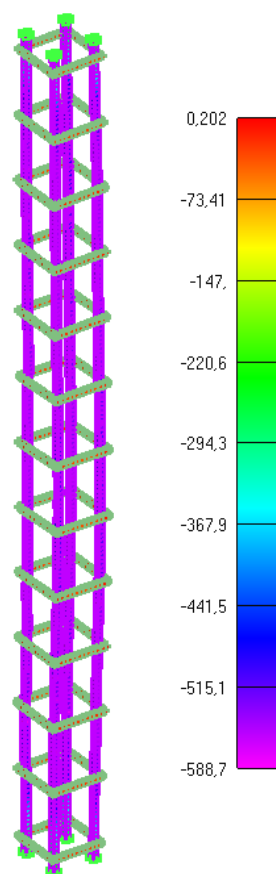




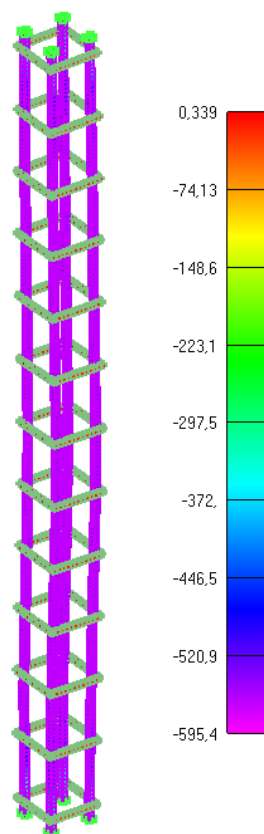
Slika 6.100: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



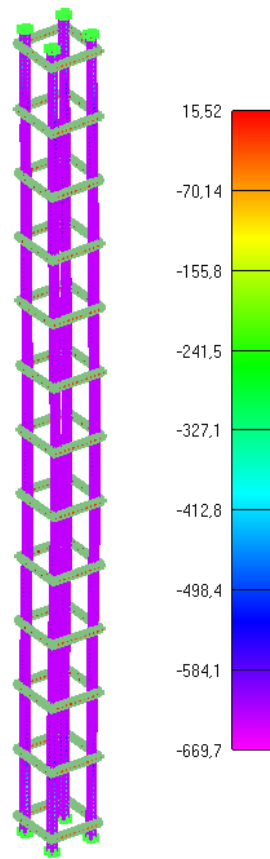
Slika 6.101: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA*



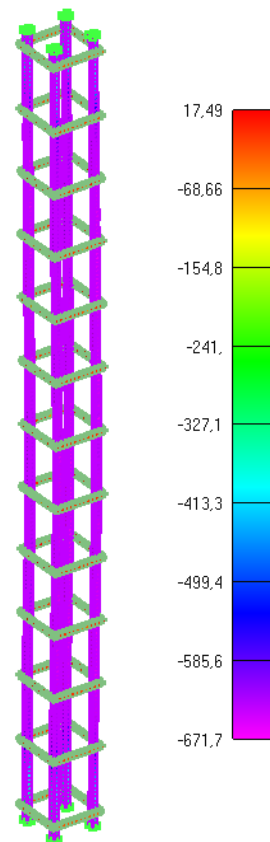
Slika 6.102:Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 115min



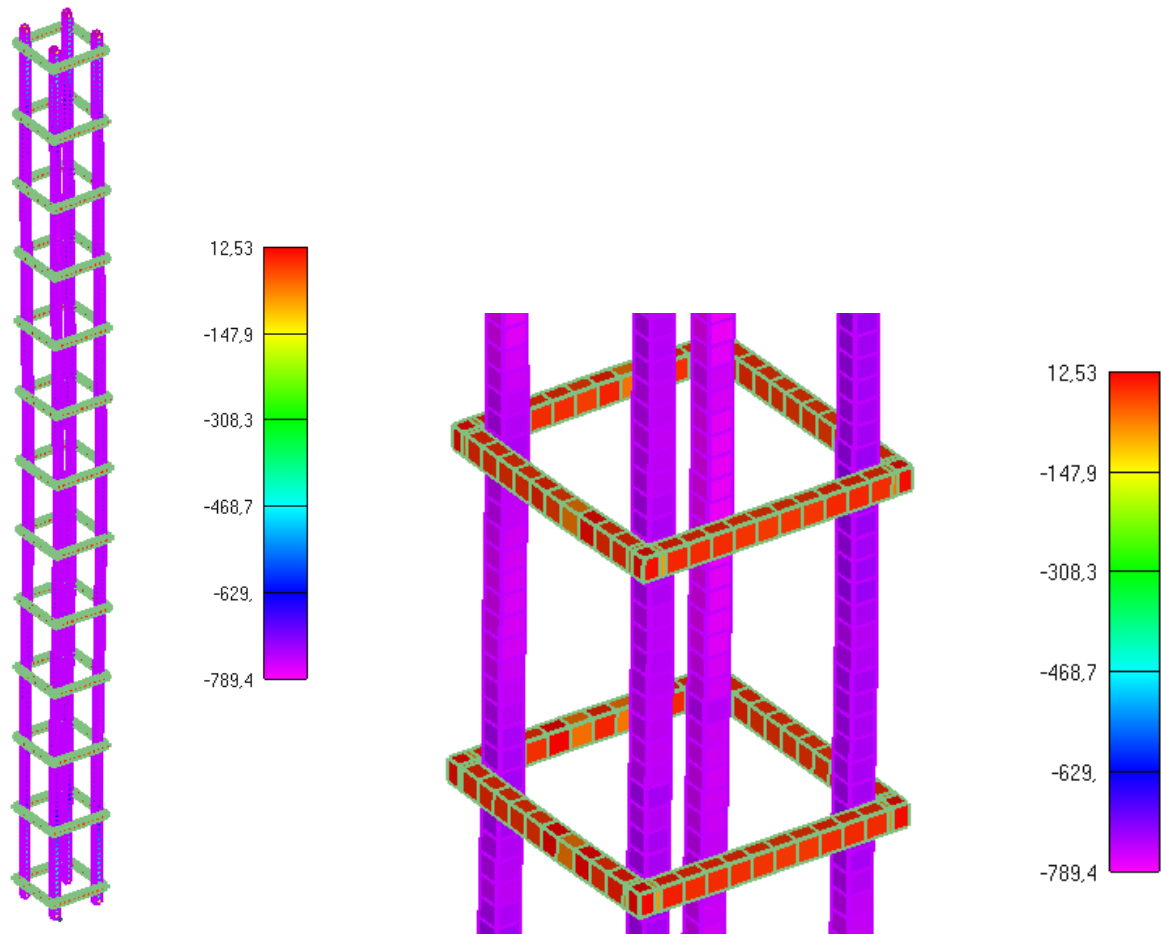
Slika 6.103:Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 175min  
*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*



Slika 6.104: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 895min

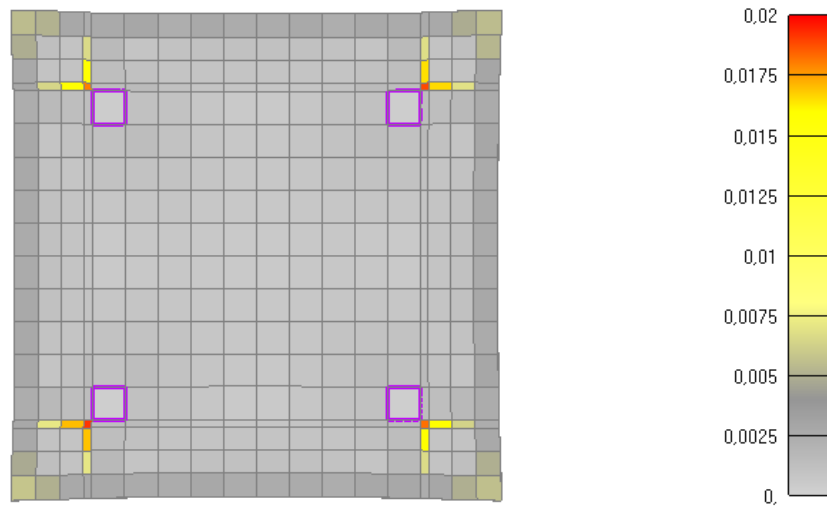
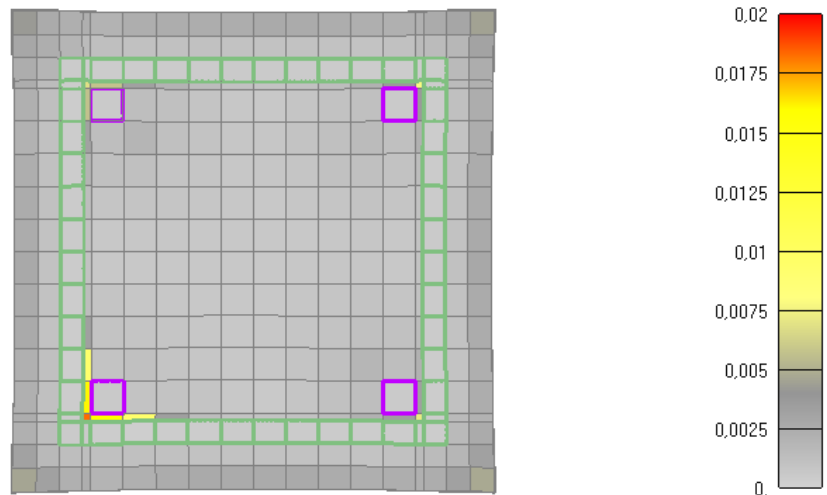


Slika 6.105: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1615min  
*KRAJ POŽARNOG PROCESA*

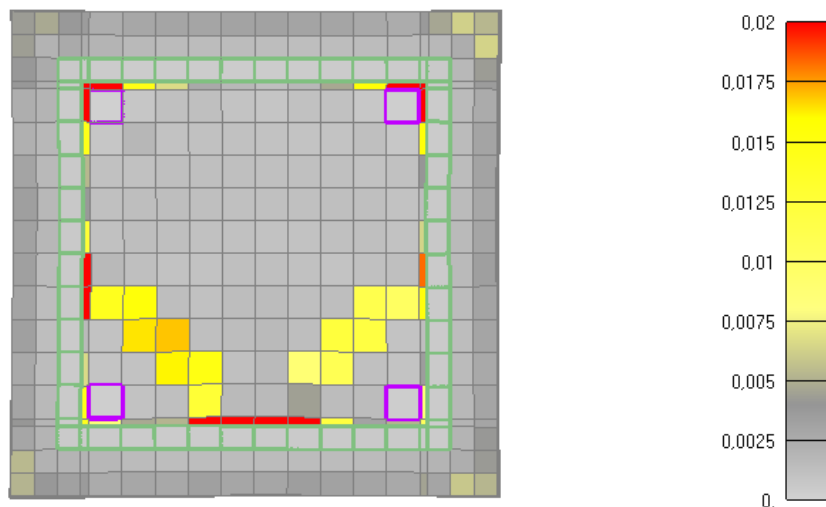


Slika 6.106: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

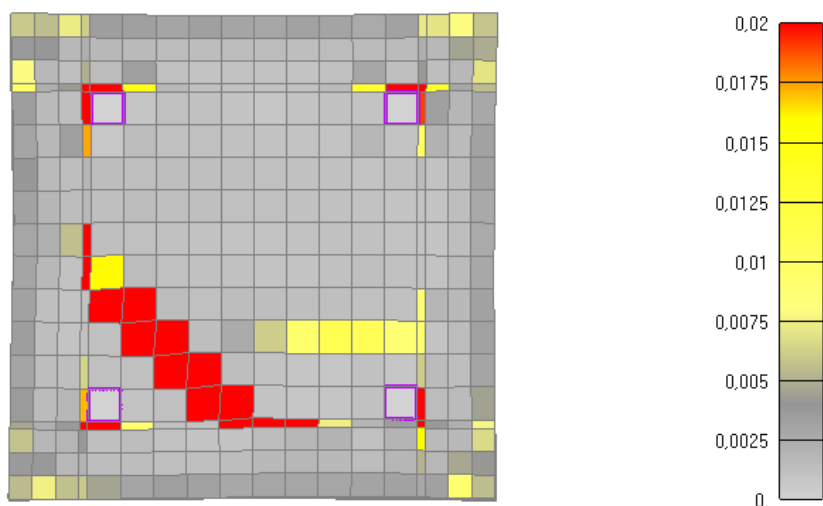
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



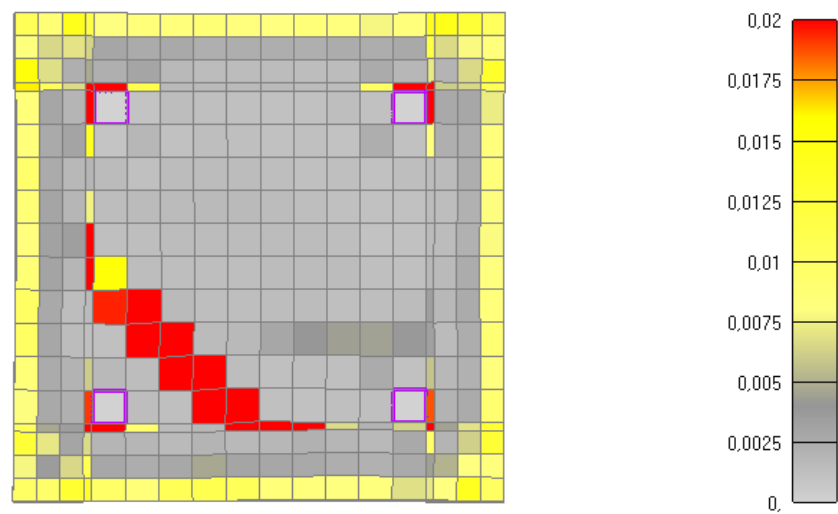
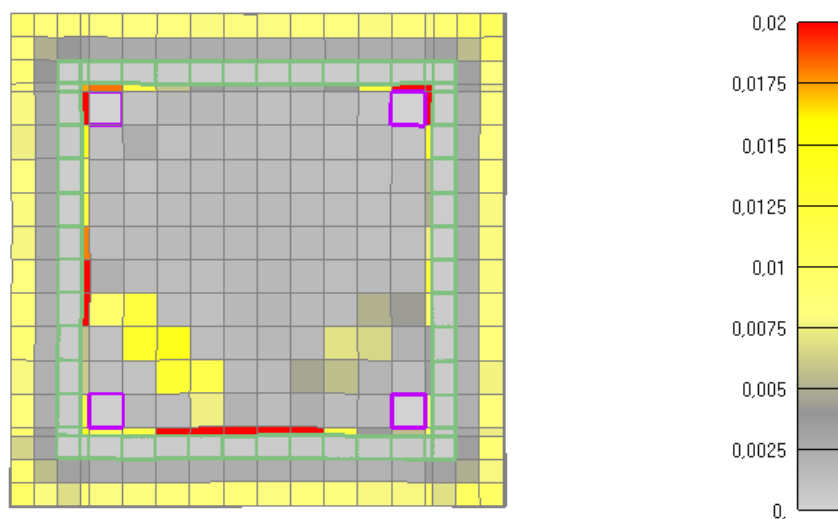
Slika 6.107: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



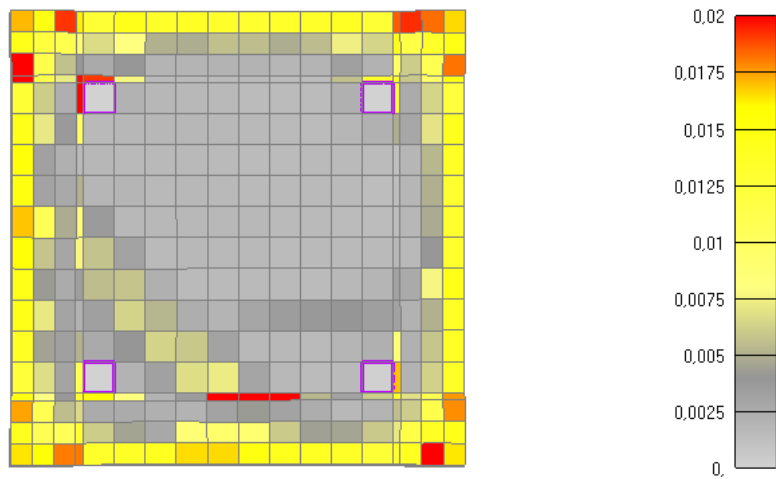
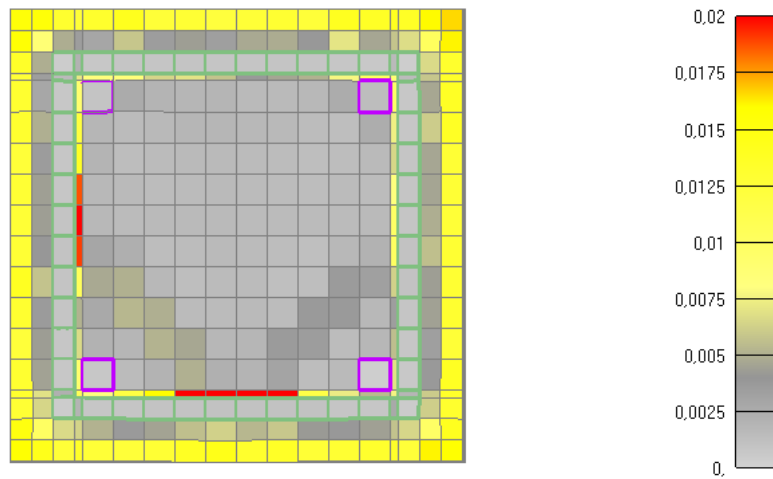
Slika 6.108: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



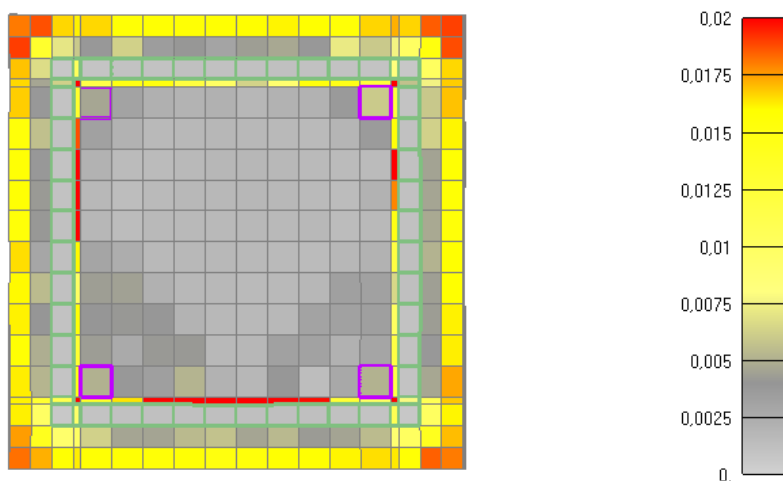
Slika 6.109: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA)



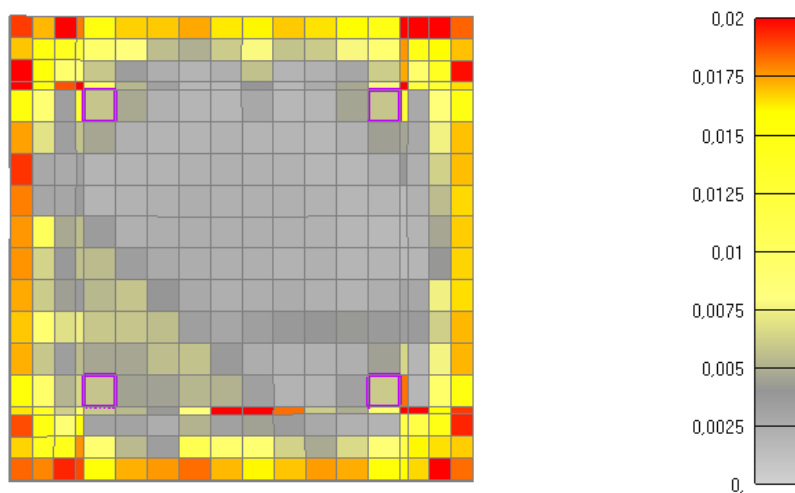
Slika 6.110: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 115 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona)



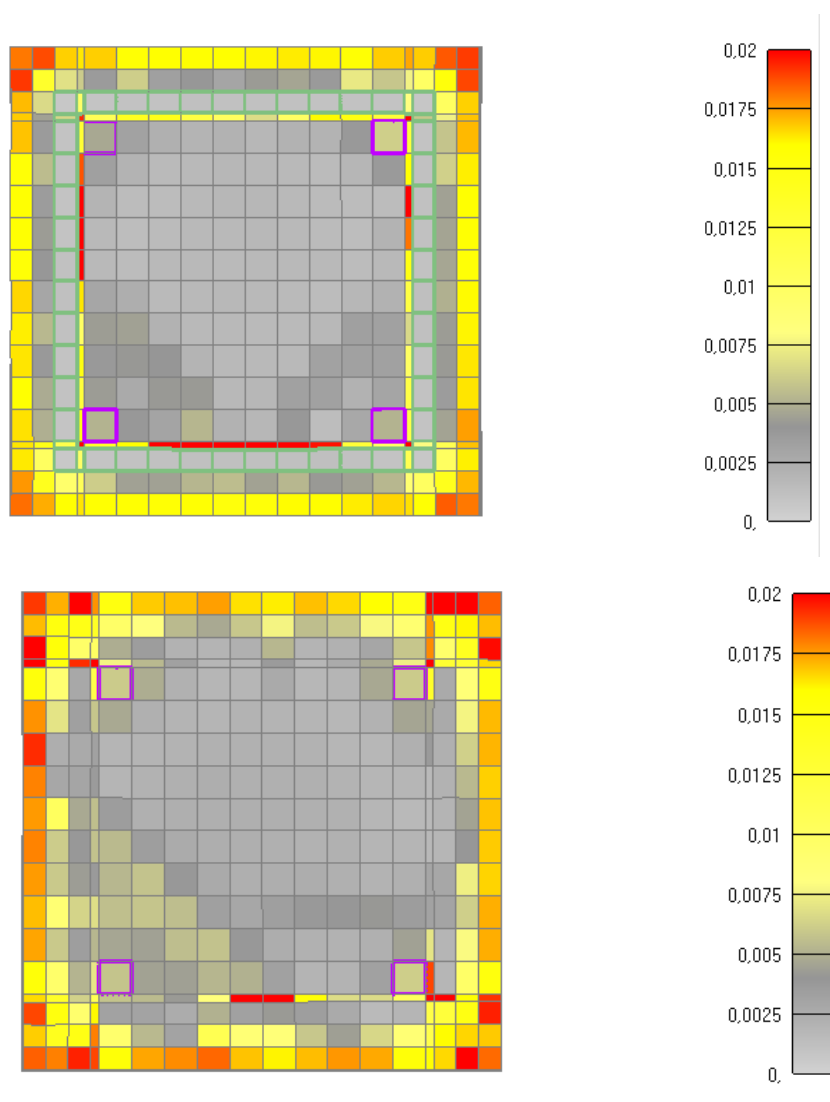
Slika 6.111: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 175 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG  
HLAĐENJA



Slika 6.112: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta požara  
(sa sponama)

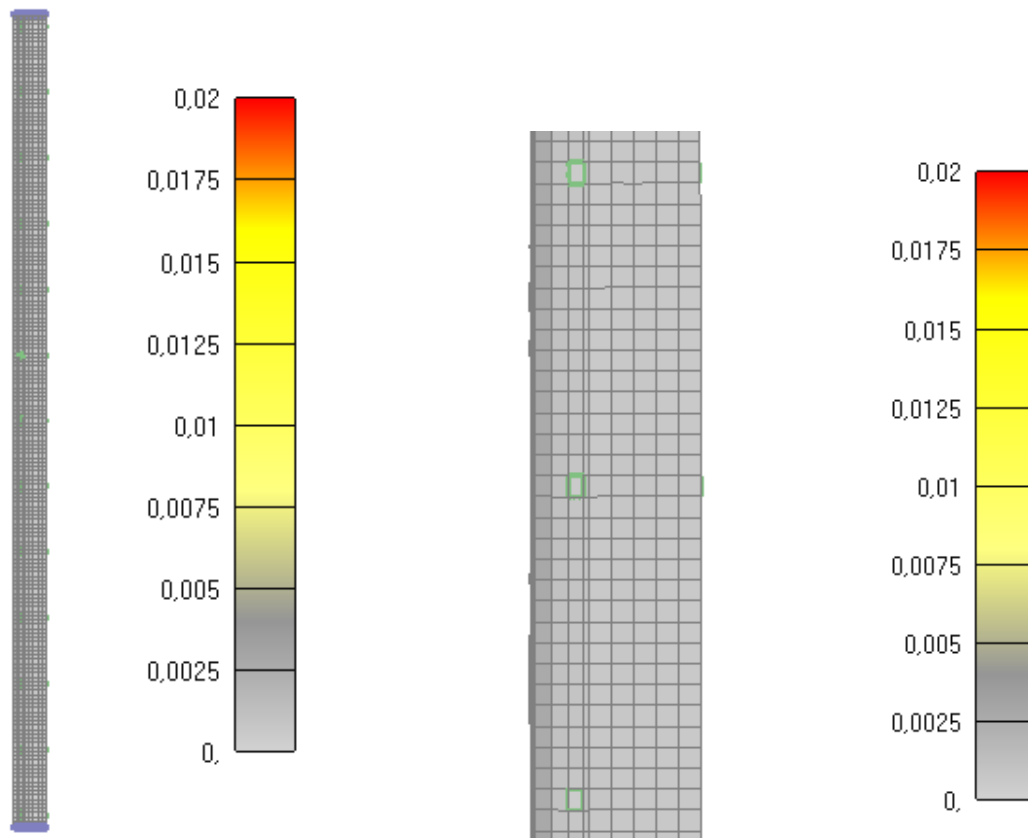


Slika 6.113: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 895 minuta požara (bez spona)

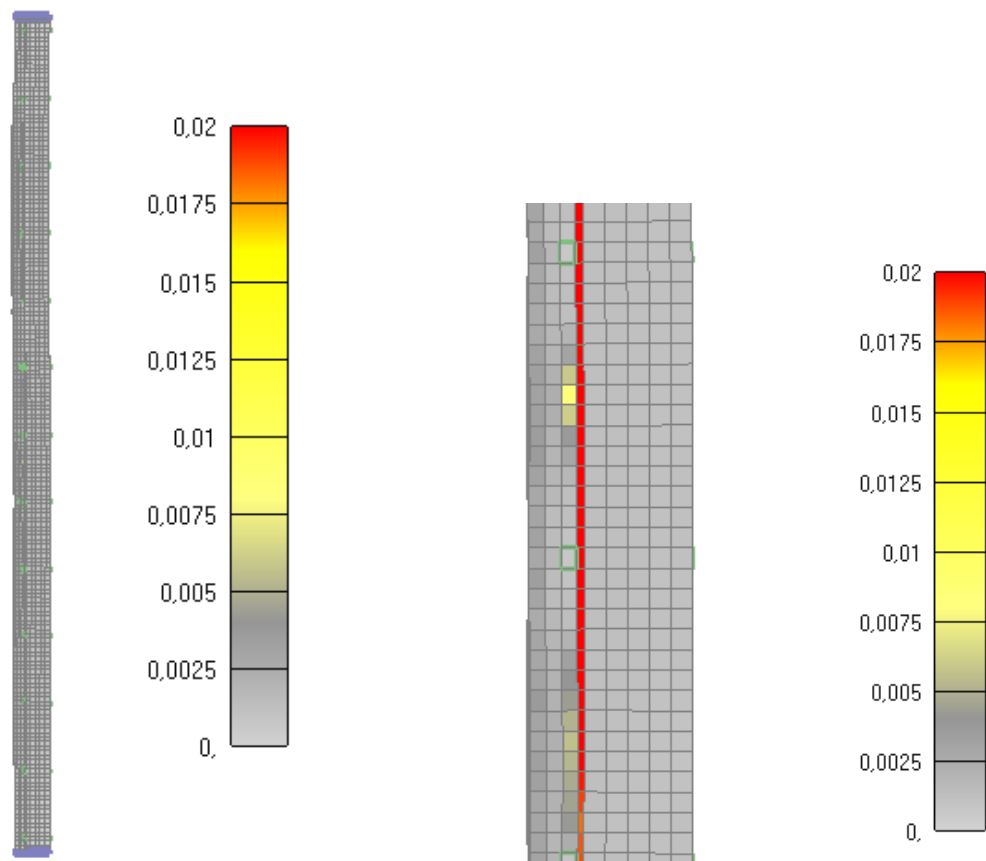


Slika 6.114: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1615 minuta (gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

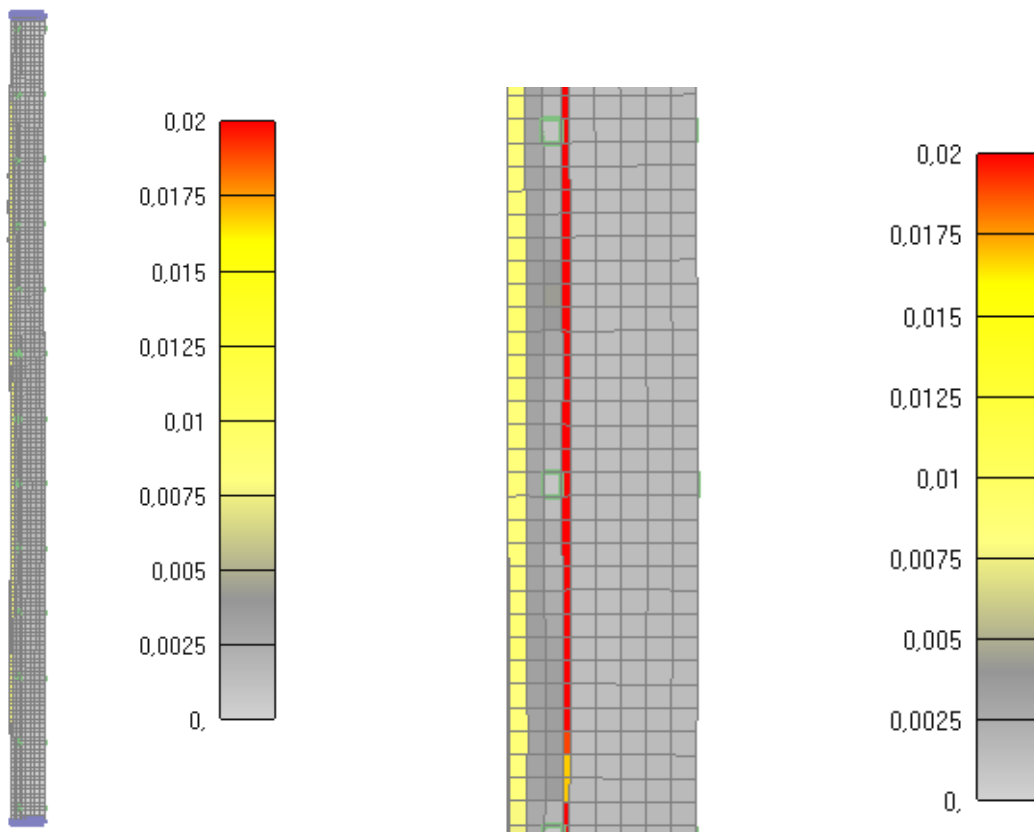




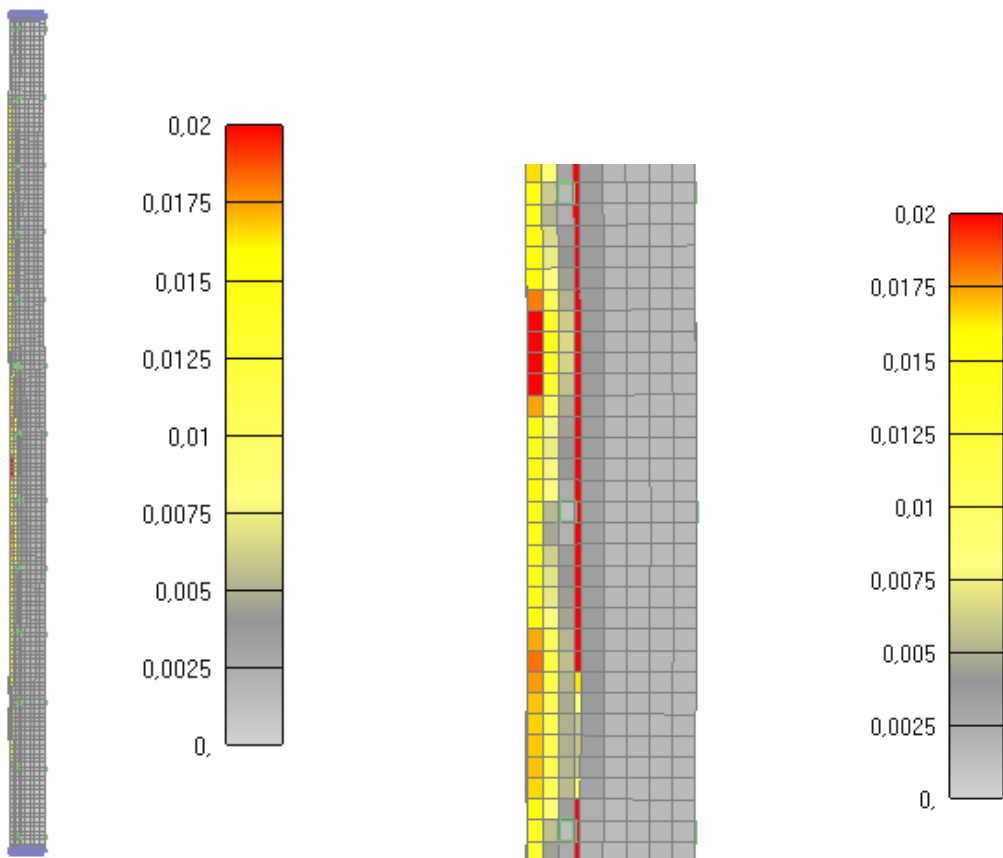
Slika 6.115: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



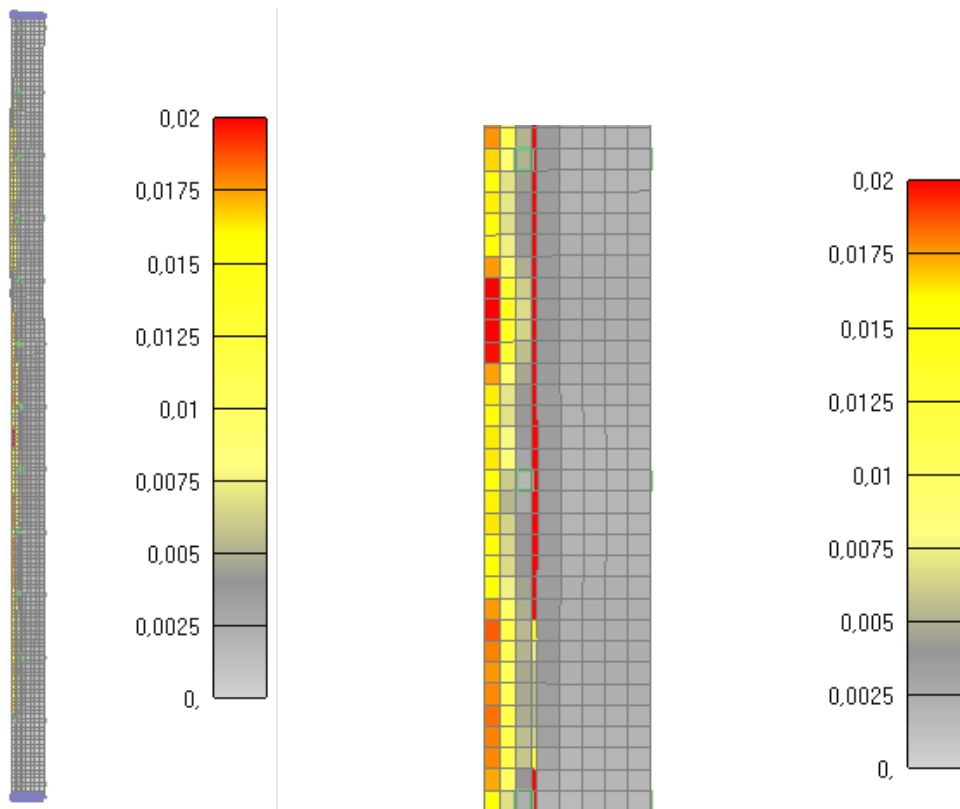
Slika 6.116: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



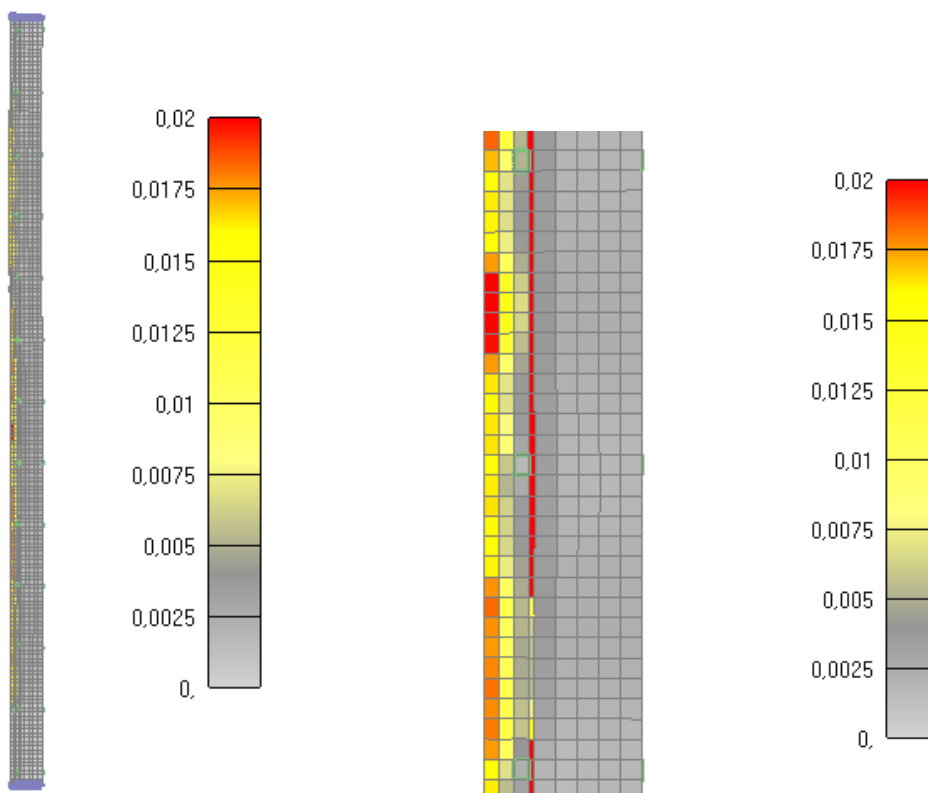
Slika 6.117: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 115 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



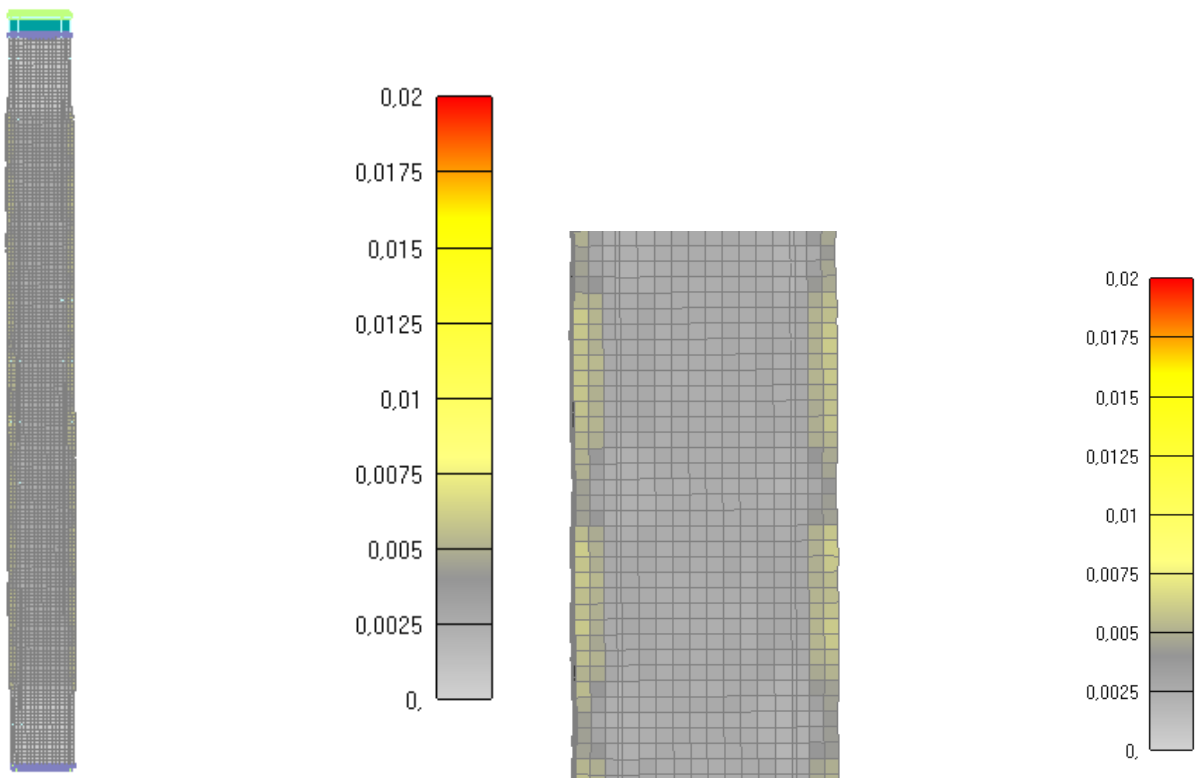
Slika 6.118: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 175 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA



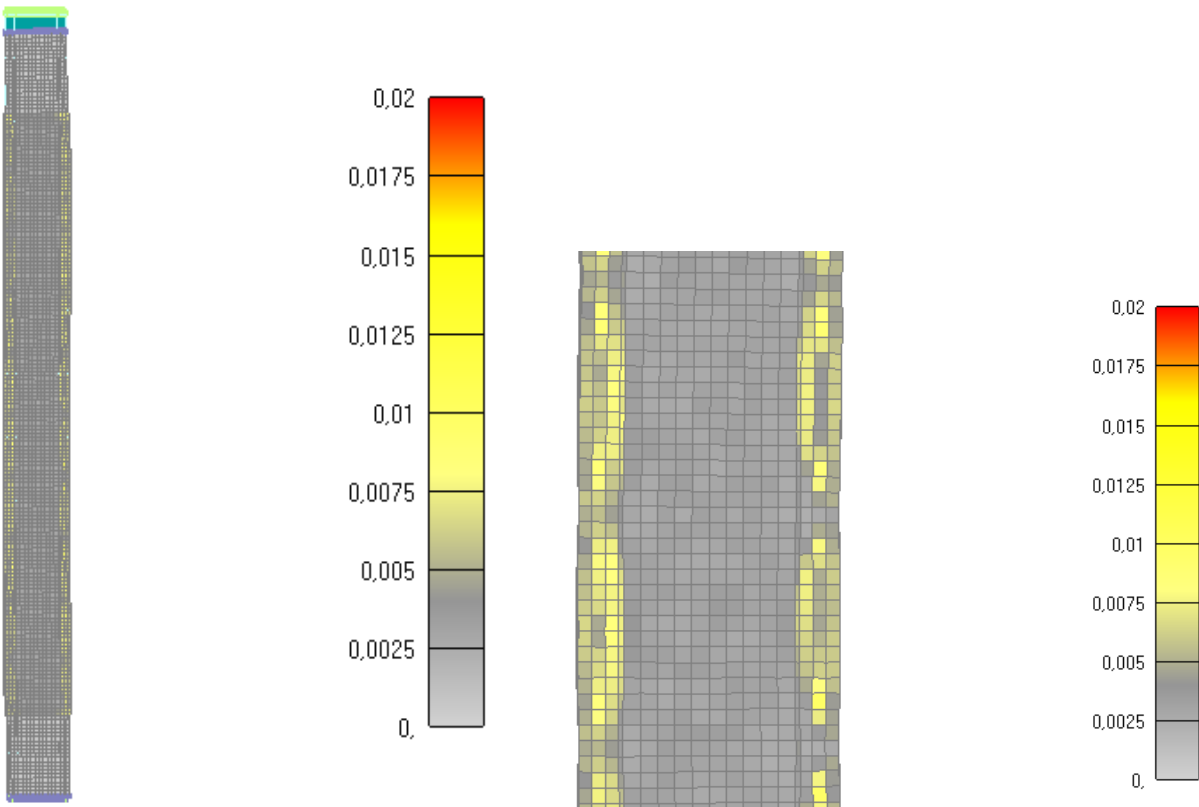
Slika 6.119: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 895 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



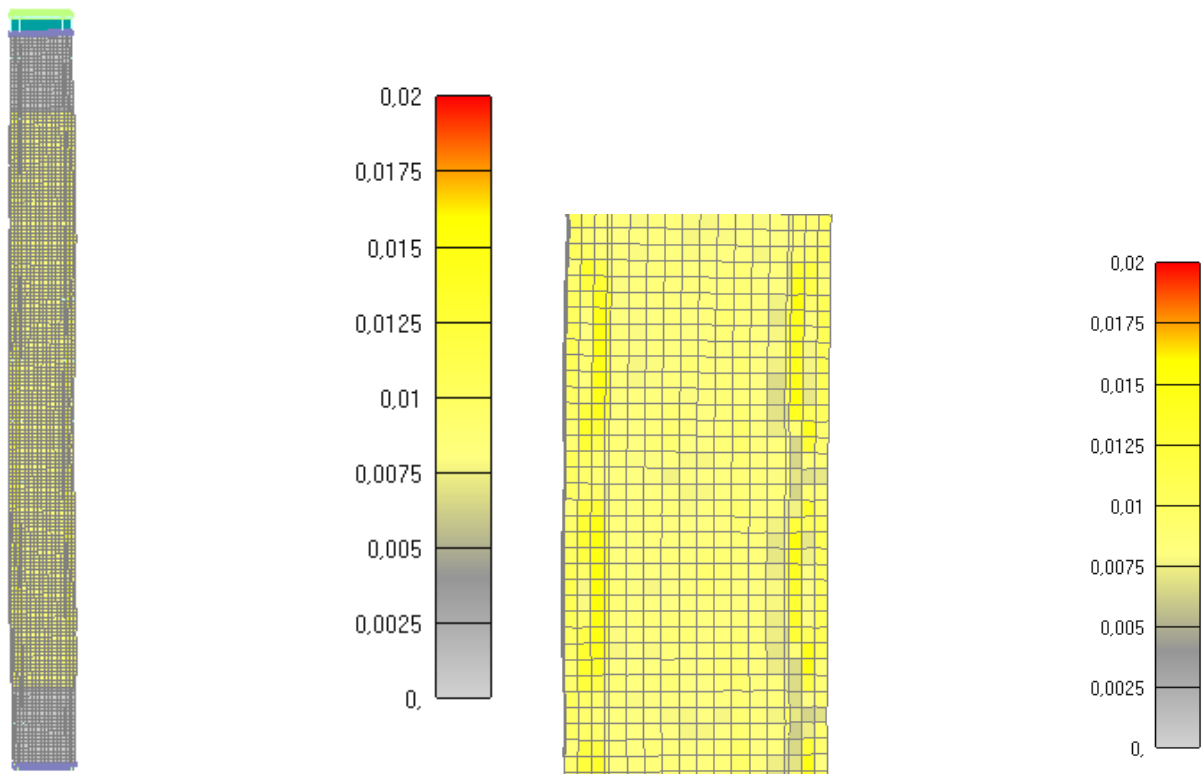
Slika 6.120: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1615 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA



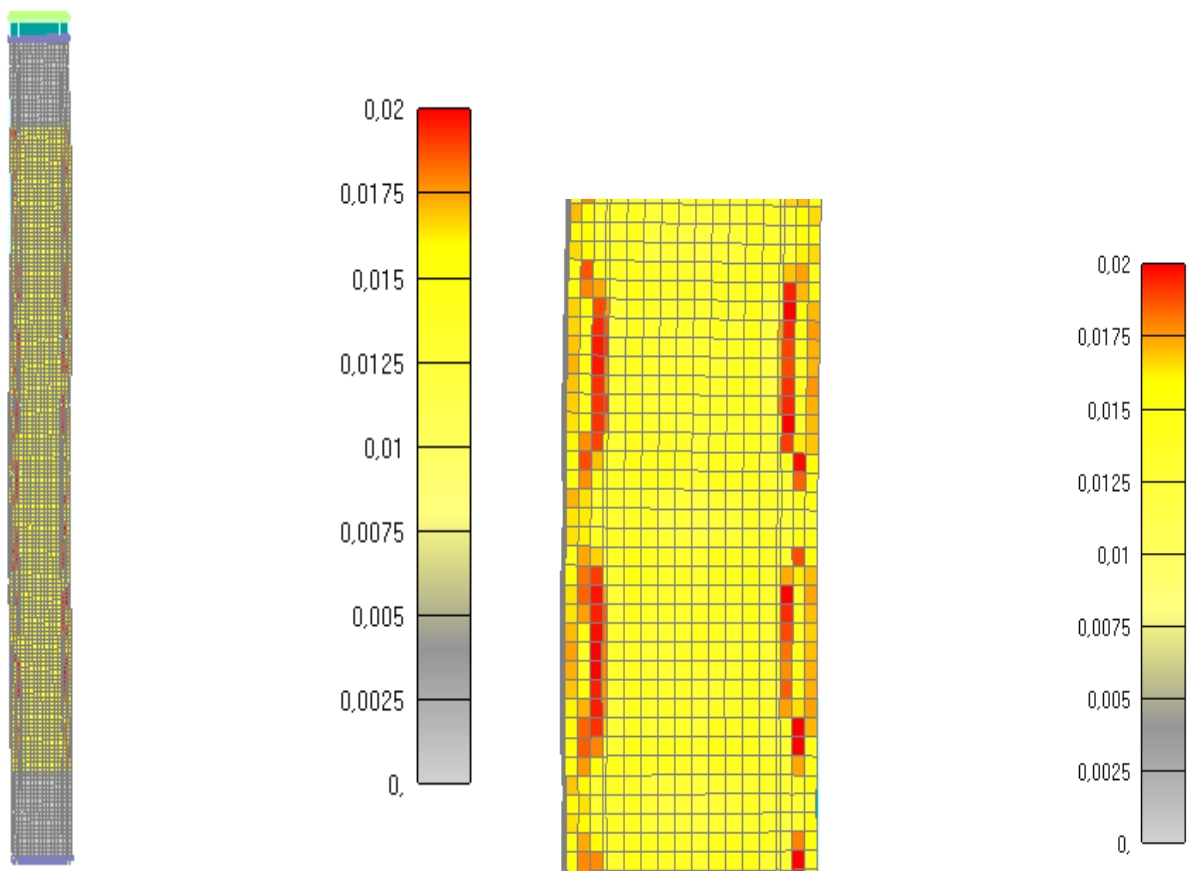
Slika 6.121: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



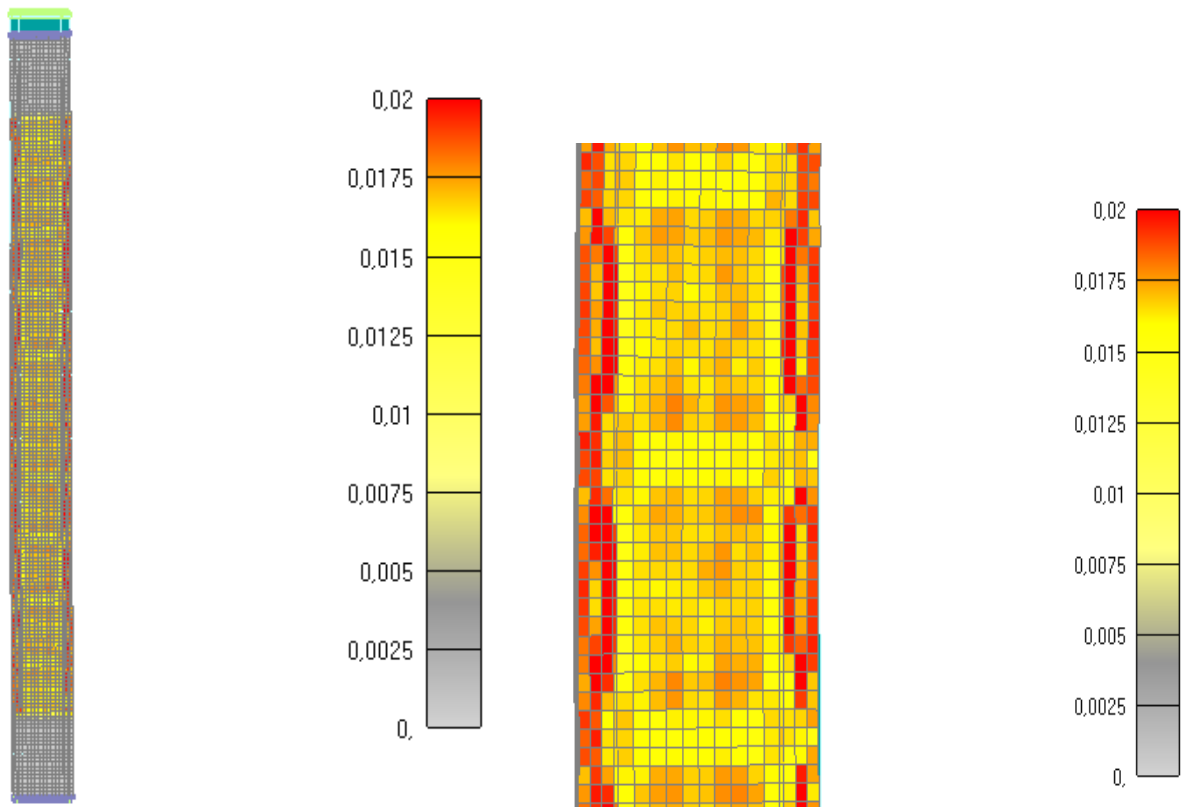
Slika 6.122: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



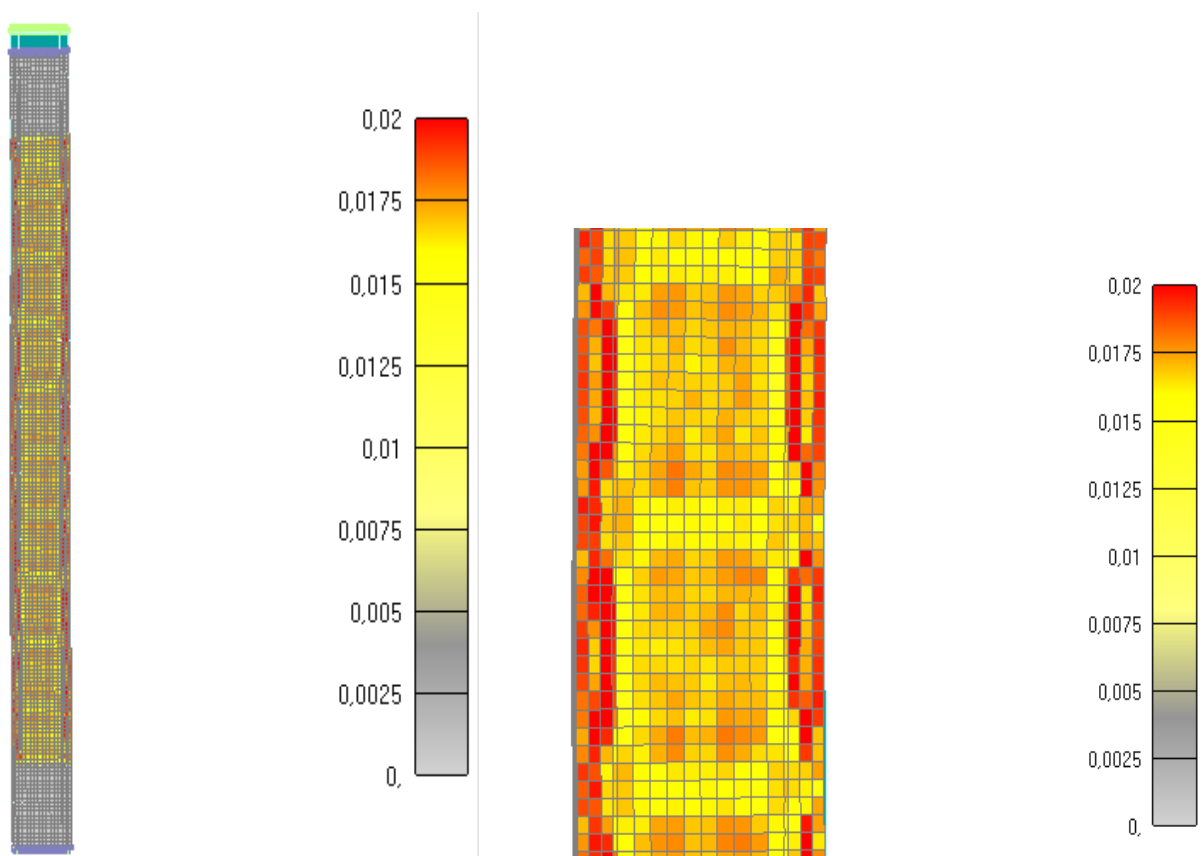
Slika 6.123: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 115 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.124: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 175 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



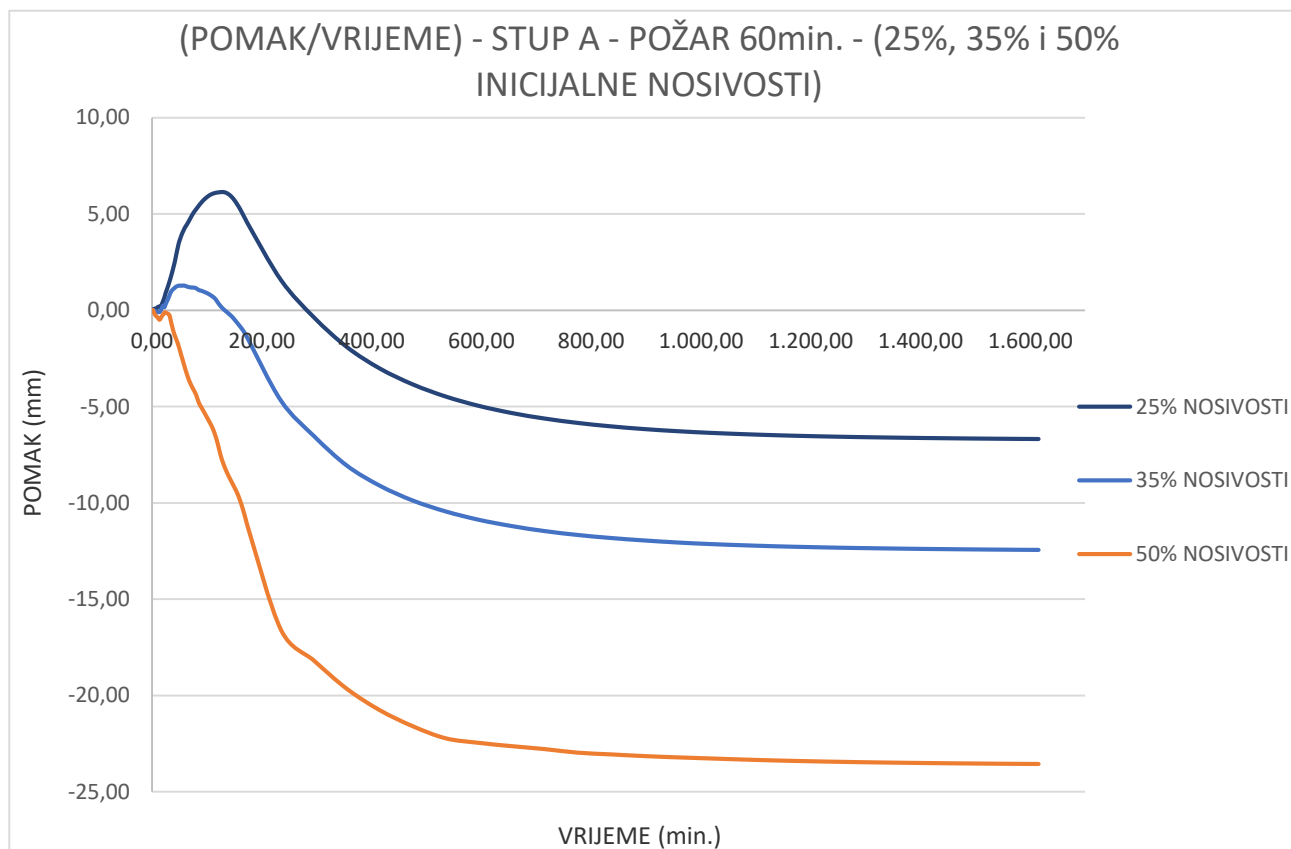
Slika 6.125: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 895 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.126: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1615 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

### **6.2.3.3. USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 60 min ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA**

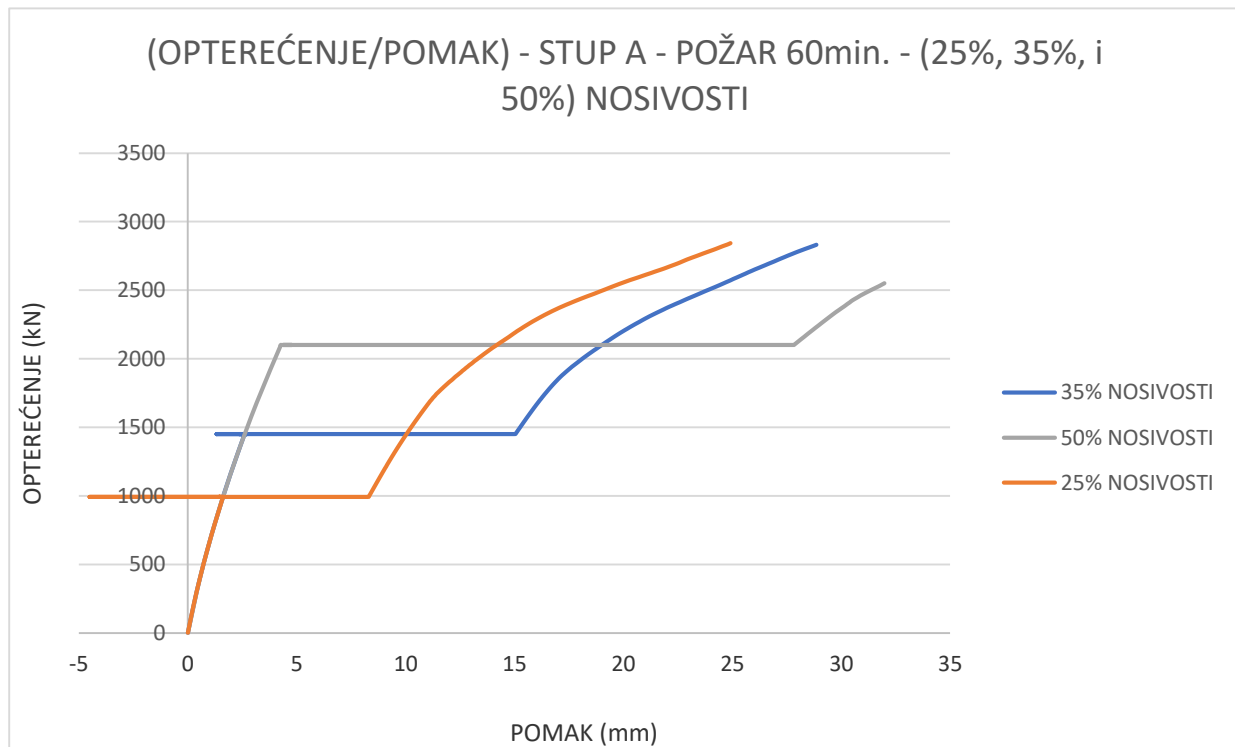
U ovom poglavlju će se promatrati pomaci i sile pri kojima stup dolazi do loma. Uspoređivati će se dijagrami (pomak-vrijeme) i (opterećenje-pomak) za različite intezitete opterećenja sile, a jednako vrijeme požara od 60 minuta. Za vrijeme trajanja požara od 60 minuta su već prikazane pukotine (središnji poprečni presjek stupa, jedna četvrtina stupa i cijeli stup), te tečenje armature. Dijagram distribucije temperature je identičan zbog toga što je on neovisan o intezitetu opterećenja, nego samo o duljini trajanja požara pa zbog toga neće biti prikazan u ovom poglavlju.



Slika 6.127: Prikaz dijagrama (pomak-vrijeme) za vrijeme požara od 60 minuta i različite intezitete opterećenja sile

Iz prethodnog dijagrama može se vidjeti da je stup preživio požarni proces za sva 3 inteziteta opterećenja 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti, što konkretno iznosi (992kN, 1450kN, i 2100kN). Stup s 25% inteziteta opterećenja za vrijeme zagrijavanja ima ekspanziju oko 6 mm, dok mu je sabijanje na kraju požarnog procesa oko 7mm. Stup s intezitetom opterećenja od 35% inicijalne nosivosti ima manju ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog toga što na njega djeluje veća sila prije zagrijavanja i ekspanzija iznosi oko 2mm, dok mu sabijanje na kraju požarnog procesa iznosi oko 12mm. Stup s intezitetom opterećenja 50% od inicijalne nosivosti gotovo i nema ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog velike sile koja djeluje na njega prije djelovanja požara, dok je njegovo sabijanje na kraju požarnog procesa značajno veće nego u prošla dva slučaja i iznosi oko 23mm.



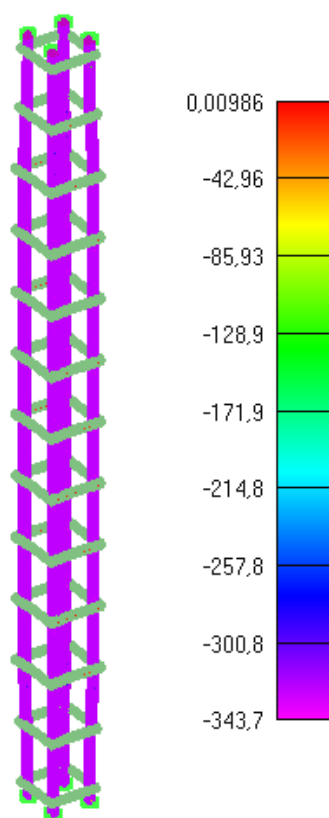


Slika 6.128: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) za vrijeme požara od 60 minuta i različite intezitete opterećenja sile

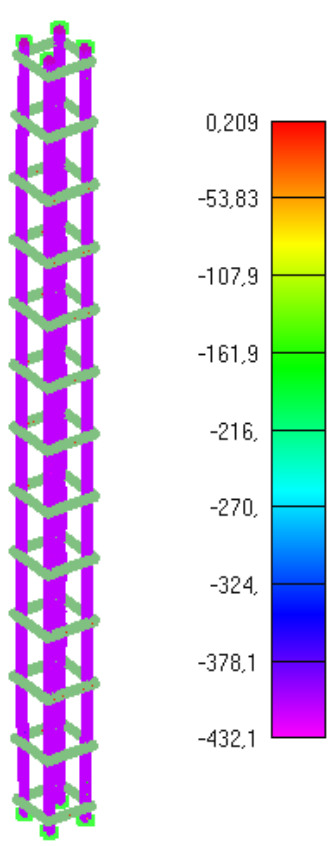
Iz prethodnog dijagrama (opterećenje-pomak) može se vidjeti trenutke u kojima je došlo do loma stupa za različite iznose opterećenja. Sile djeluju u iznosima 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti odnosno (992kN, 1450kN, i 2100kN). Iz grafa se može vidjeti da su moduli elastičnosti sva tri stupa identični prije djelovanja požara, a nakon završenog požarnog procesa nagib krivulja se smanjio, što znači da su mehaničke karakteristike materijala narušene, a samim time i modul elastičnosti je smanjen. Sila pri kojoj se stup slomije za opterećenje prije požara od 992kN iznosi 2840kN, sila sloma za opterećenje prije požara od 1450kN iznosi približno jednako 2830kN, dok sila sloma za najveću silu prije požara od 2100kN je nešto manja od prethodne dvije sile sloma i iznosi 2550kN.

#### **6.2.3.4. 3.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 25% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)**

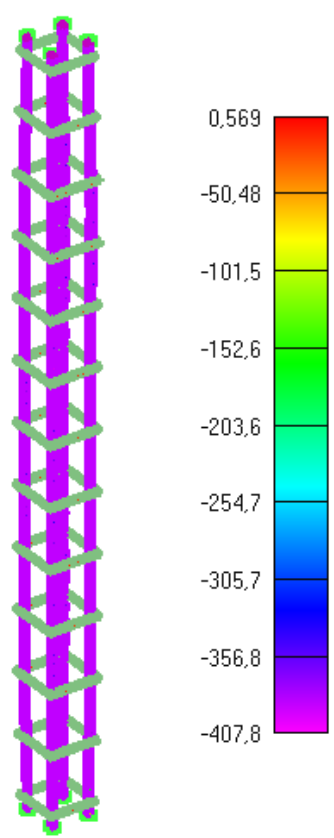
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu), te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 90 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna iznosu sile tako da će se taj dijagram prikazati na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta.



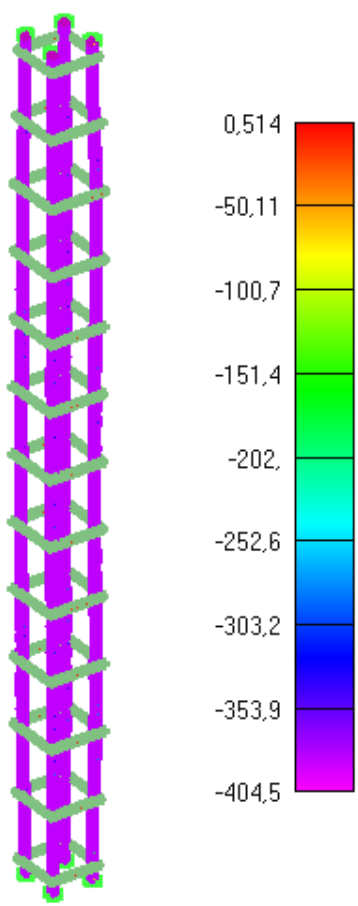
Slika 6.129: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



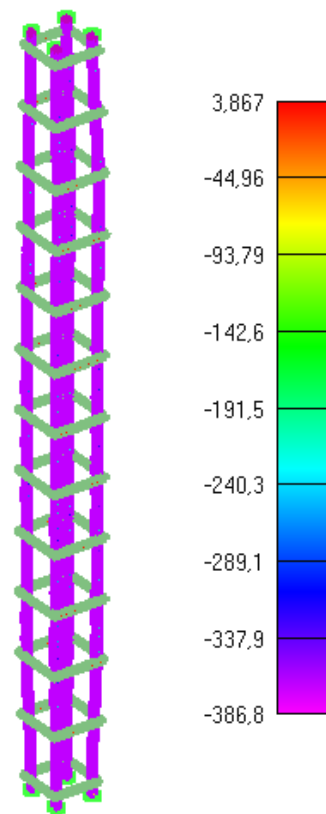
Slika 6.130: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min



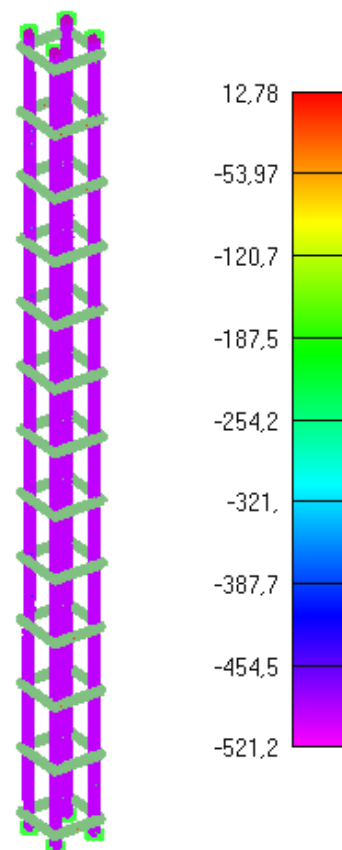
Slika 6.131: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA*



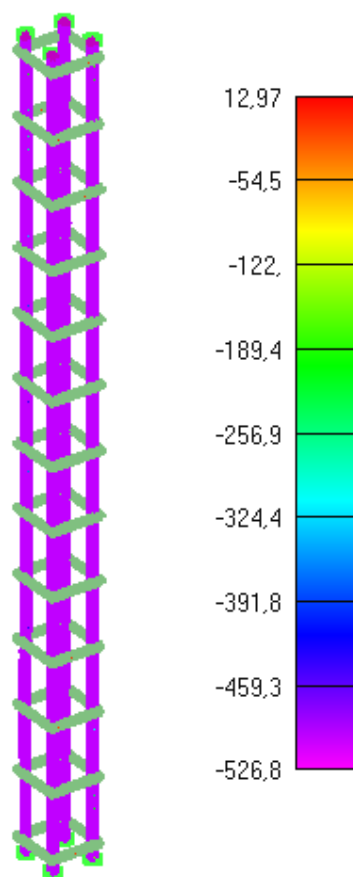
Slika 6.132: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 180min



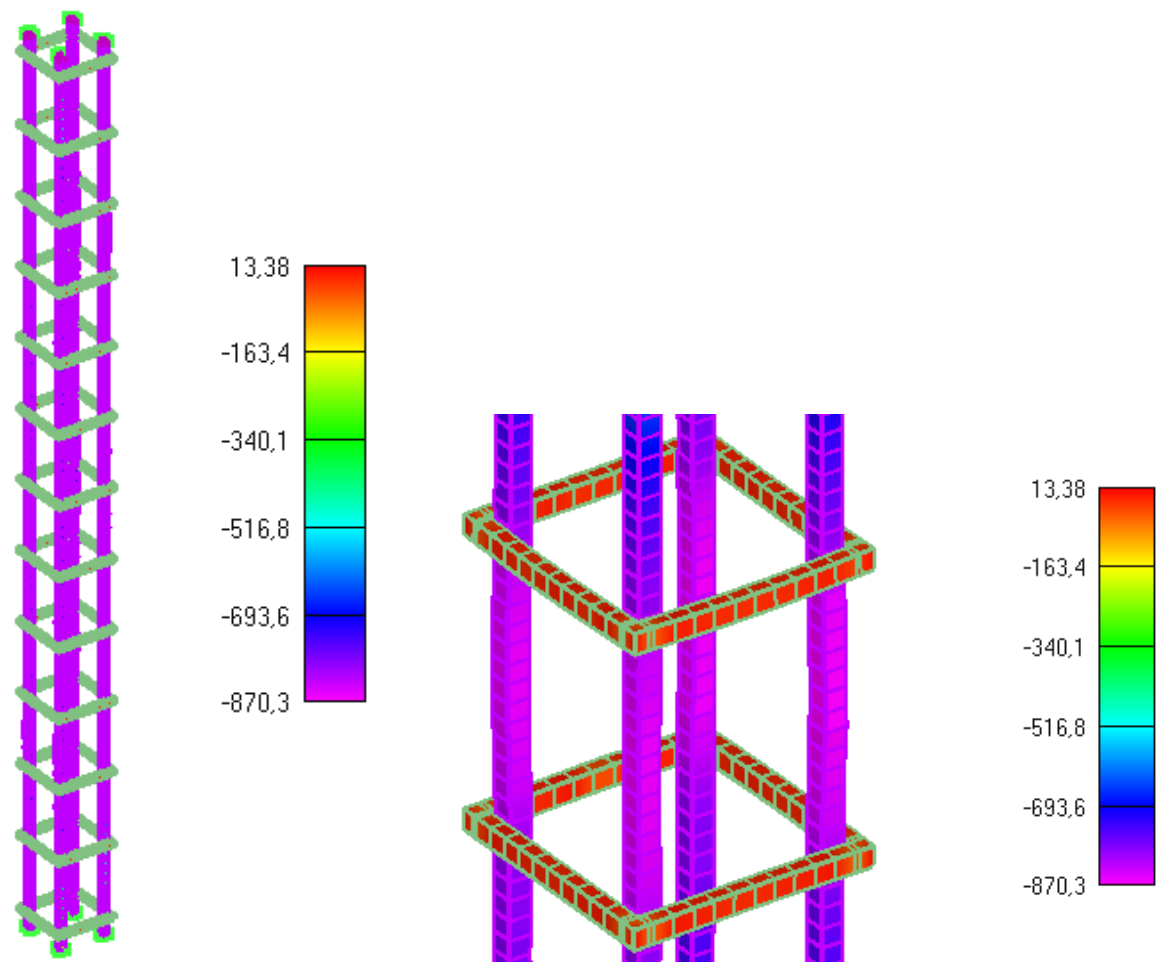
Slika 6.133: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 250min  
*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*



Slika 6.134: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1030min

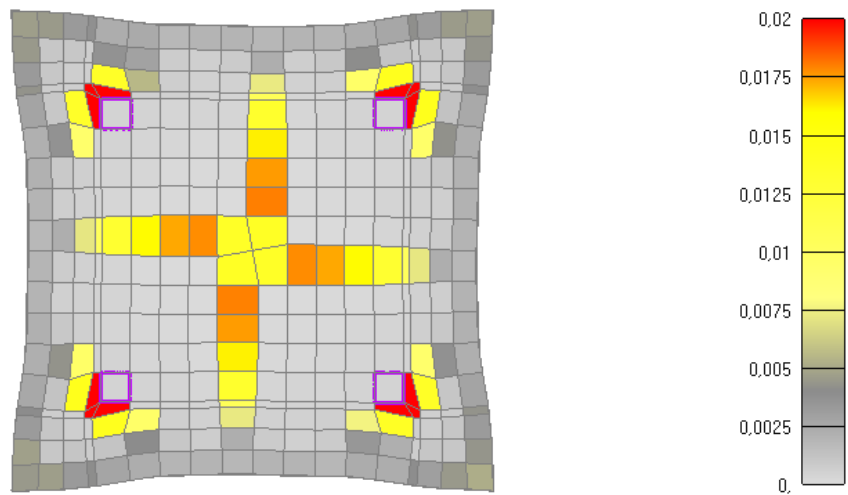
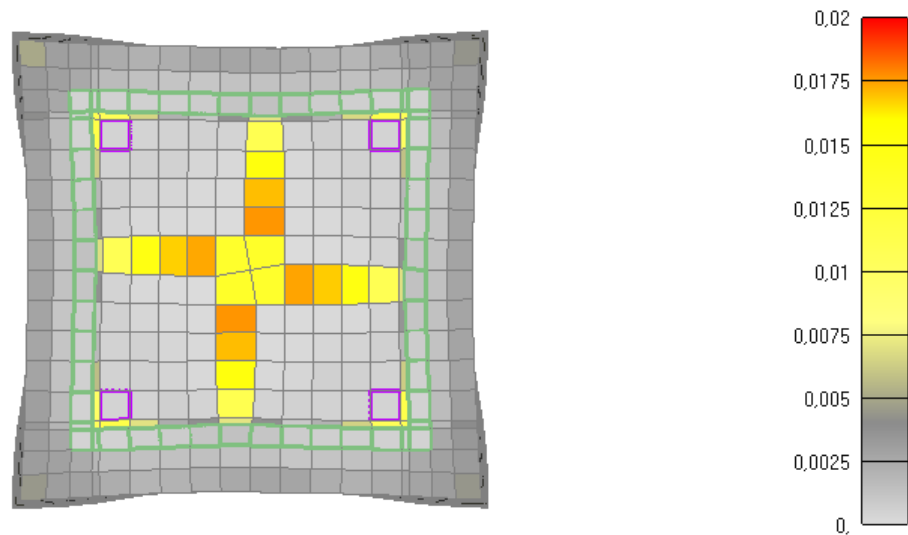


Slika 6.135: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1690min  
*KRAJ POŽARNOG PROCESA*

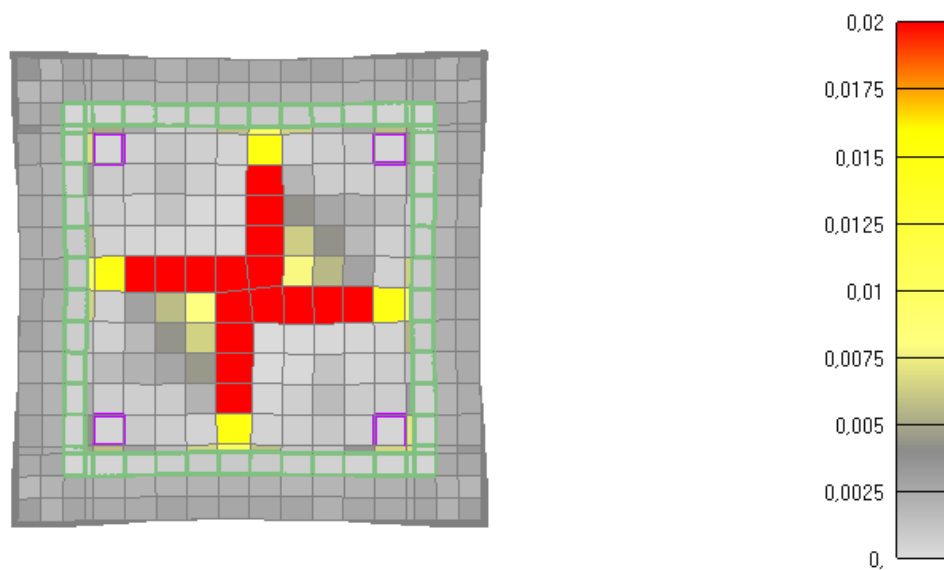


Slika 6.136: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.

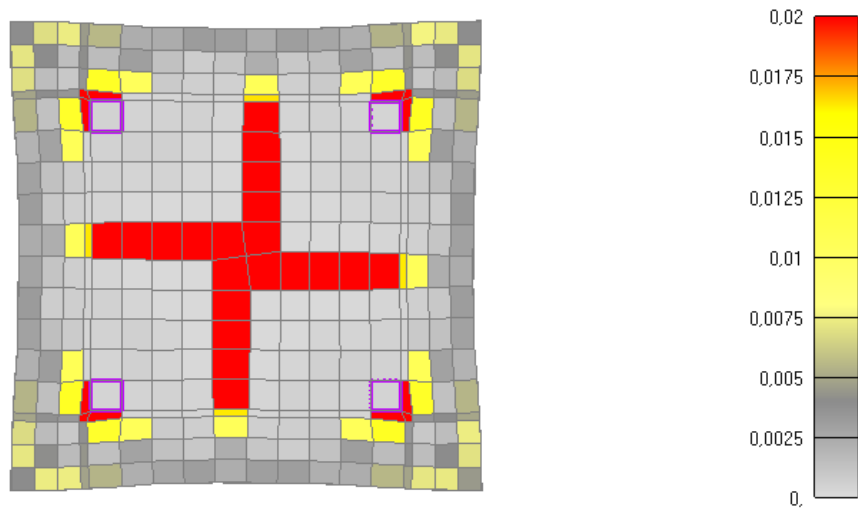


Slika 6.137: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)

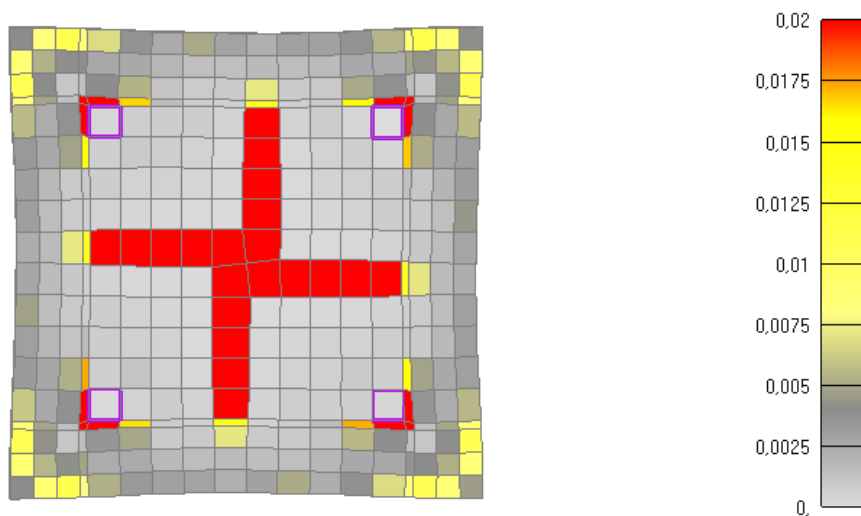
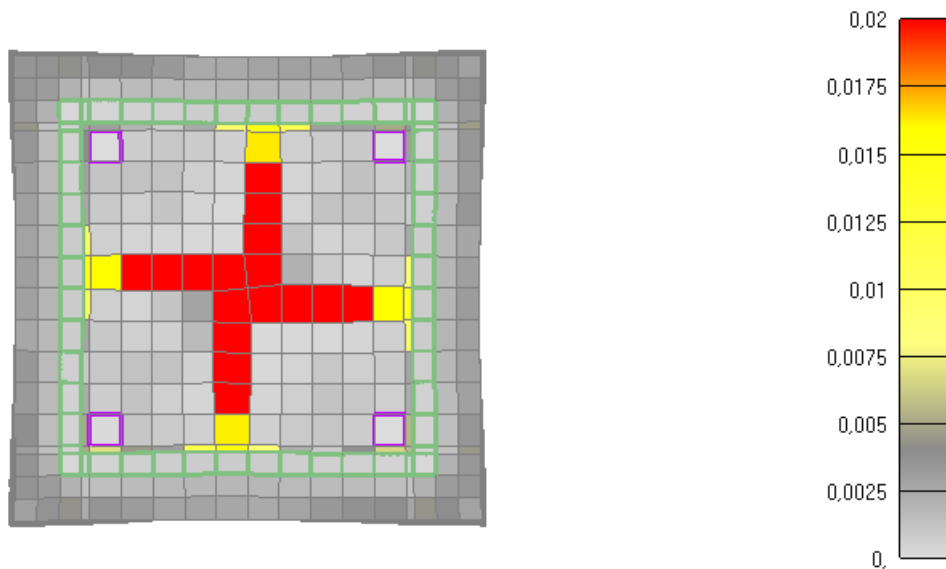


Slika 6.138: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)

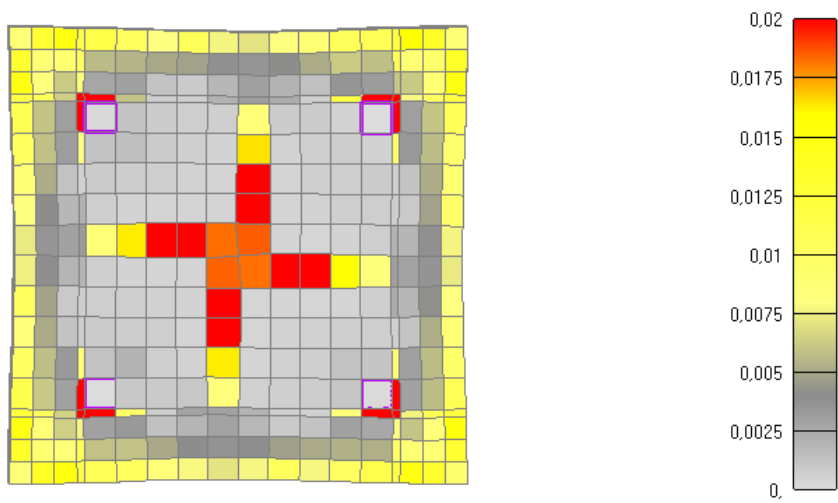
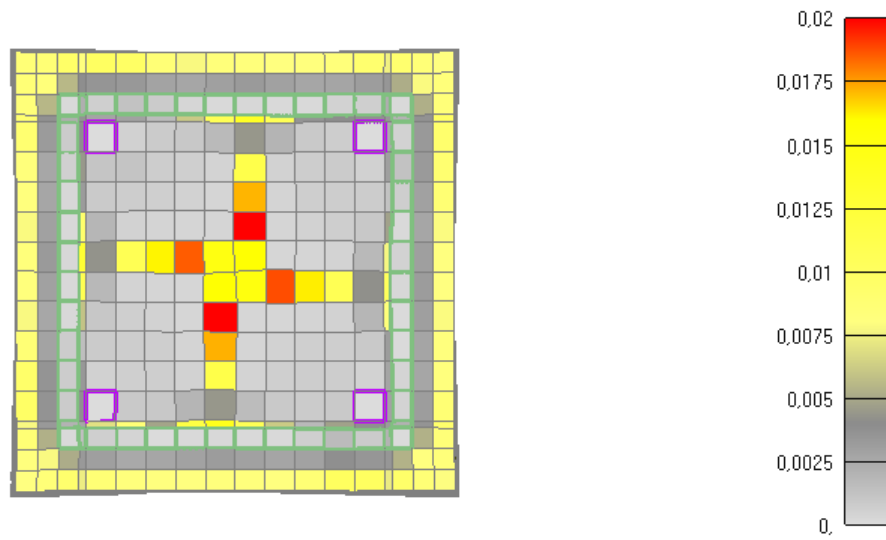




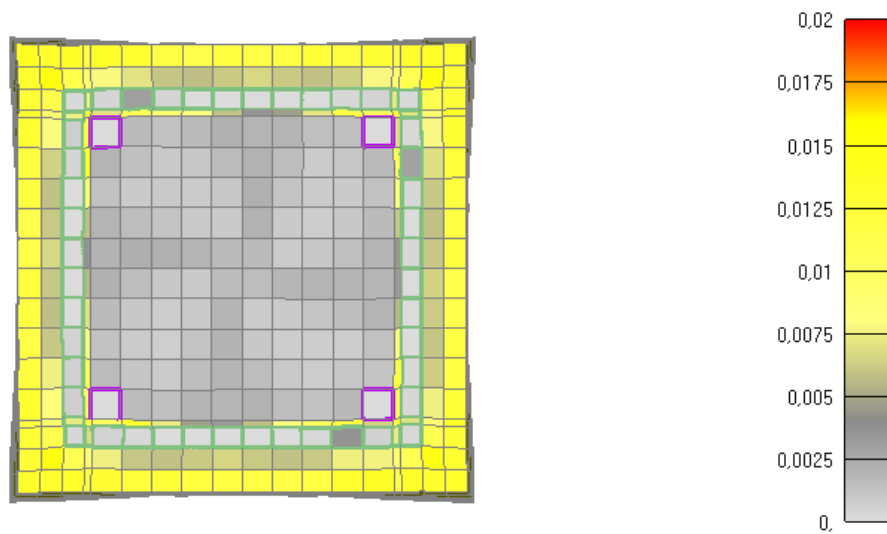
Slika 6.139: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(bez spona)



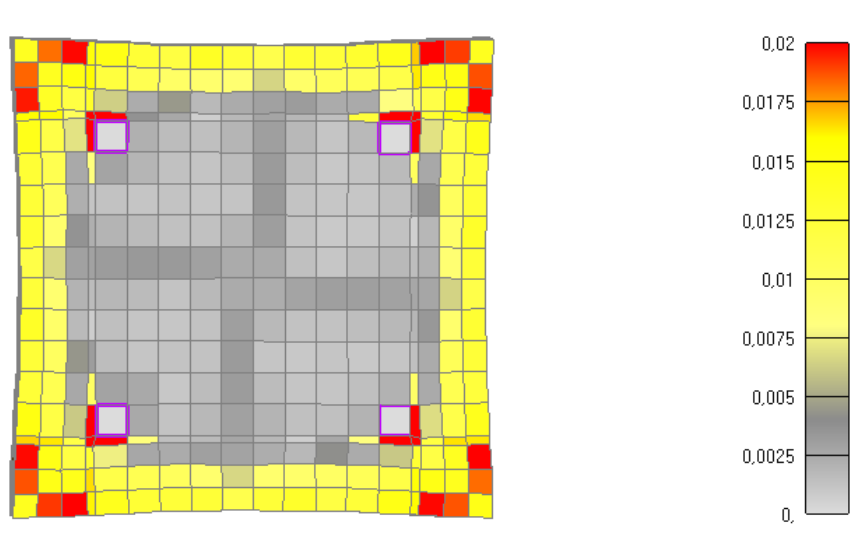
Slika 6.140: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLADENJA)



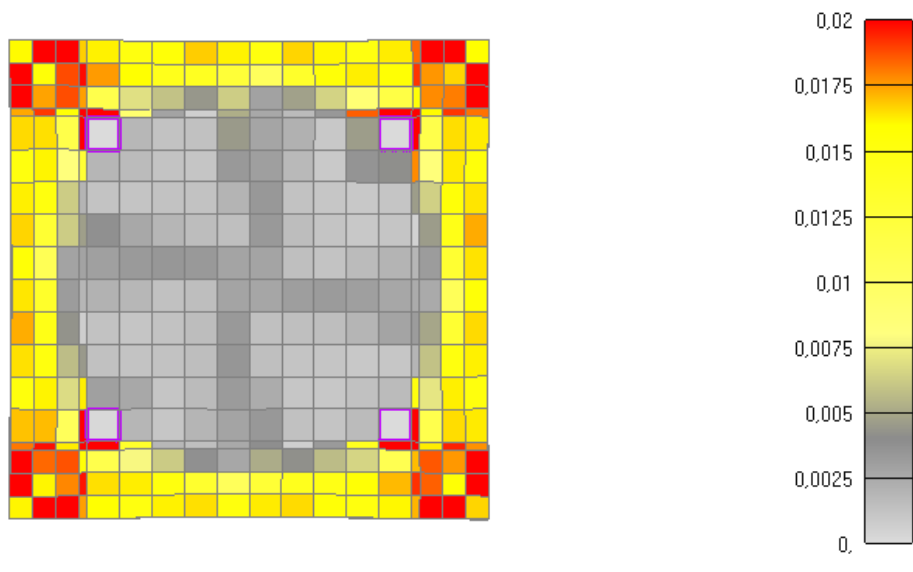
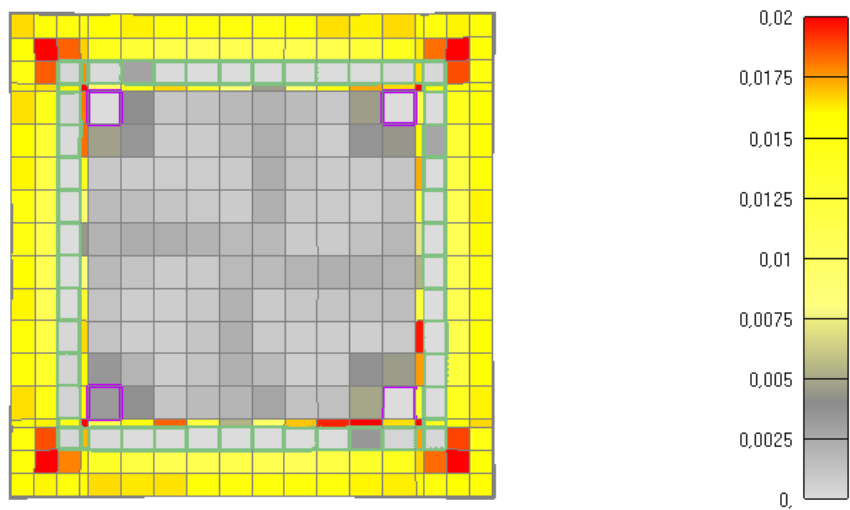
Slika 6.141: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 180 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



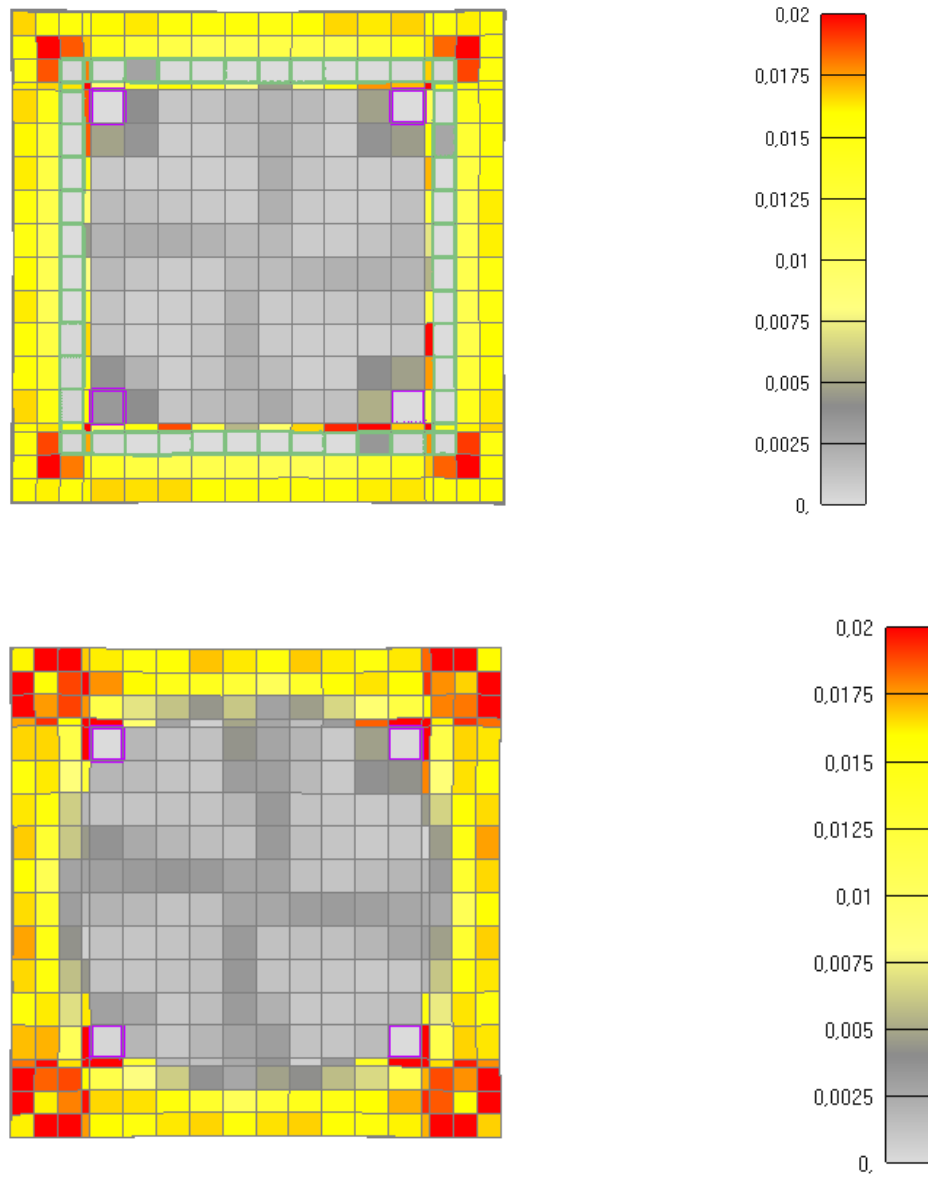
Slika 6.142: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 250 minuta požara  
(sa sponama) -KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLADENJA



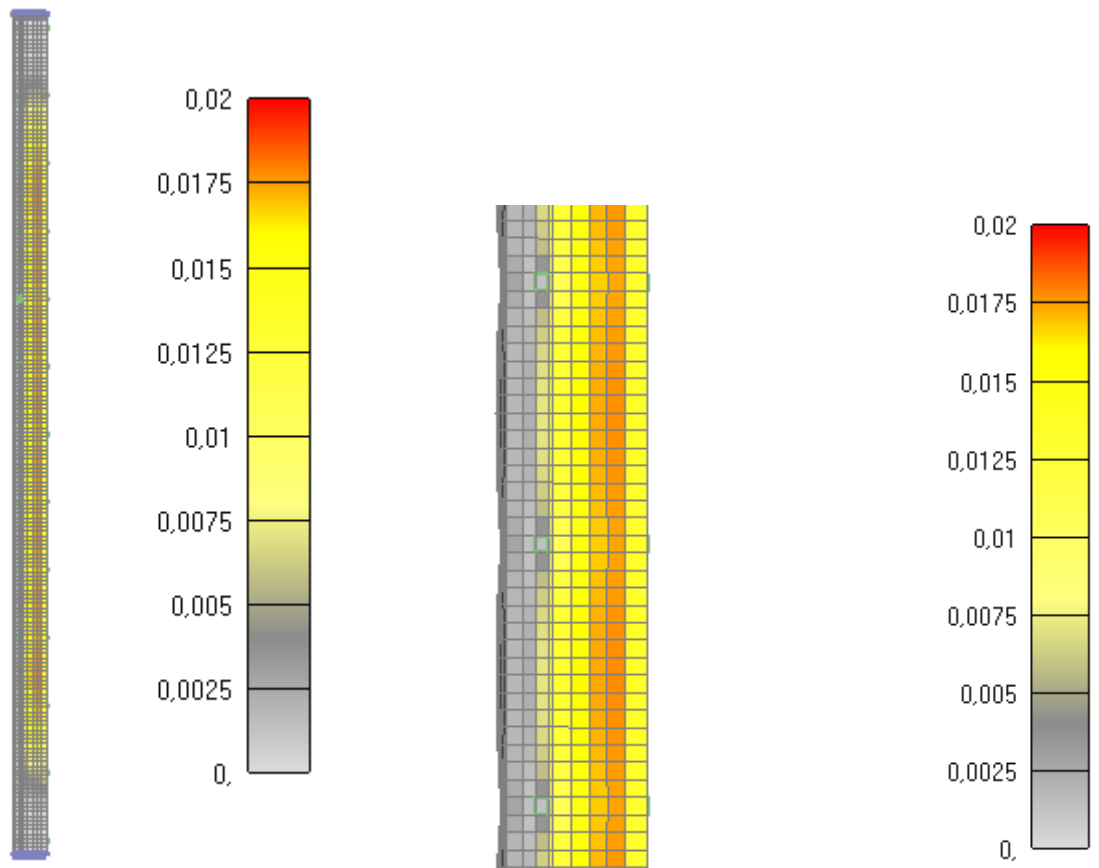
Slika 6.143: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 250 minuta požara (bez spona) -KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLADENJA



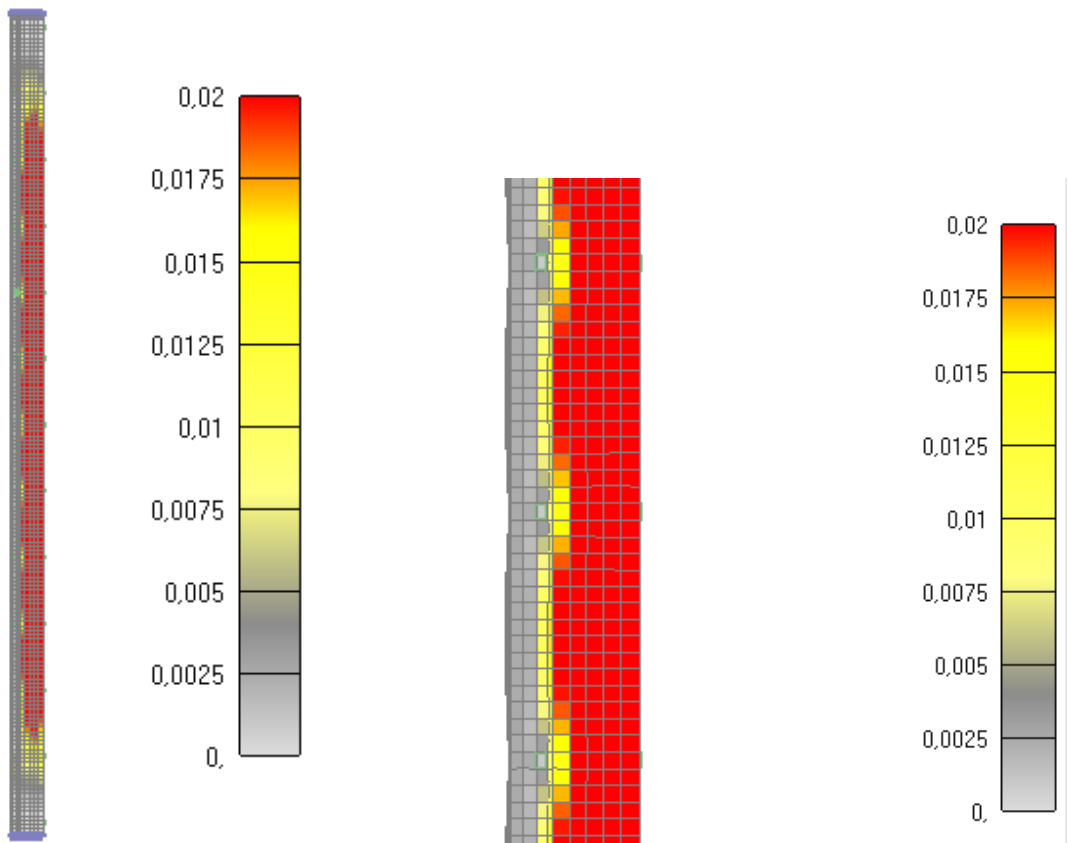
Slika 6.144: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1030 minuta (gore-sa sponama, dolje-bez spona)



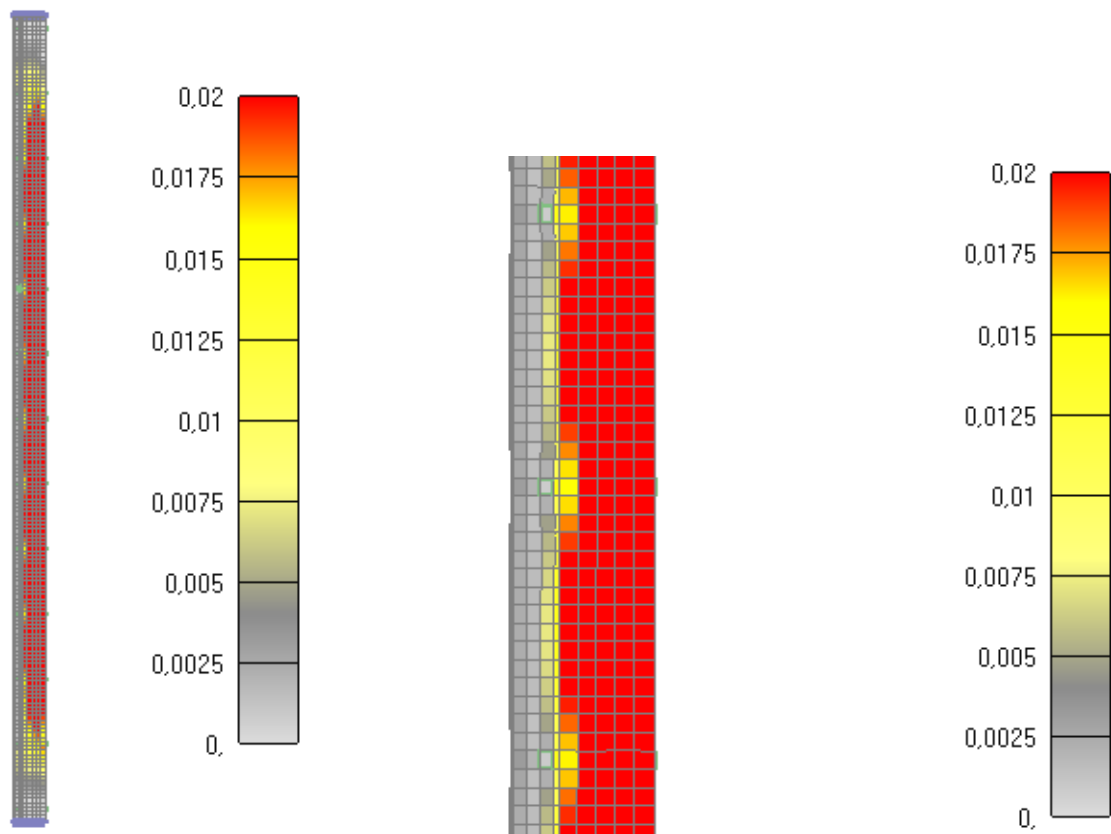
Slika 6.145: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1690 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



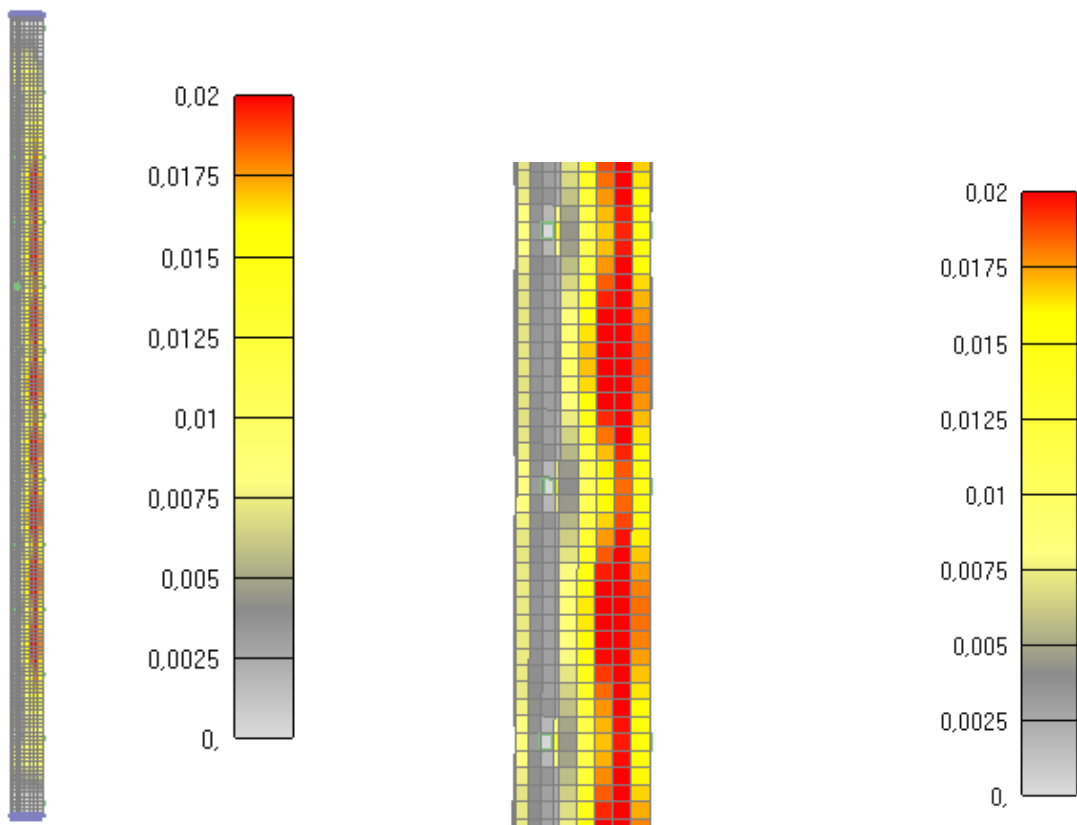
Slika 6.146: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



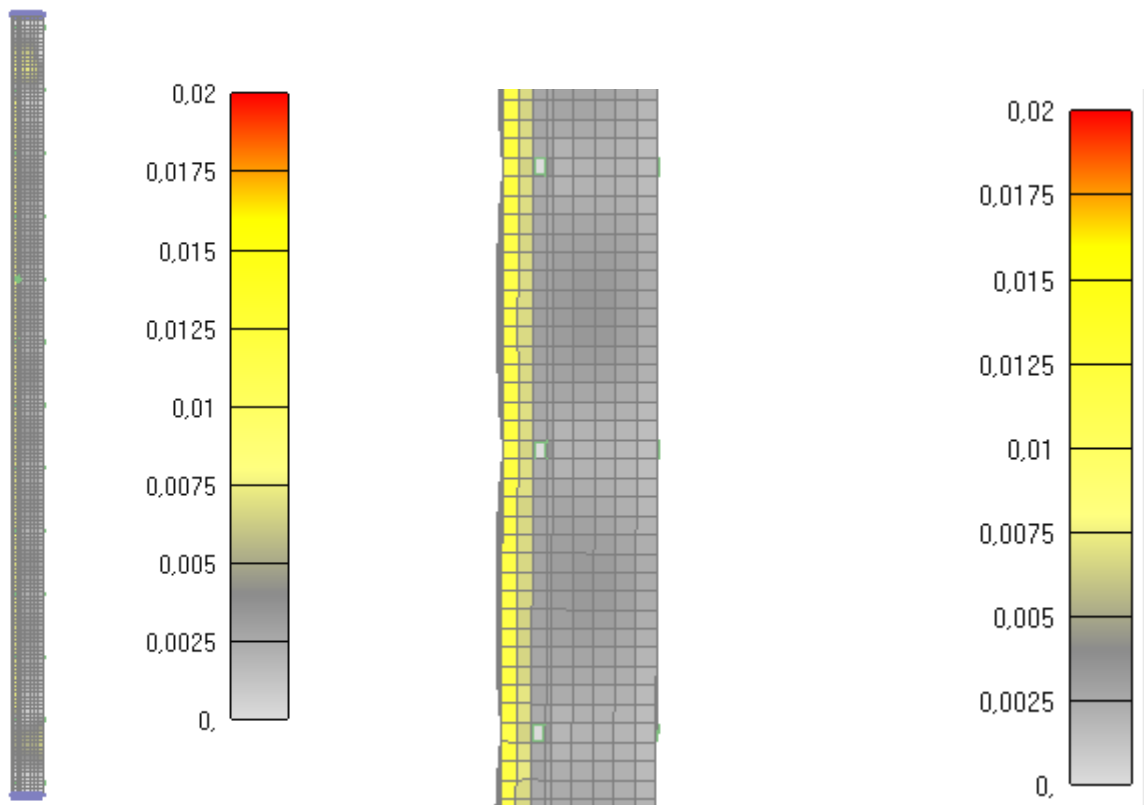
Slika 6.147: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



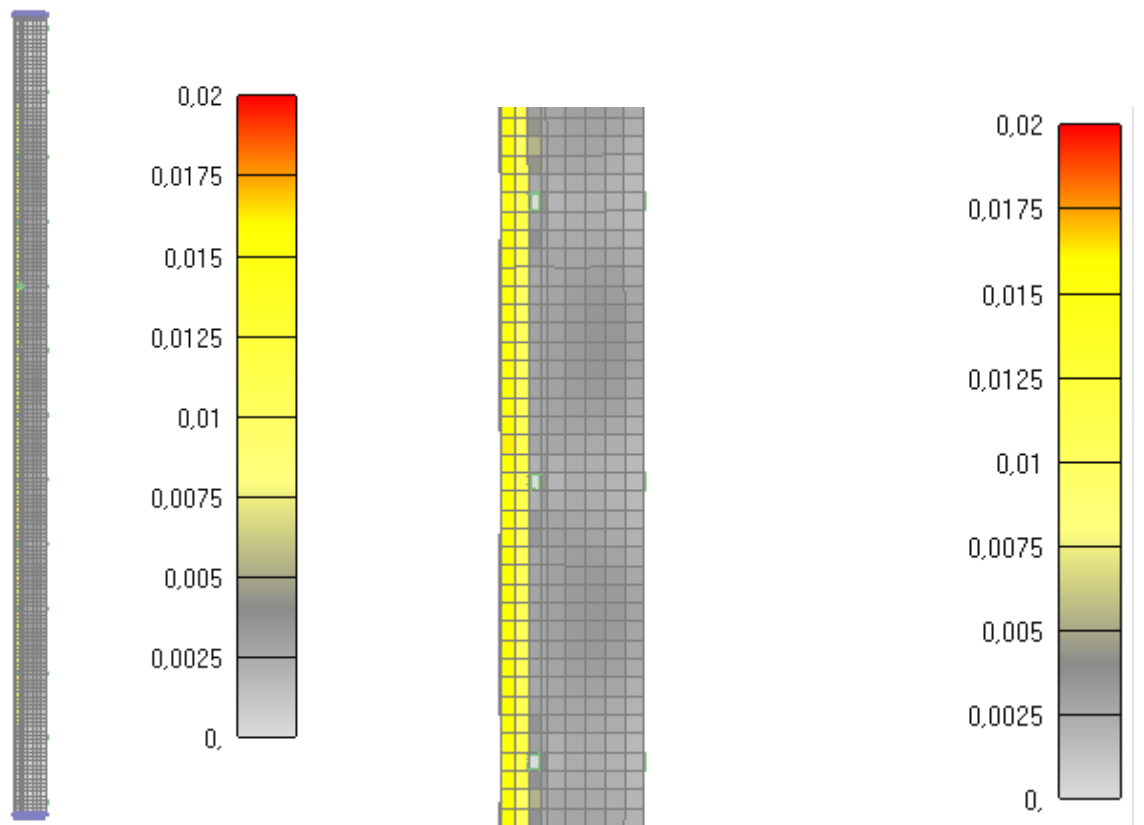
Slika 6.148: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



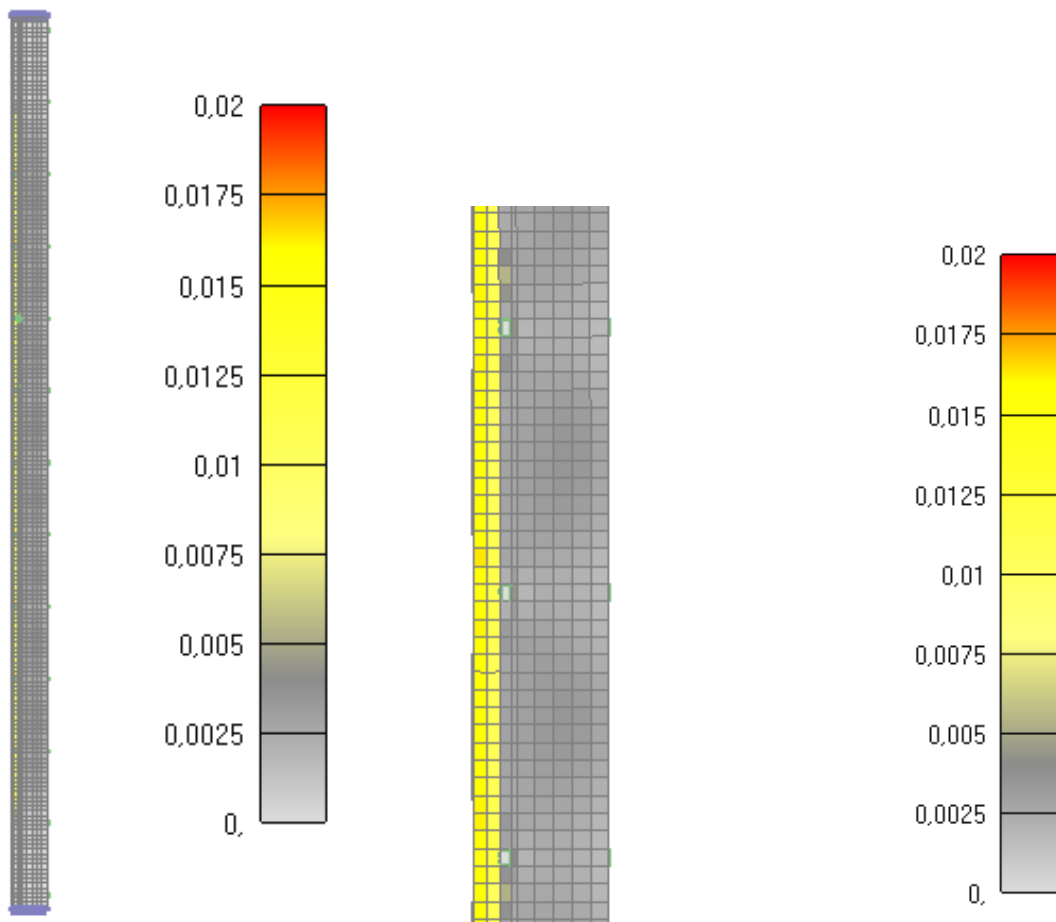
Slika 6.149: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 180 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.150: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 250 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA

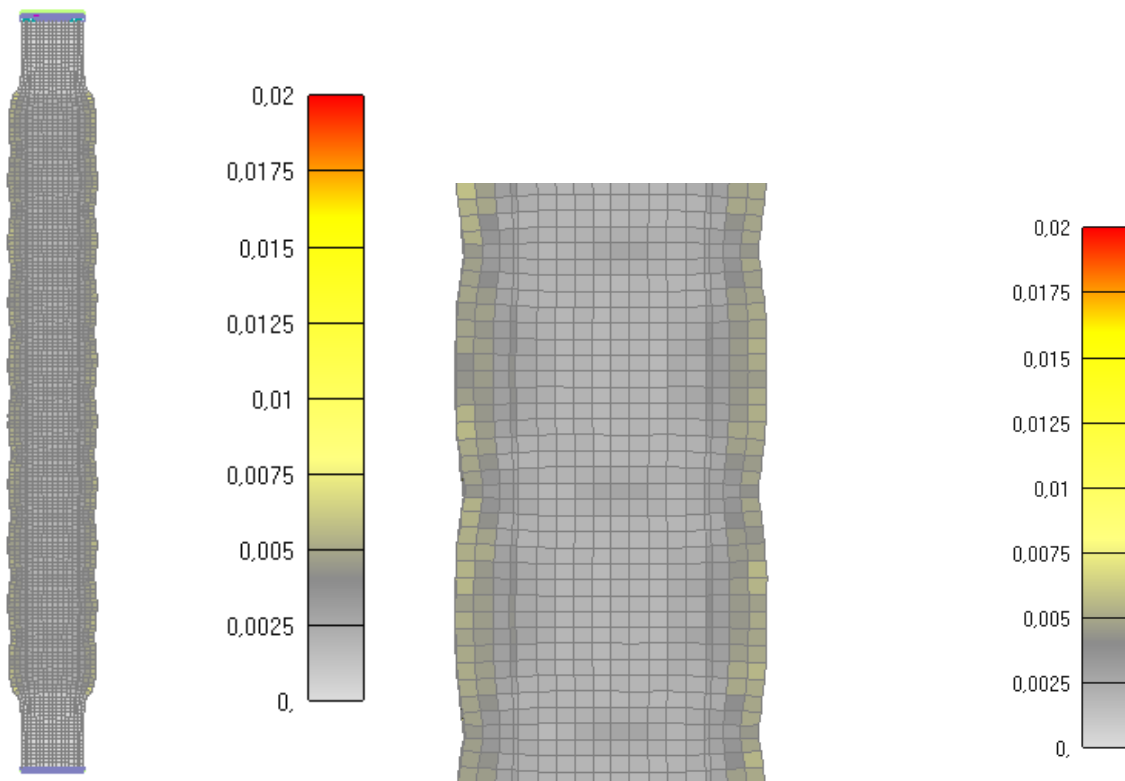


Slika 6.151: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1030 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

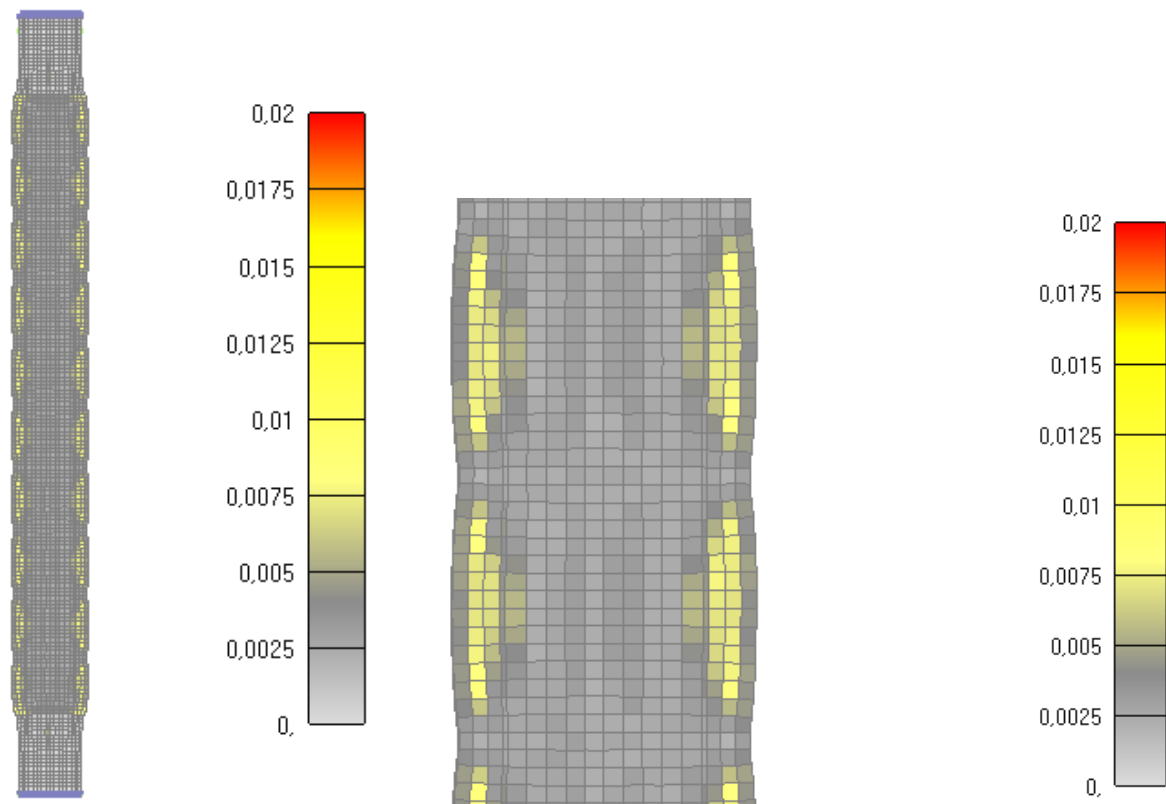


Slika 6.152: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1690 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA

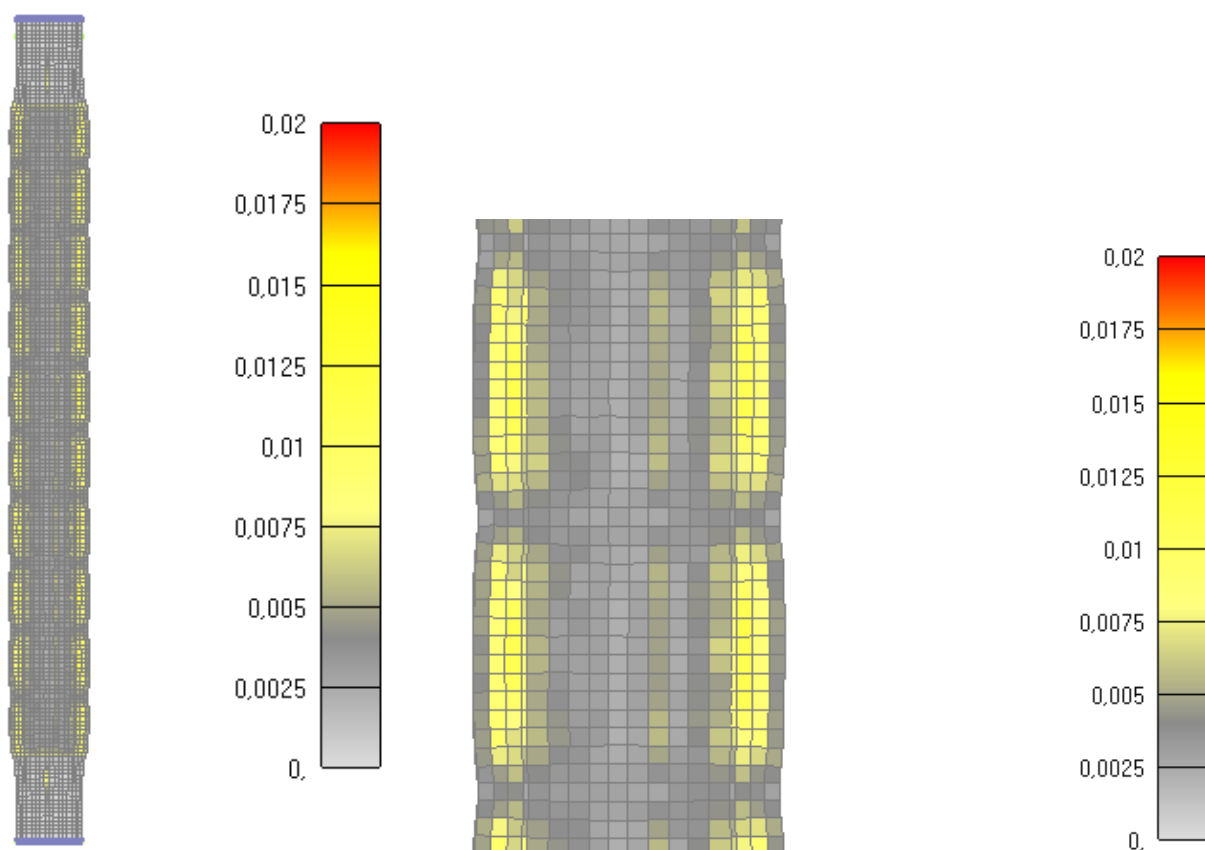




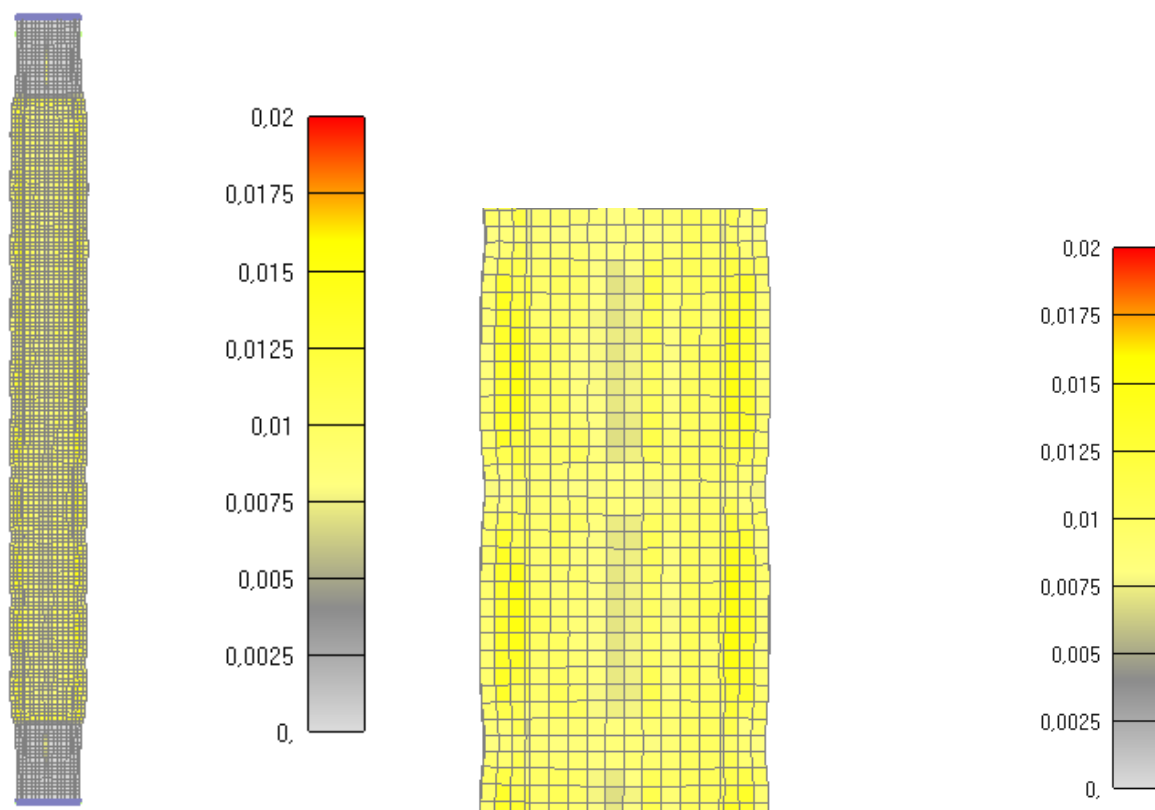
Slika 6.153: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



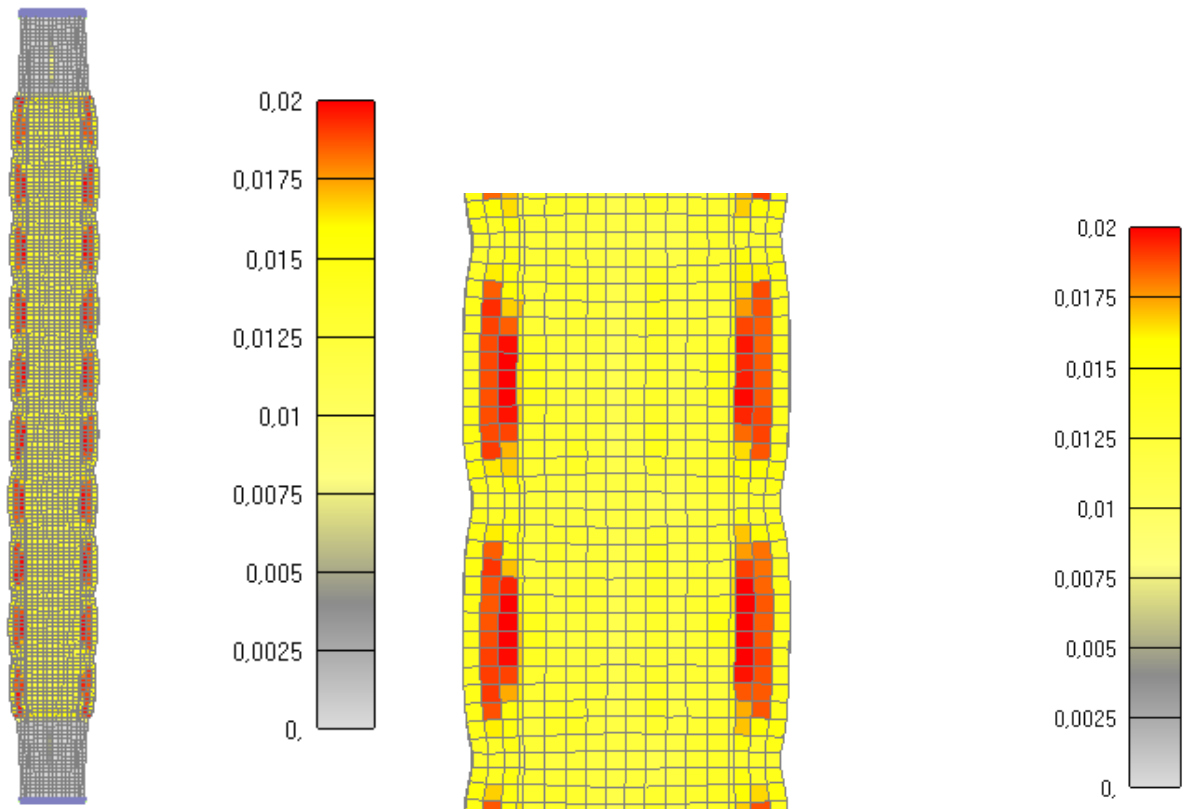
Slika 6.154: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



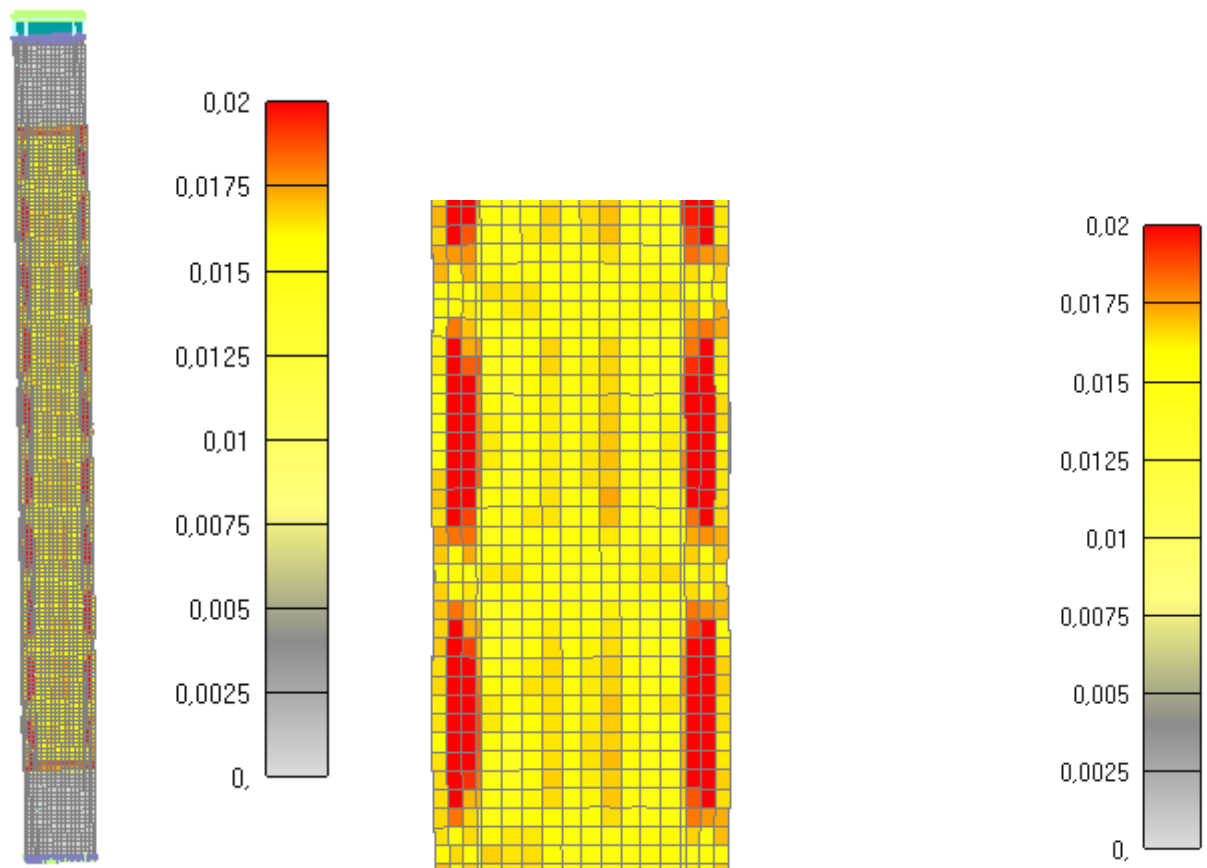
Slika 6.155: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA



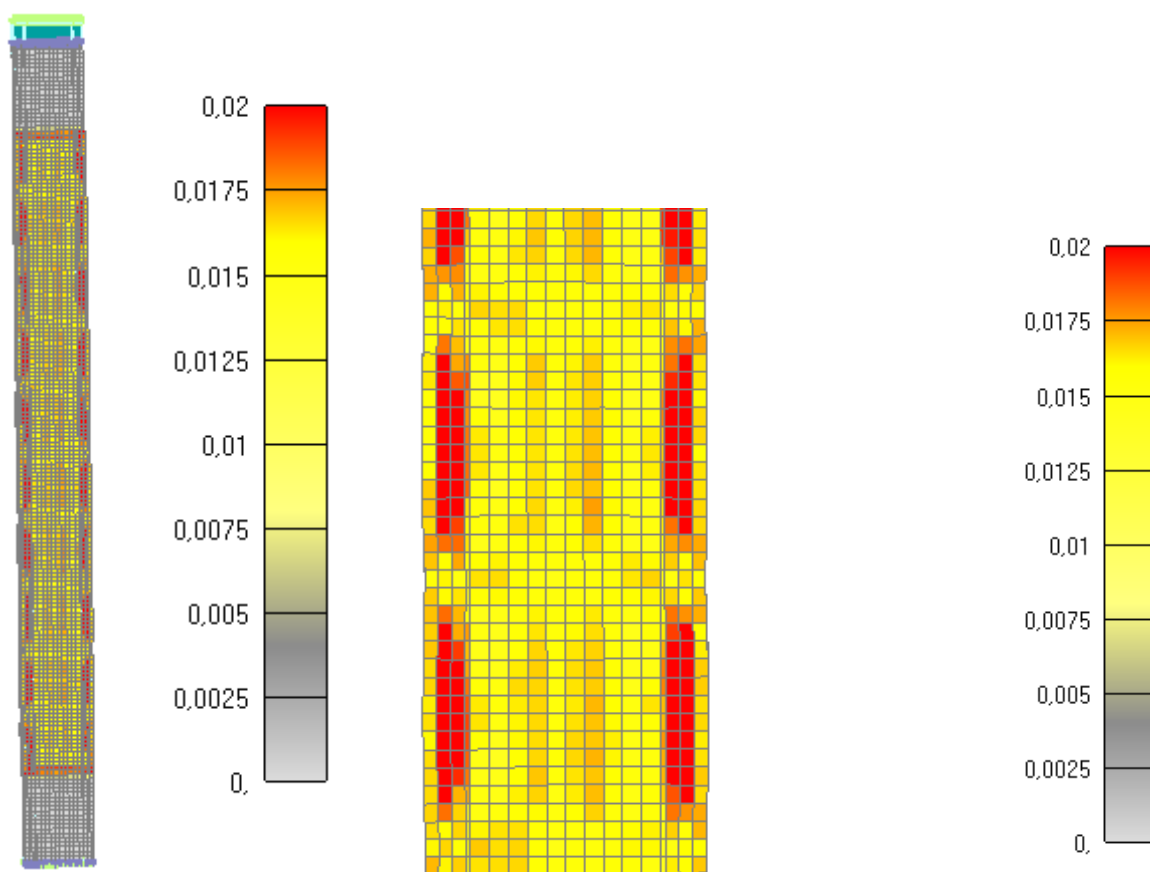
Slika 6.156: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 180 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



Slika 6.157: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 250 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.158: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1030 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

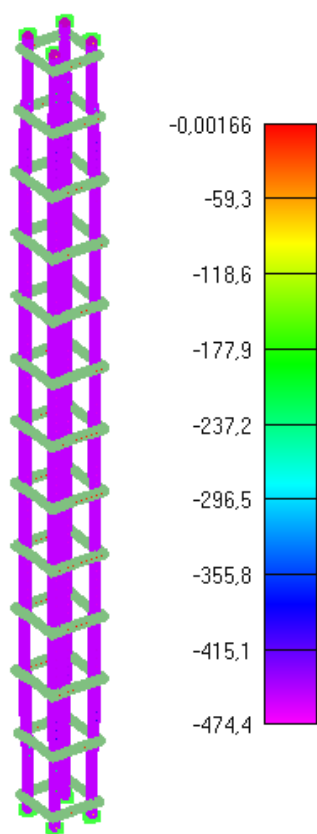


Slika 6.159: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1690 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

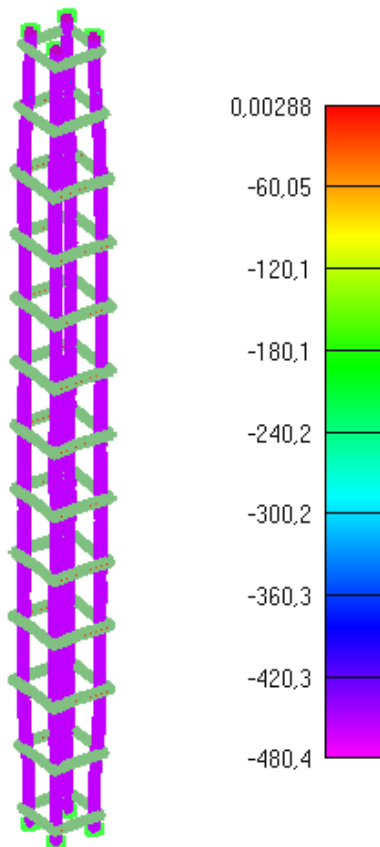
---

#### **6.2.3.5. 4.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)**

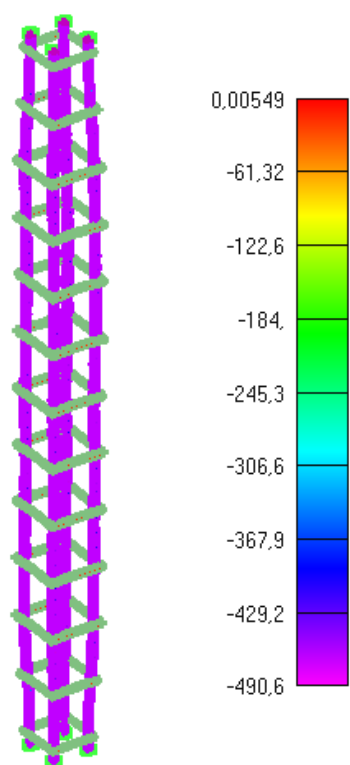
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu) te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 90 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna o iznosu sile tako da će taj dijagram biti prikazan na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta.



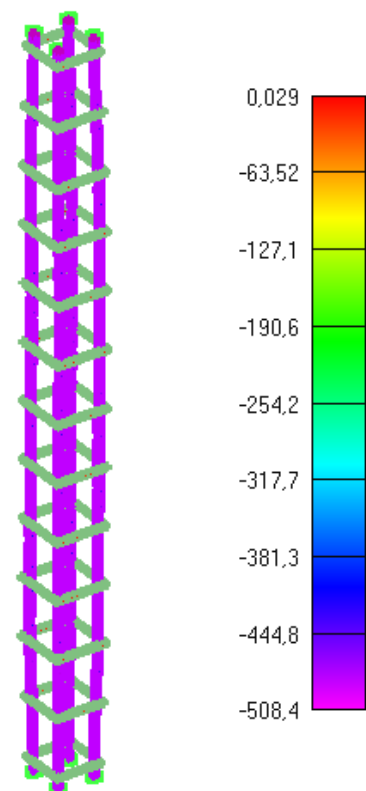
Slika 6.160: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



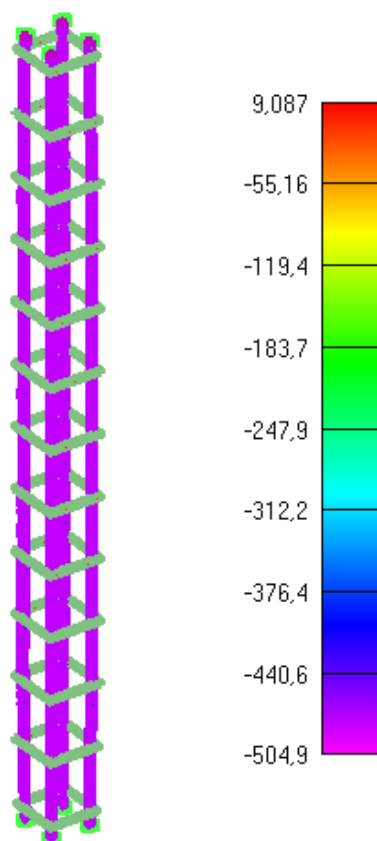
Slika 6.161: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min



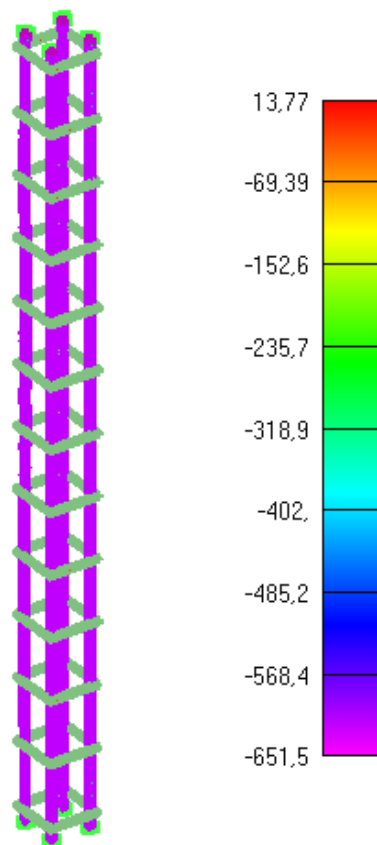
Slika 6.162: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA*



Slika 6.163: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 180min

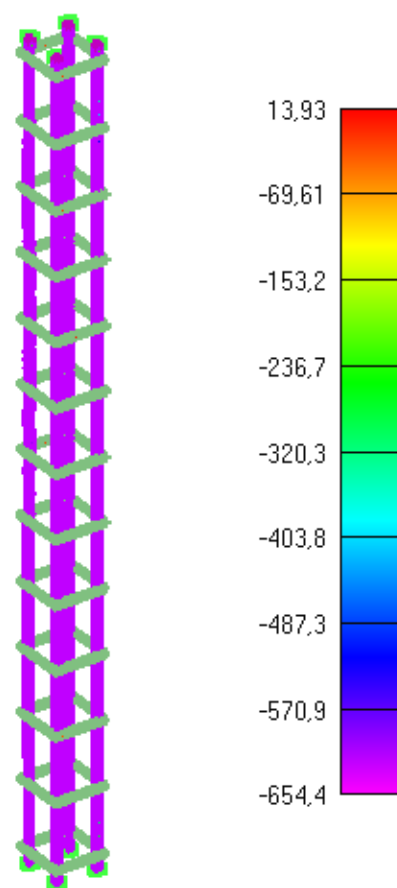


Slika 6.164: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 250min  
*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*

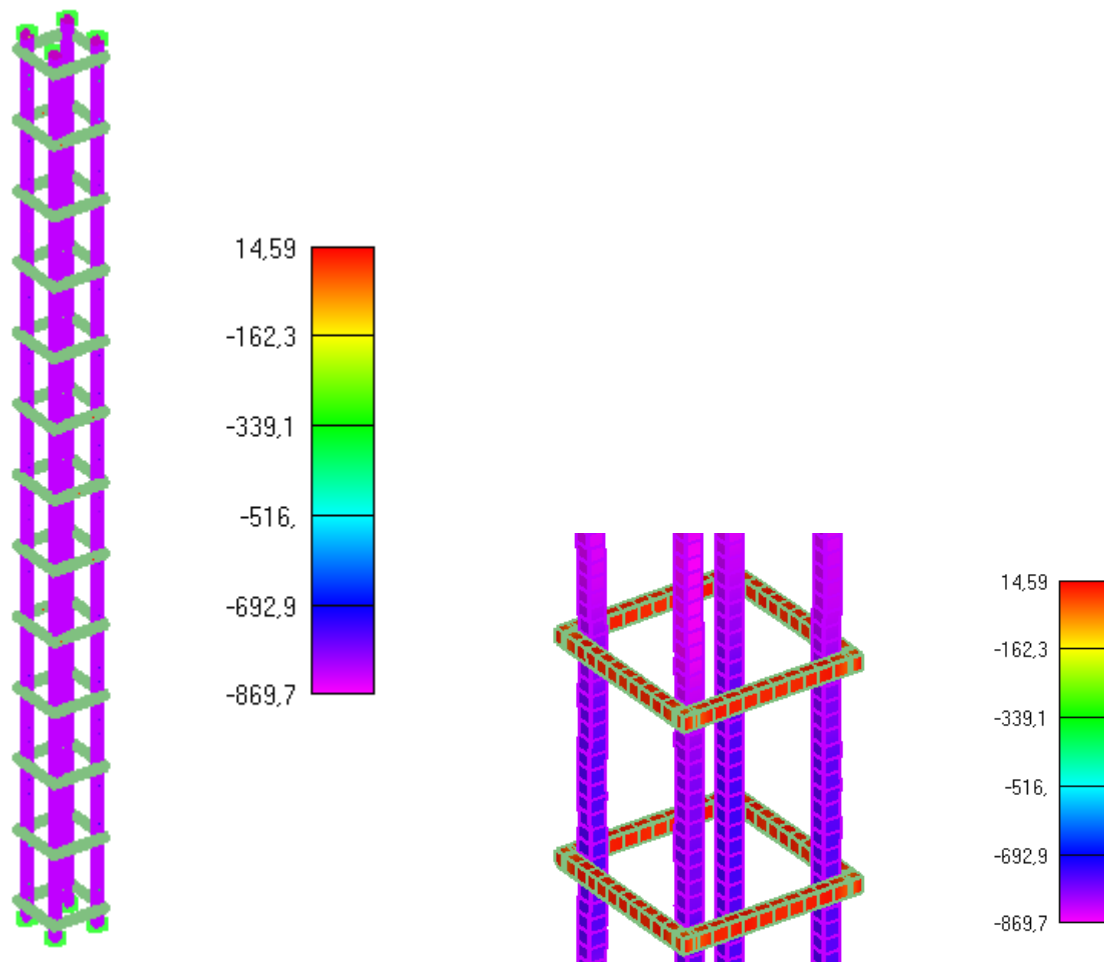


Slika 6.165: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1030min



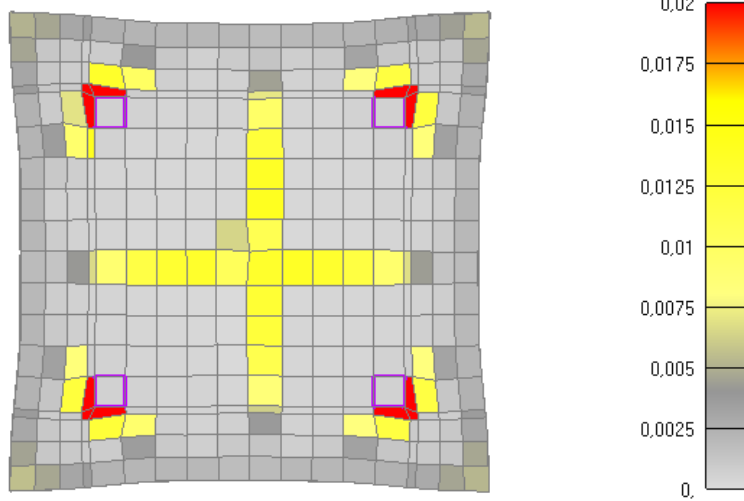
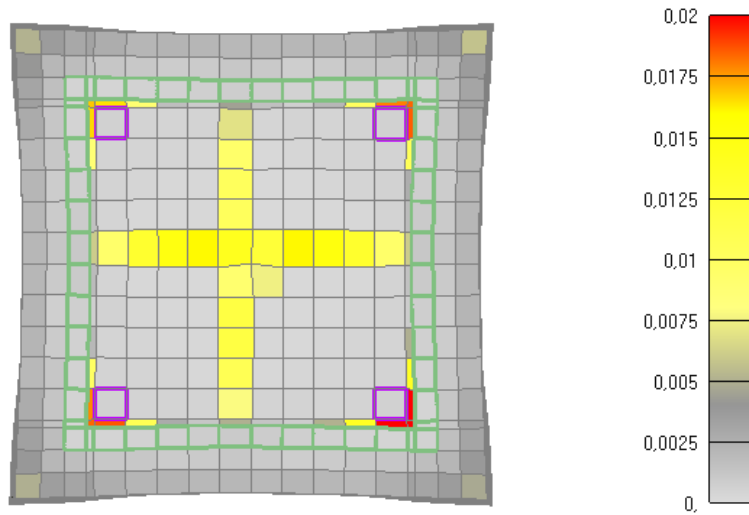


Slika 6.166: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1690min  
*KRAJ POŽARNOG PROCESA*

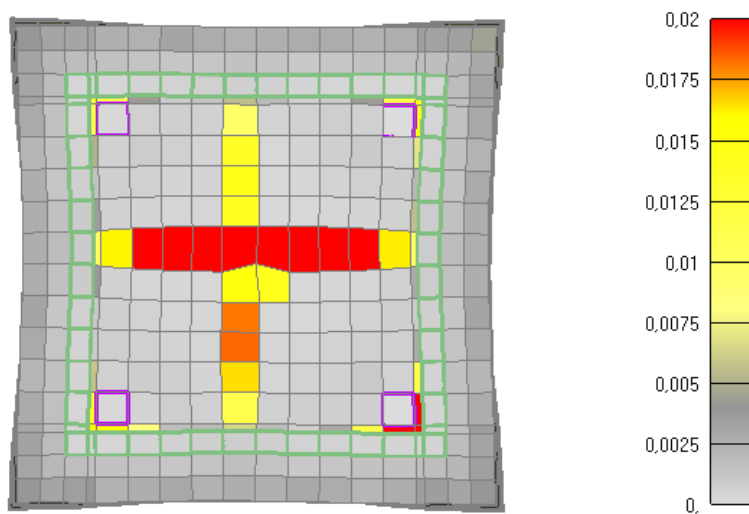


Slika 6.2.3.5.167: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

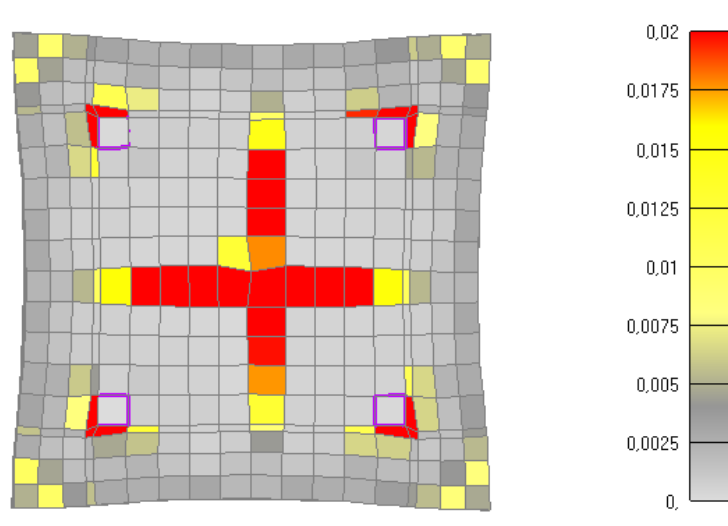
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



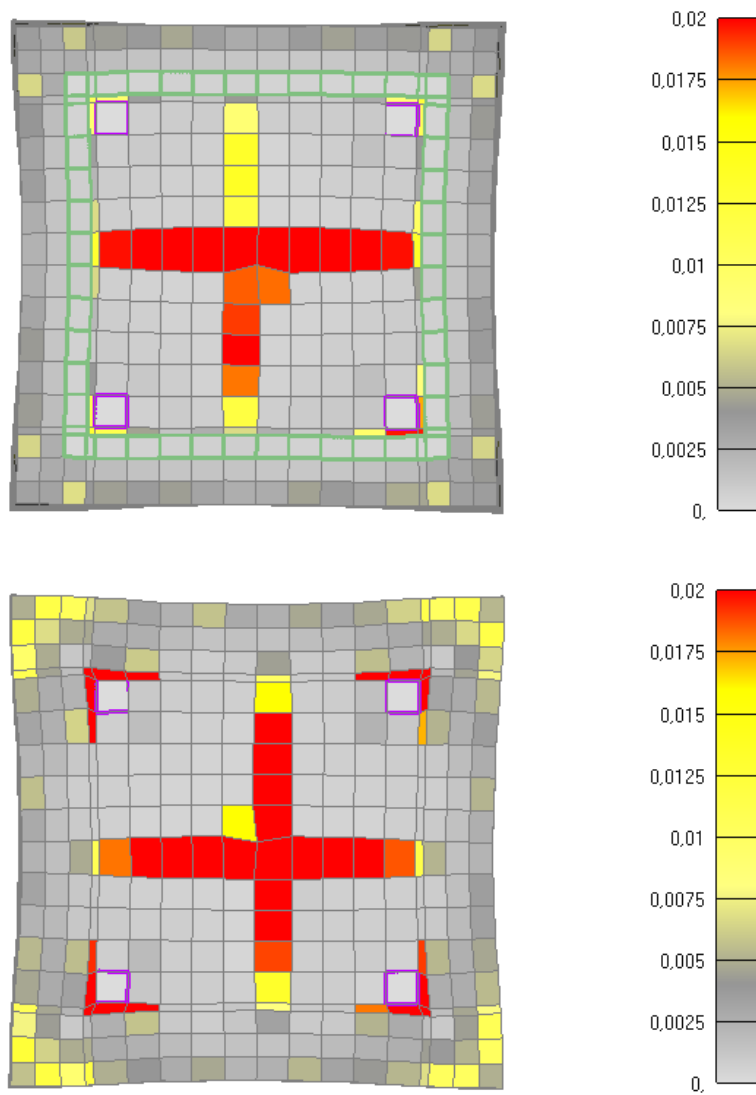
Slika 6.168: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



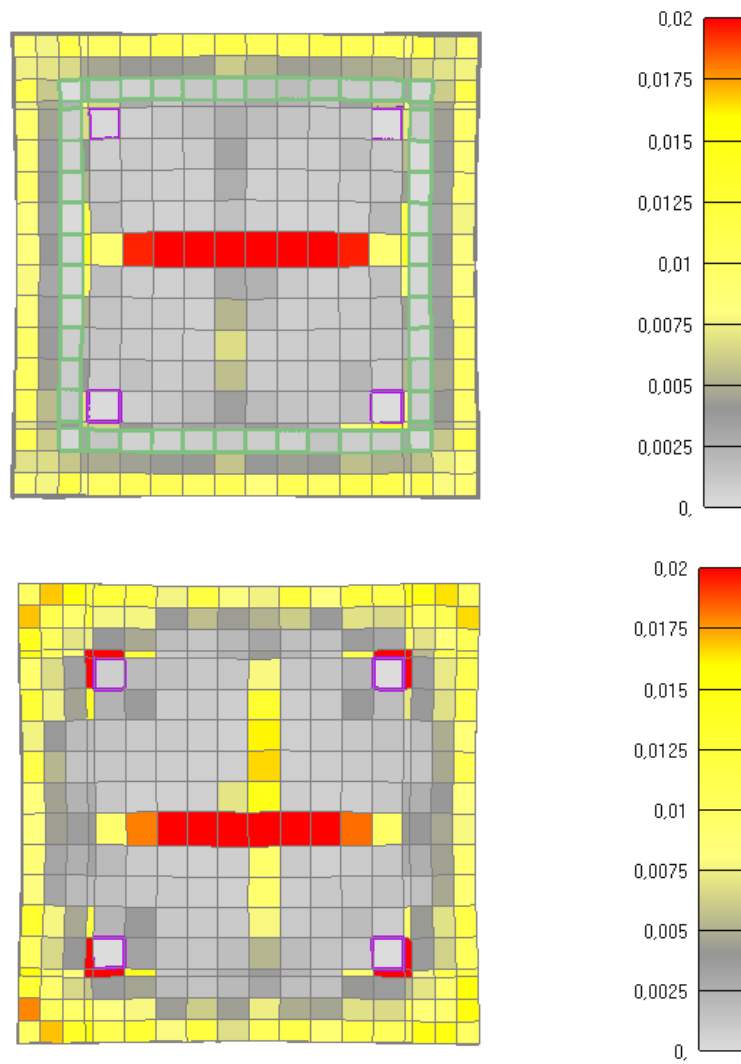
Slika 6.169: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)



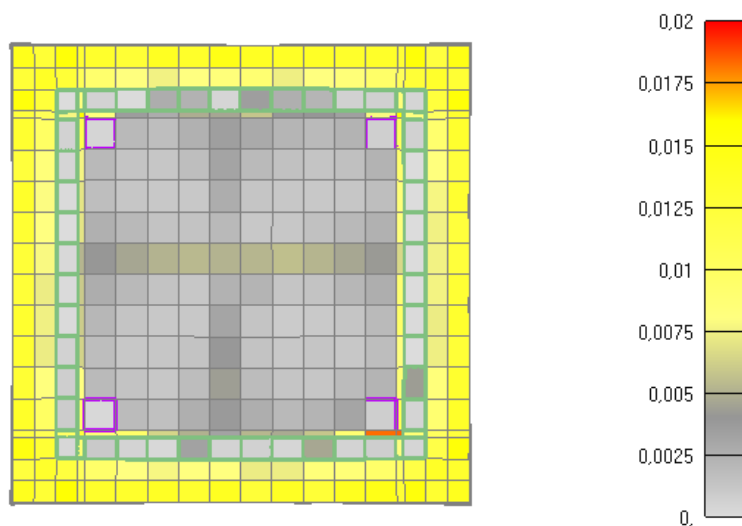
Slika 6.170: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona)



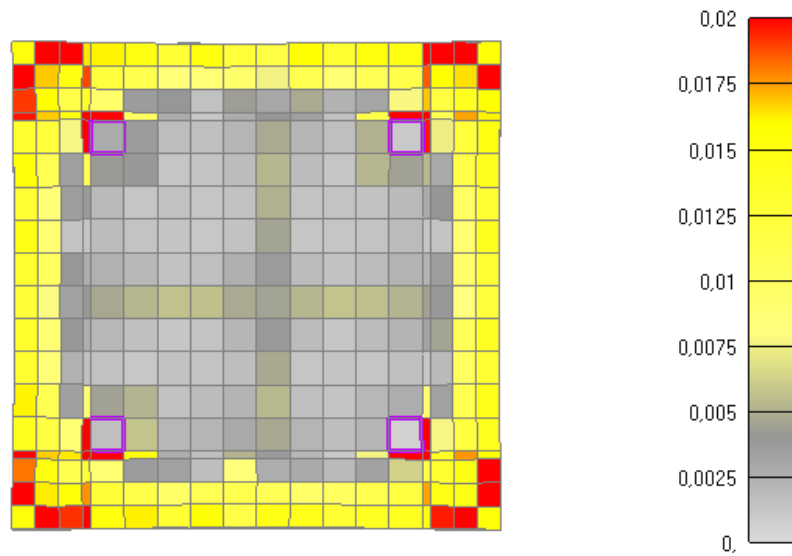
Slika 6.171: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLADENJA)



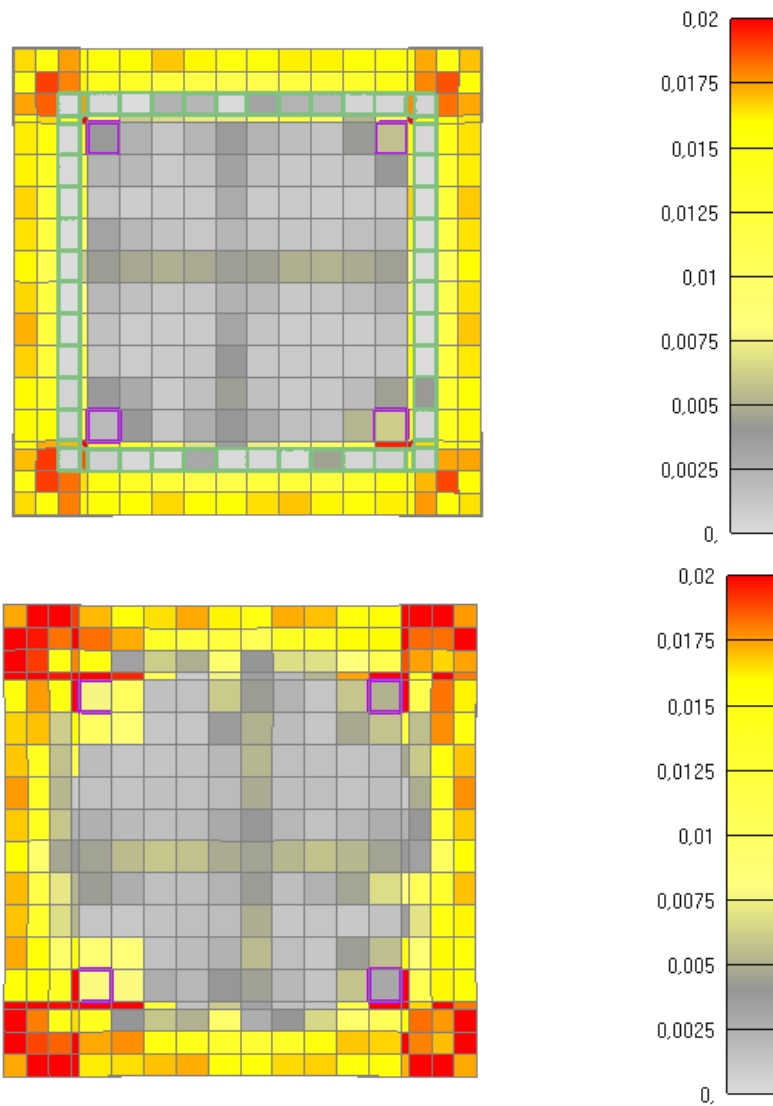
Slika 6.172: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 180 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



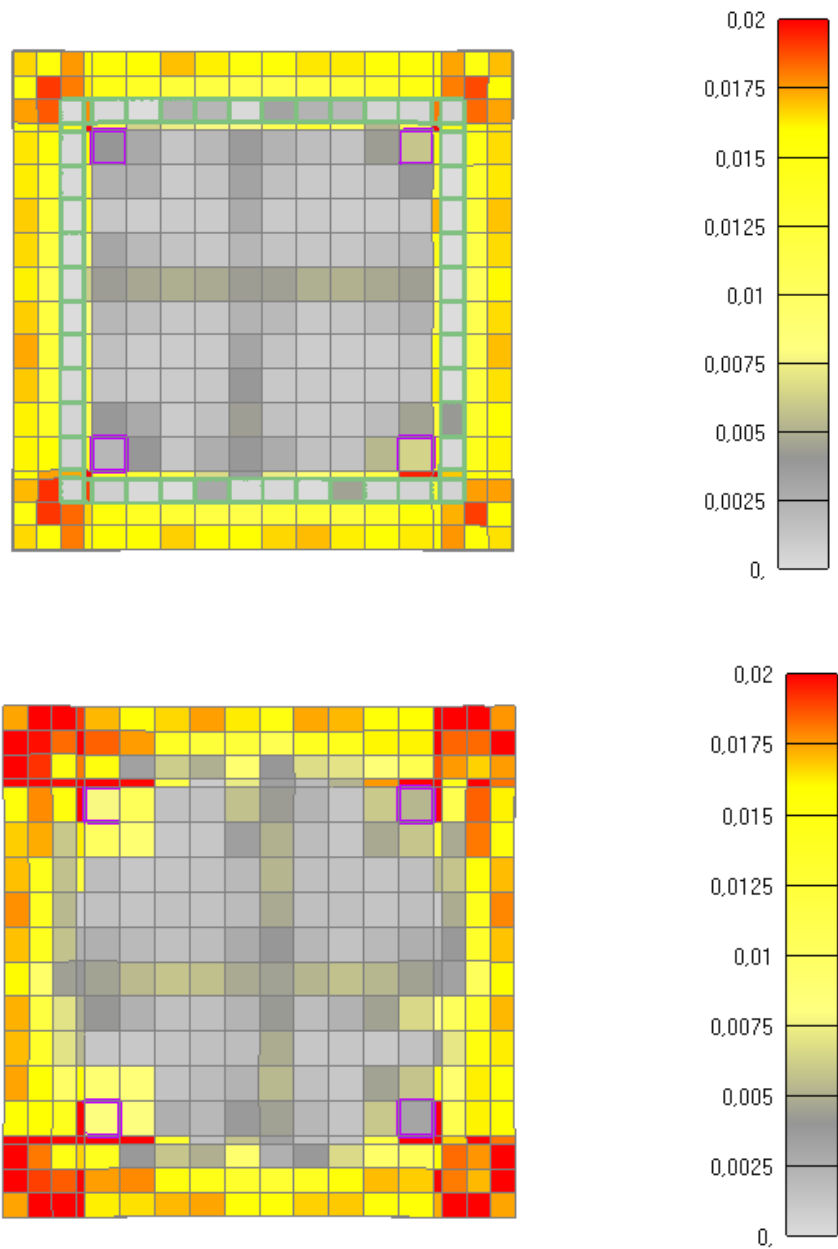
Slika 6.173: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 250 minuta požara  
(sa sponama) -KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



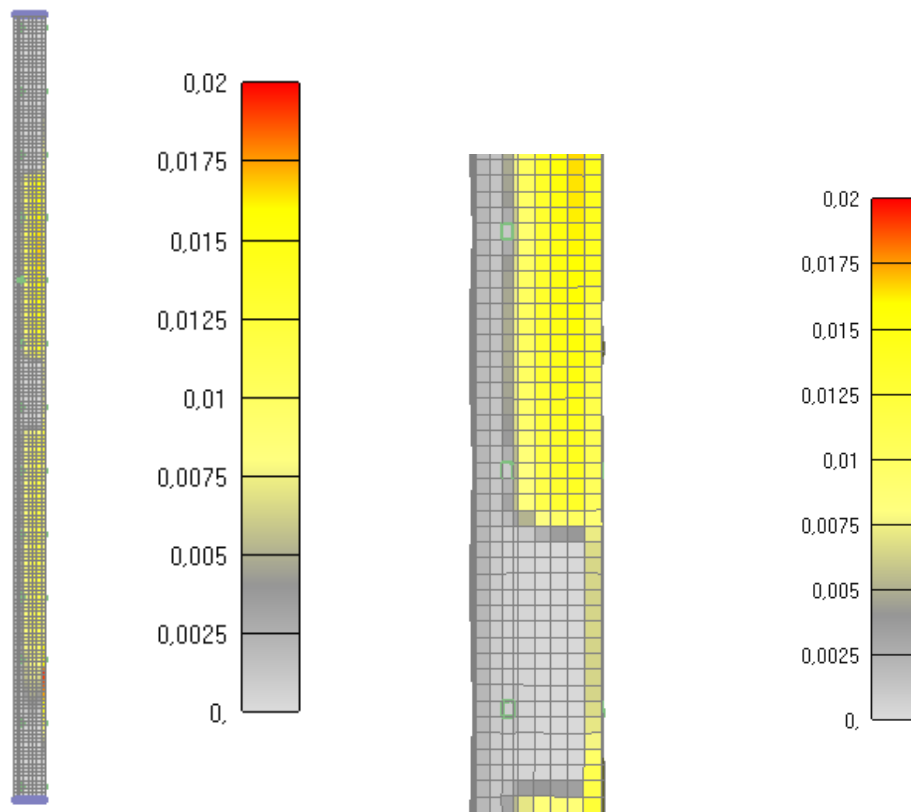
Slika 6.174: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 250 minuta požara  
(bez spona) -KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



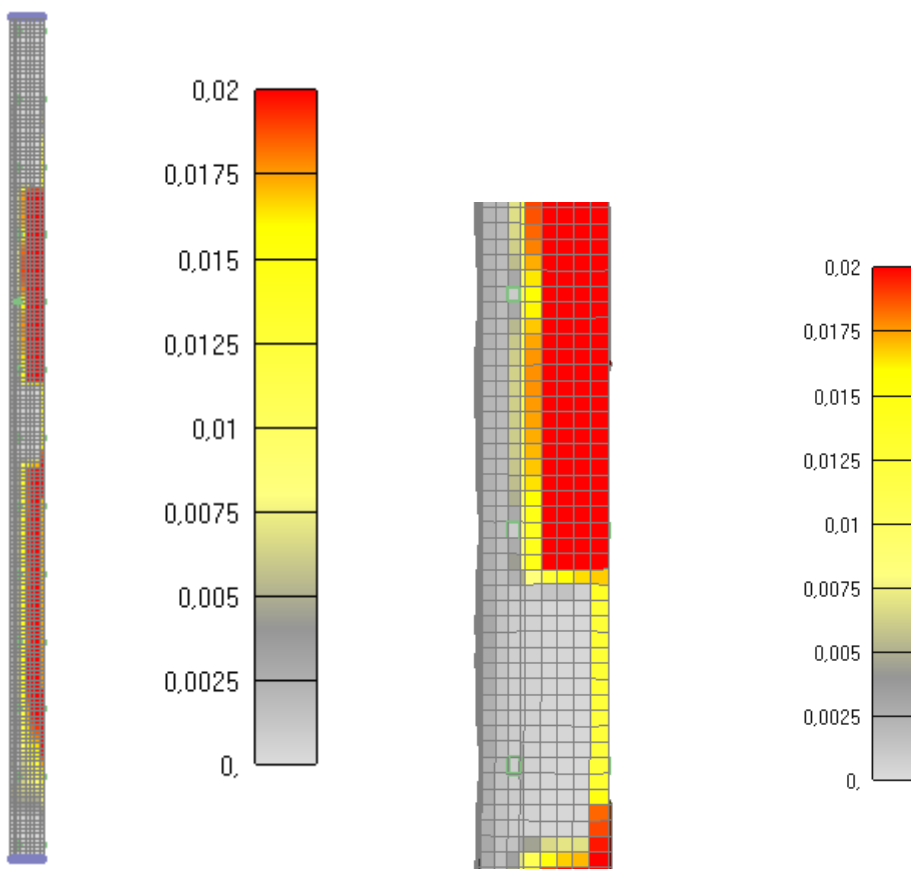
Slika 6.175: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1030 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



Slika 6.176: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1690 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA

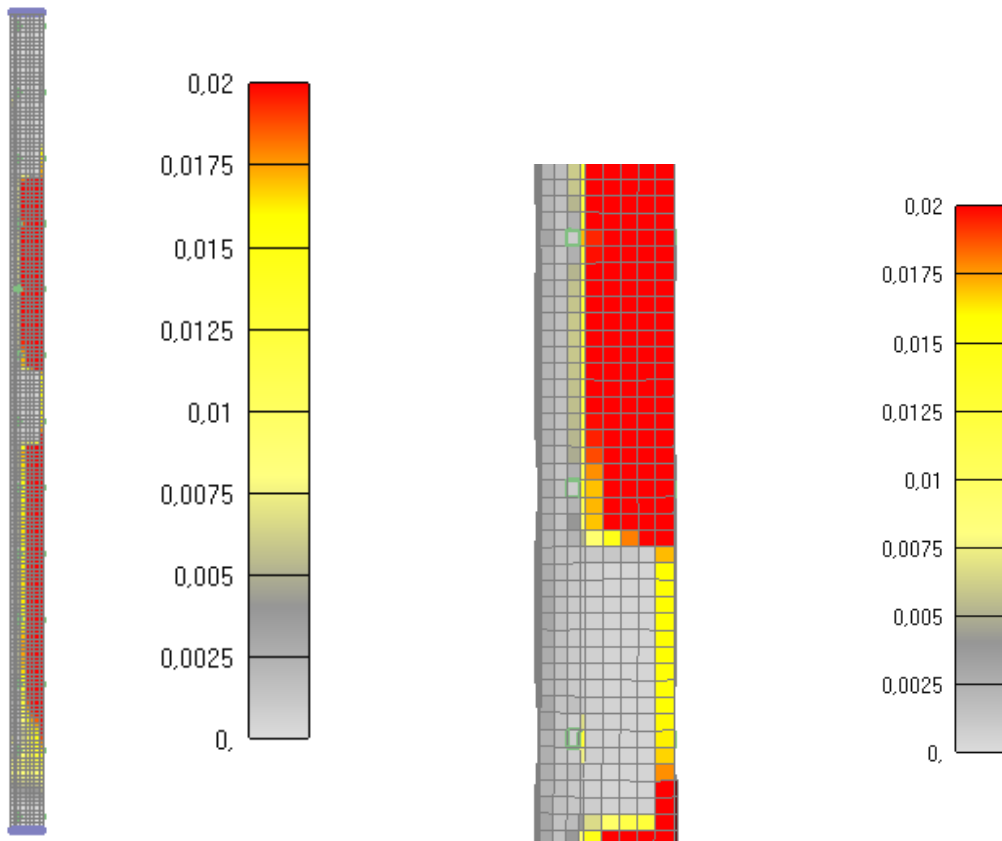


Slika 6.177: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

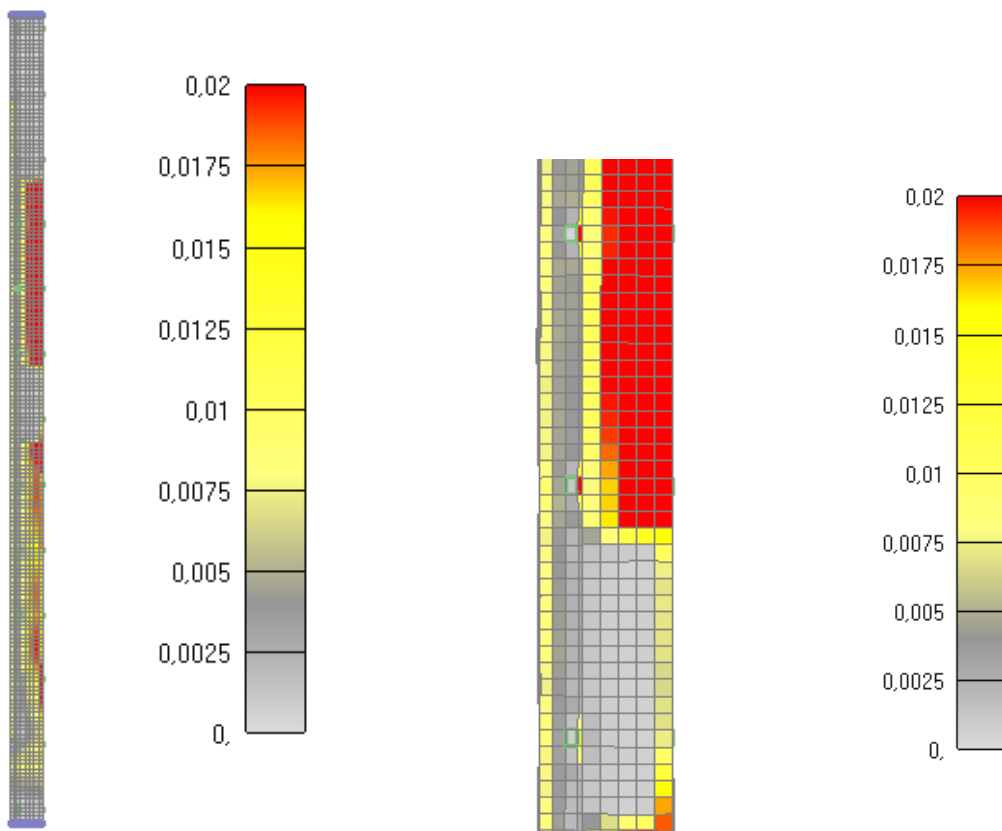


Slika 6.178: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

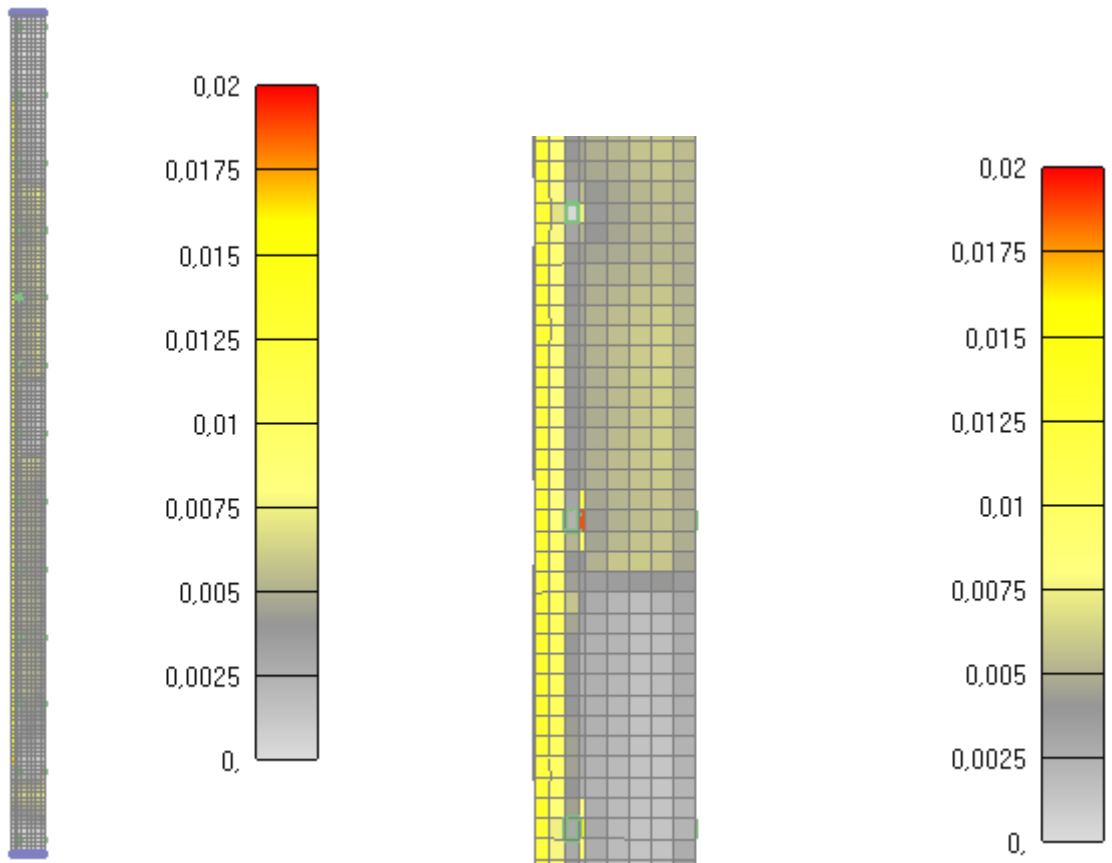




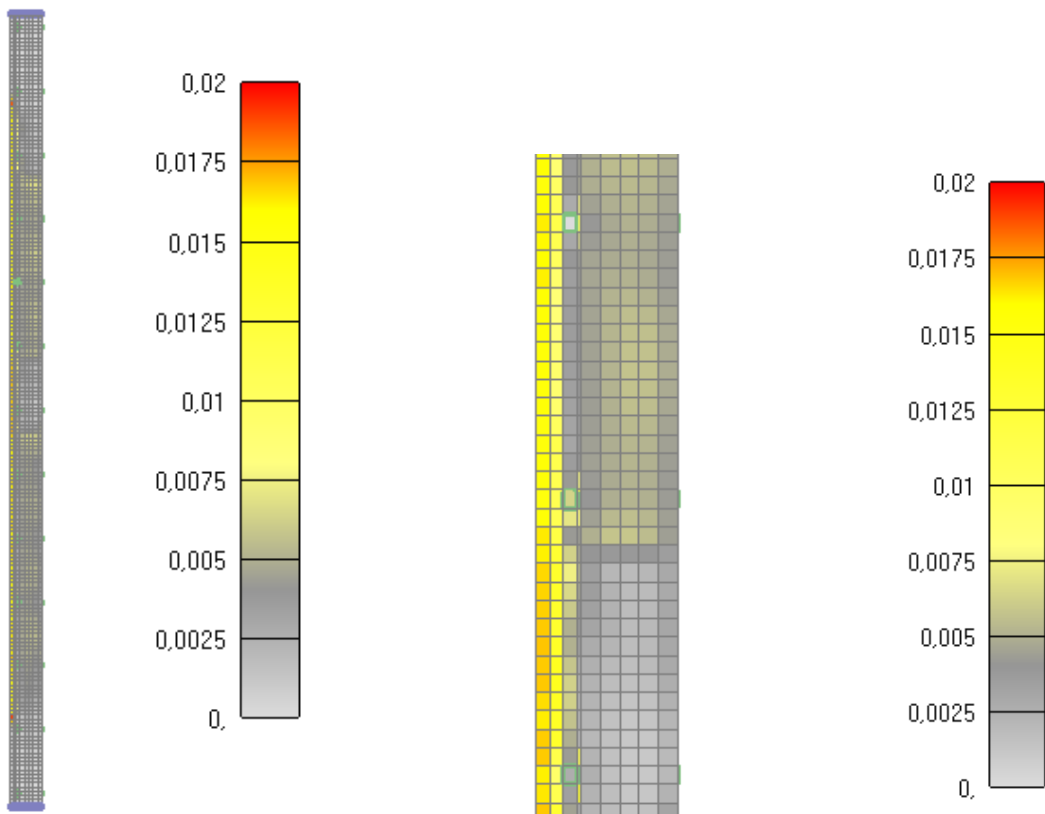
Slika 6.179: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



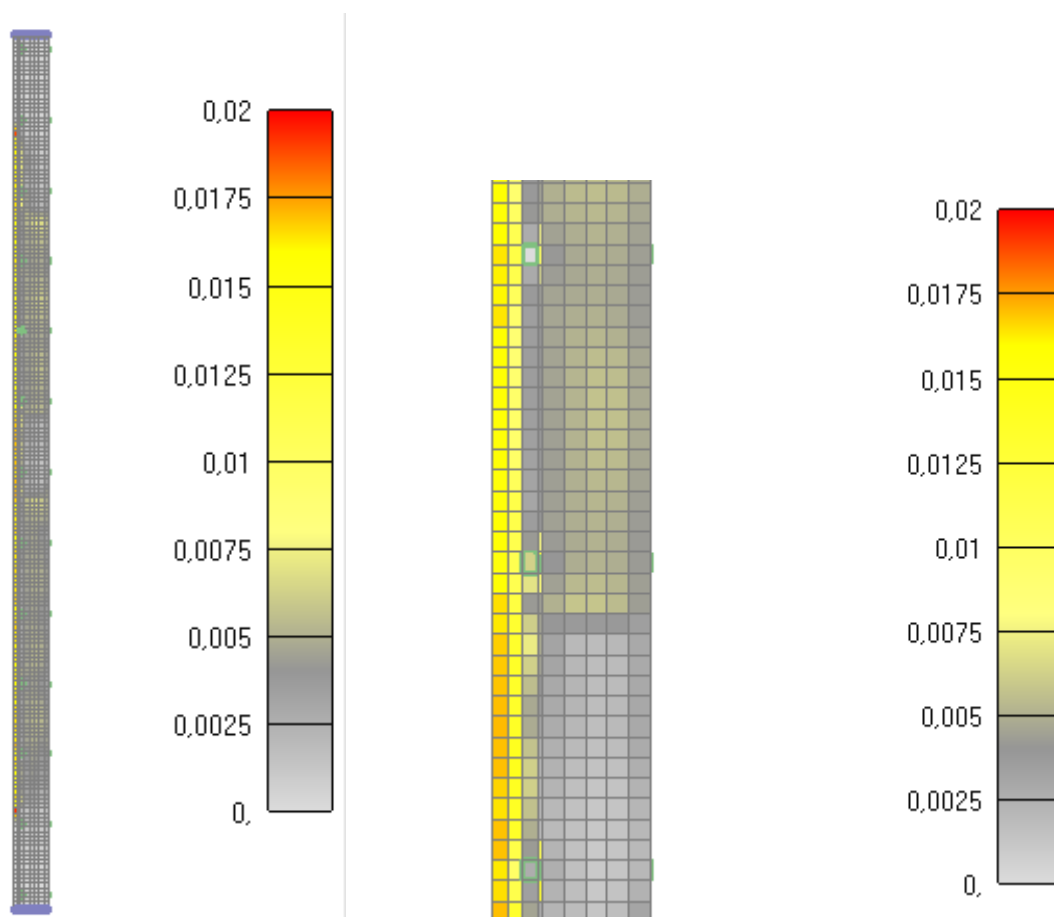
Slika 6.180: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 180 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



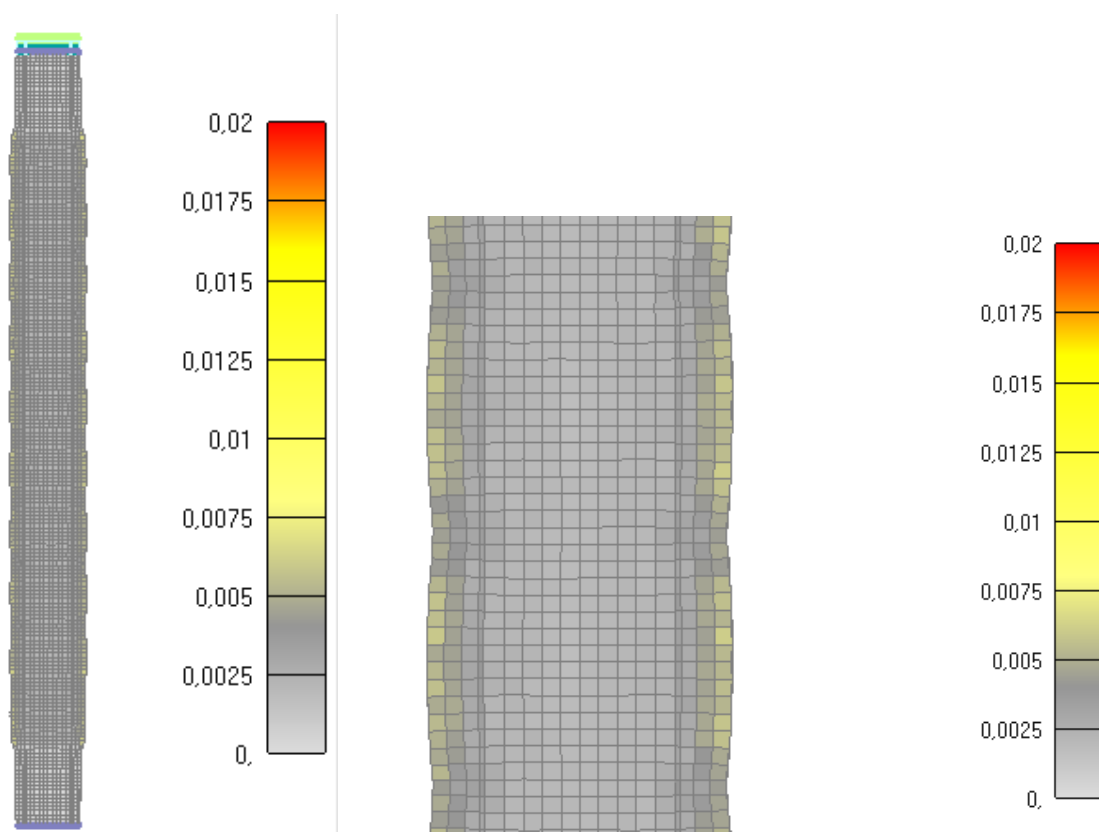
Slika 6.181: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 250 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA



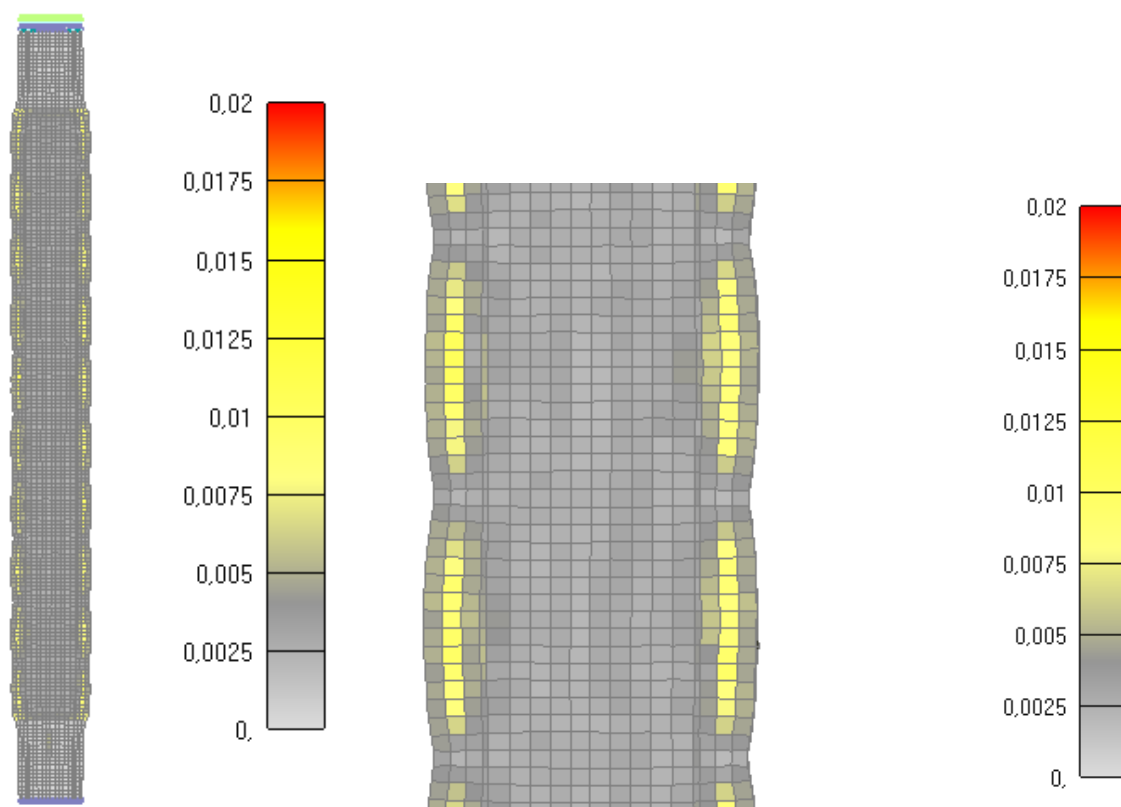
Slika 6.182: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1030 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



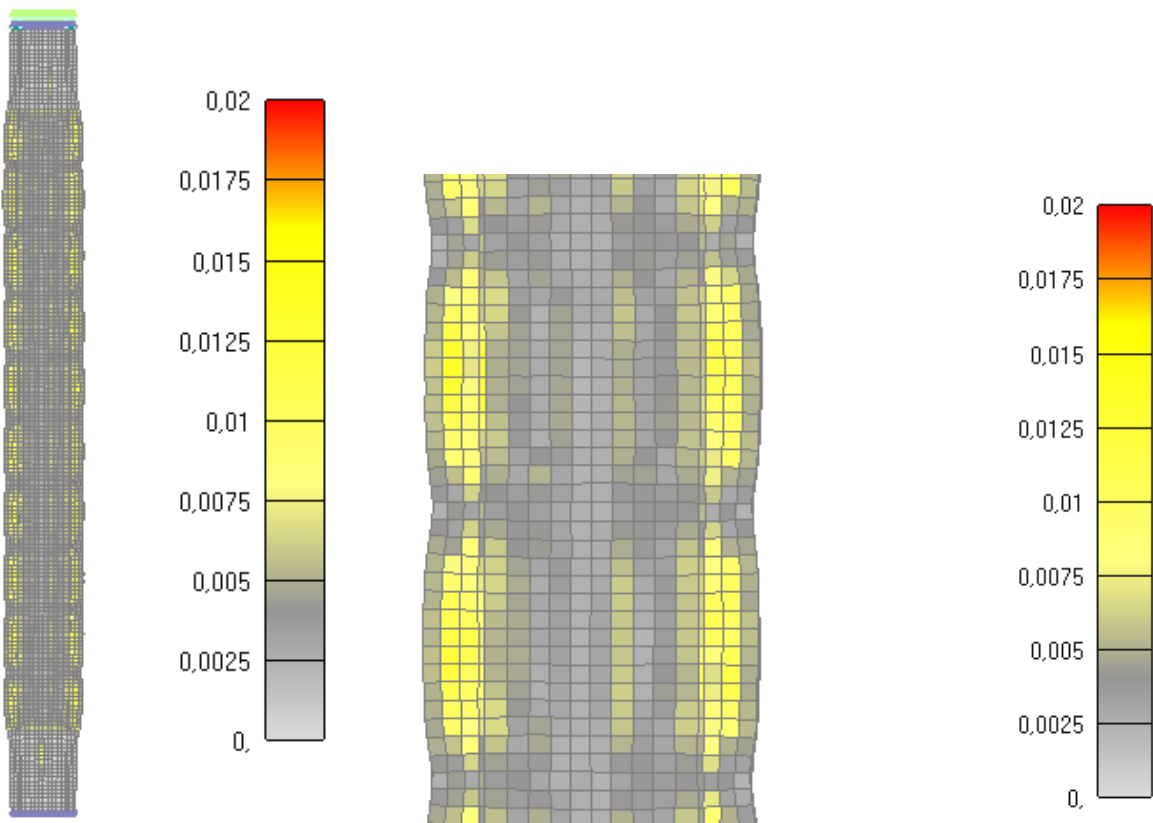
Slika 6.183: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1690 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



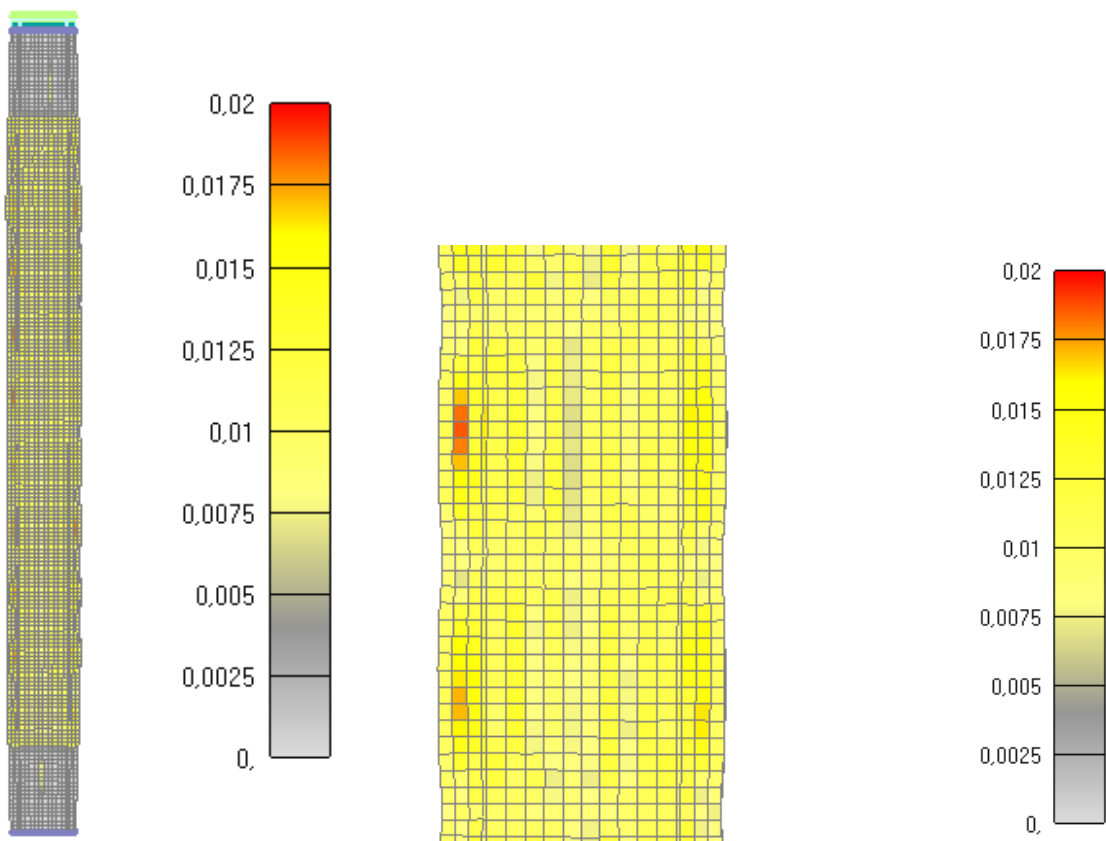
Slika 6.184: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



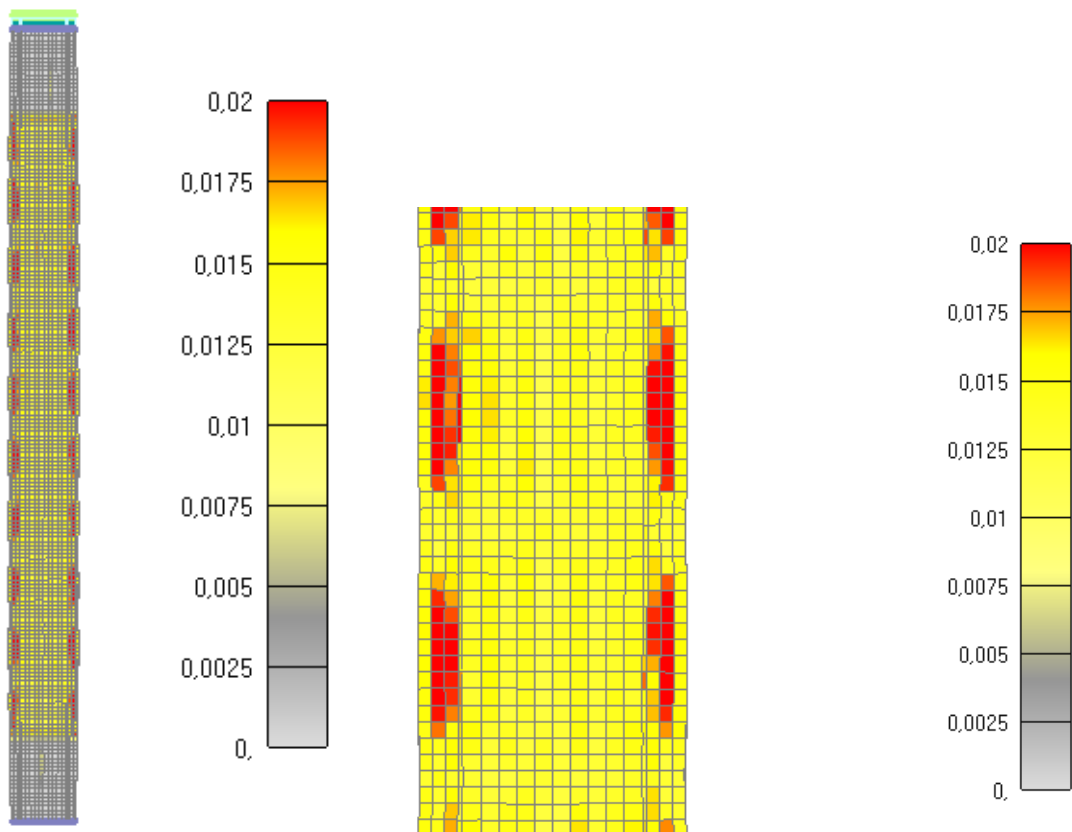
Slika 6.185: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



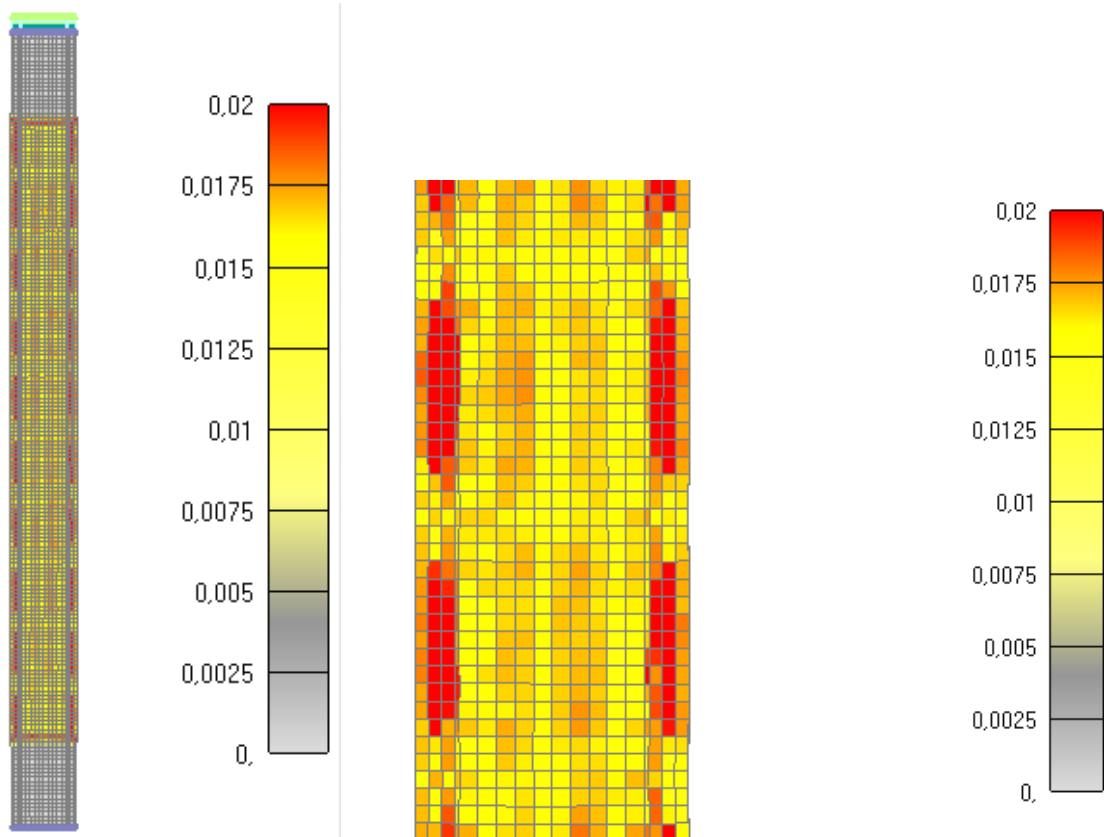
Slika 6.186: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA



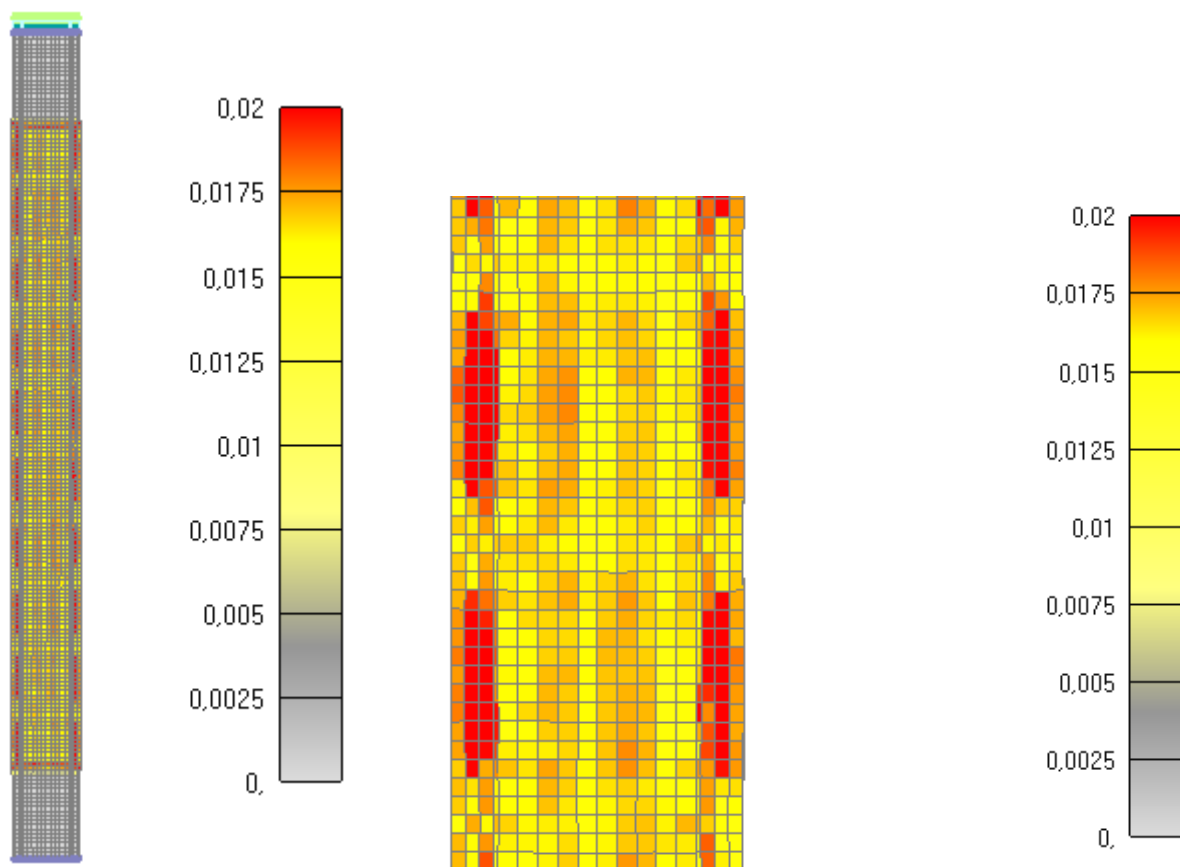
Slika 6.187: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 180 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.188: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 250 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
 I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA



Slika 6.189: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1030 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



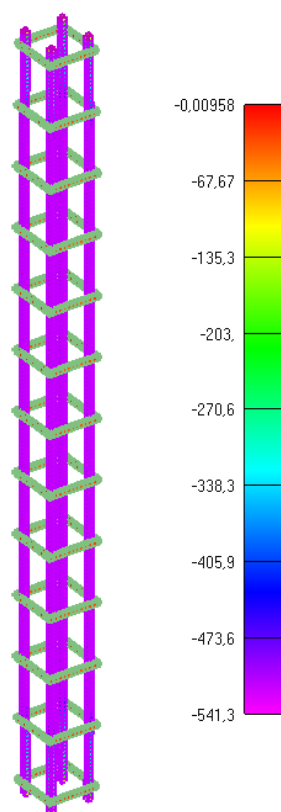
Slika 6.190: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1690 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

---

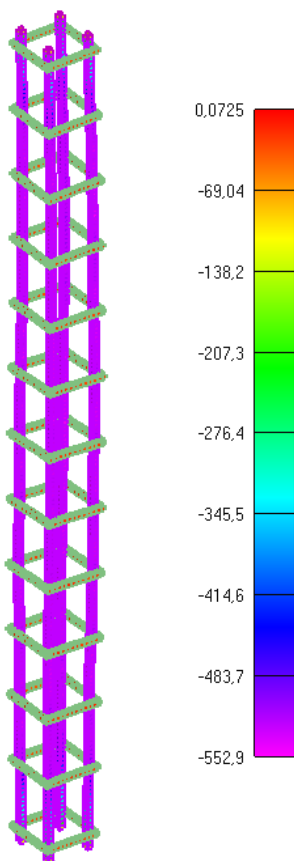
### **6.2.3.6. 5.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 90 minuta)**

U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu) te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 90 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna o iznosu sile tako da će se taj dijagram prikazati na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 90 minuta.

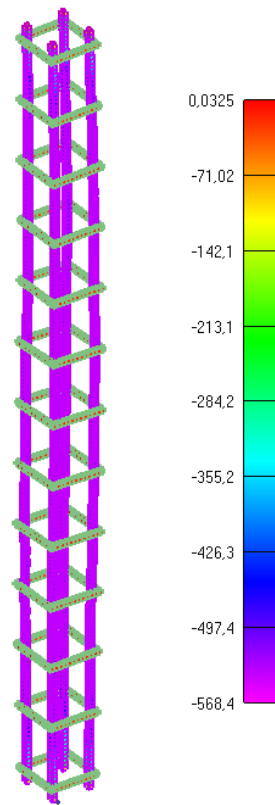




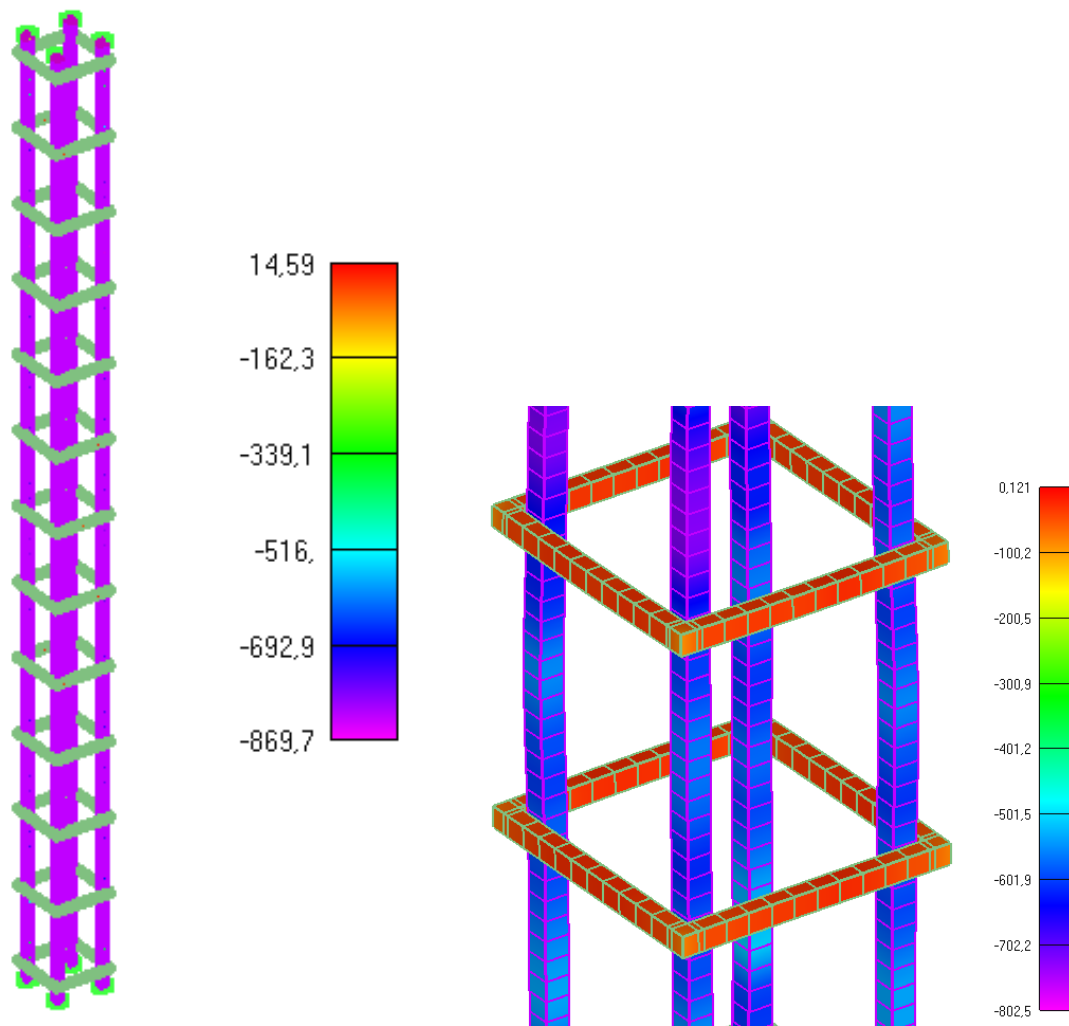
Slika 6.191: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



Slika 6.192: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min

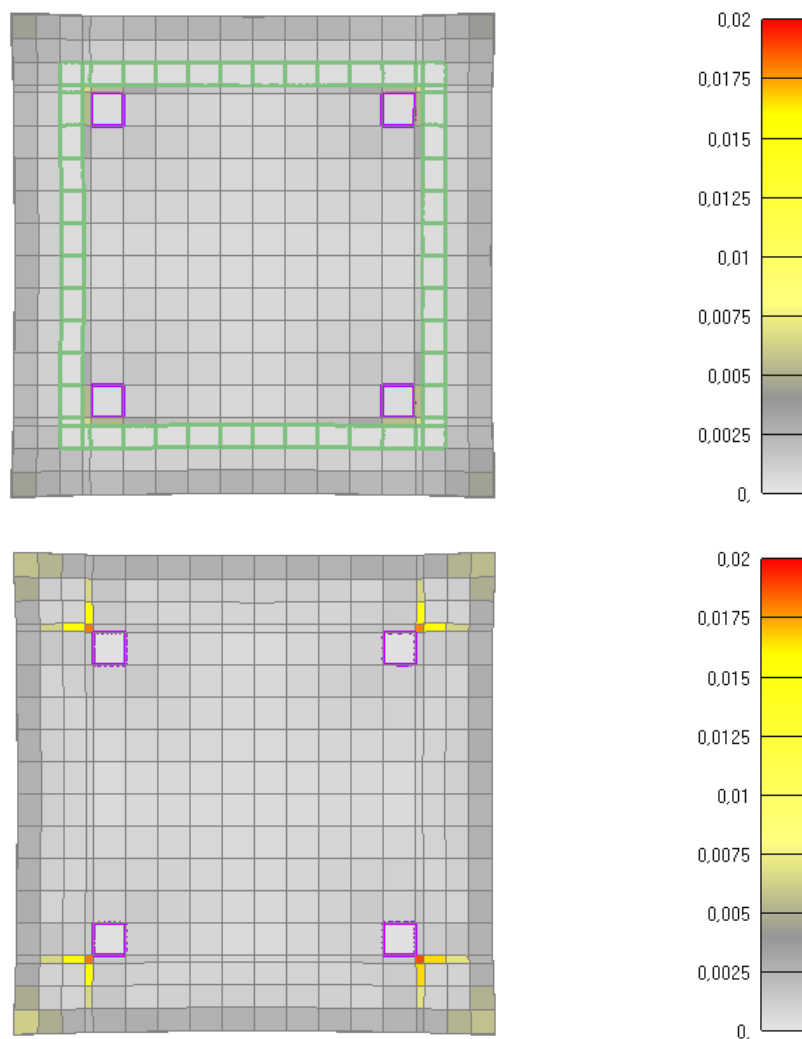


Slika 6.193: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min  
(*UBRZO NAKON OVE TOČKE PROMATRANJA STUP SE SRUŠIO*)

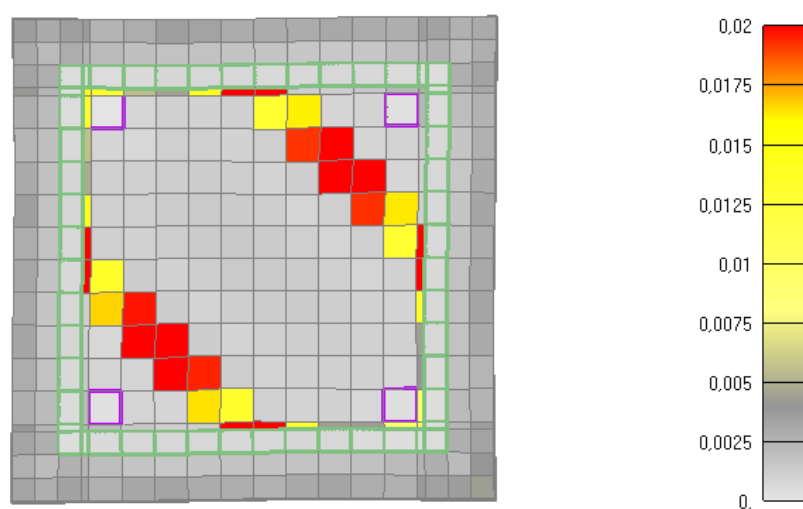


Slika 6.194: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

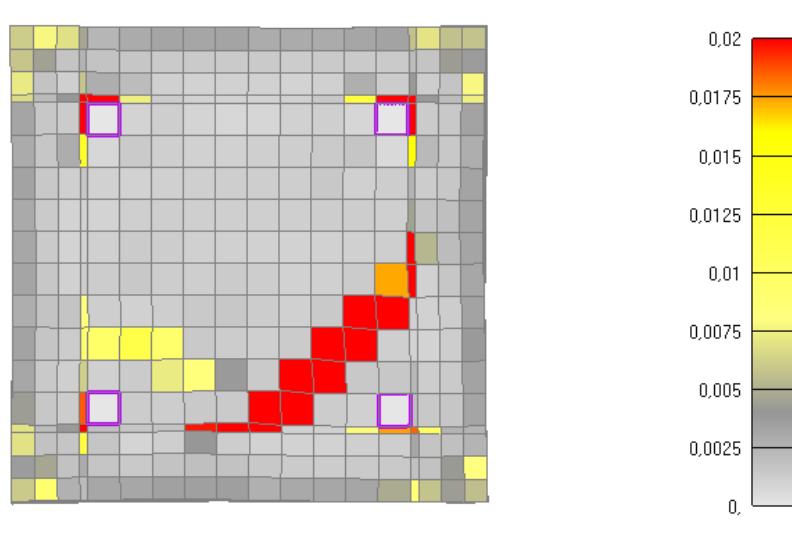
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



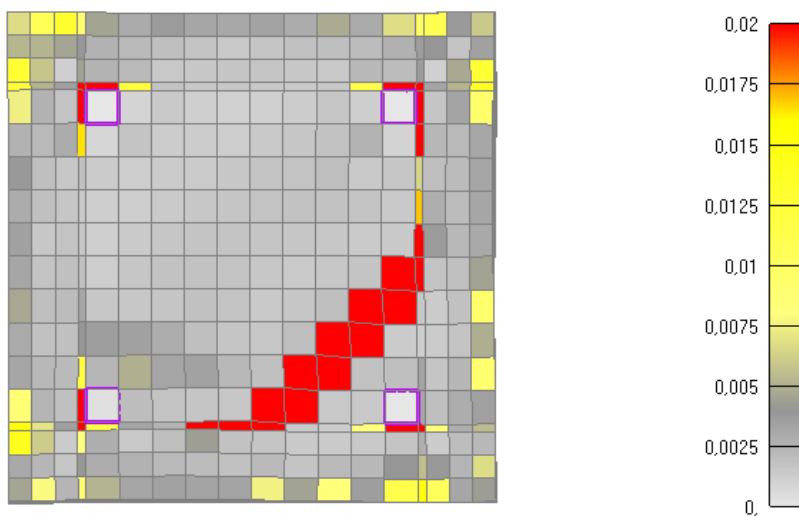
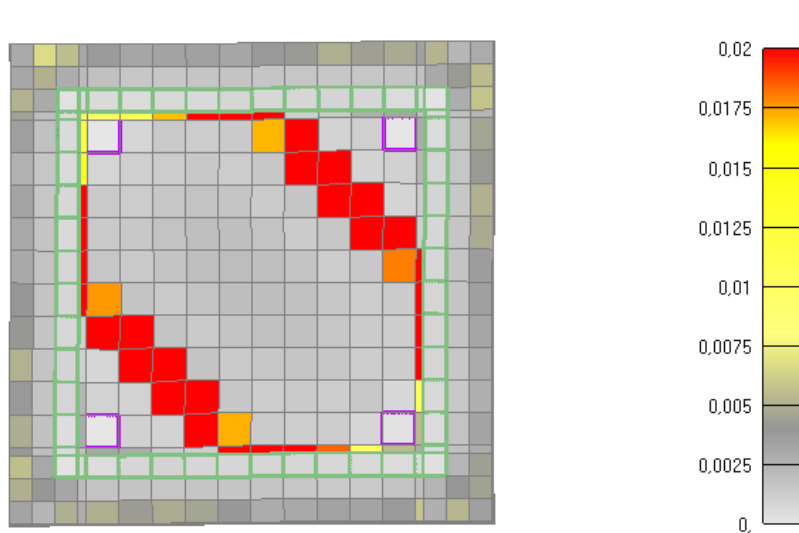
Slika 6.195: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



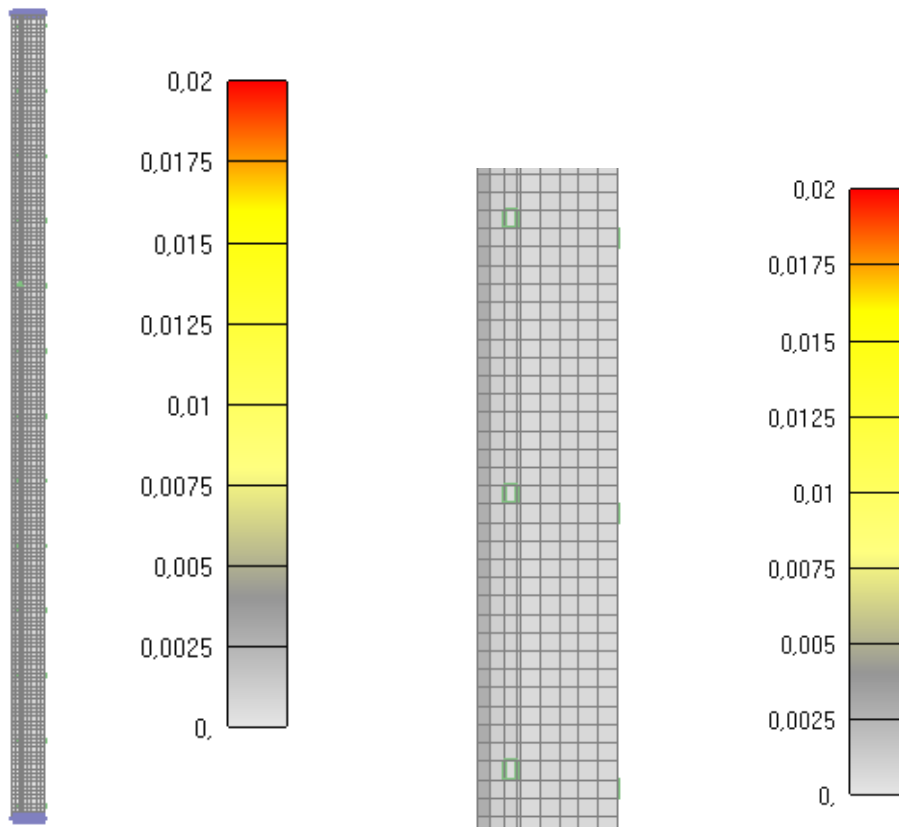
Slika 6.196: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)



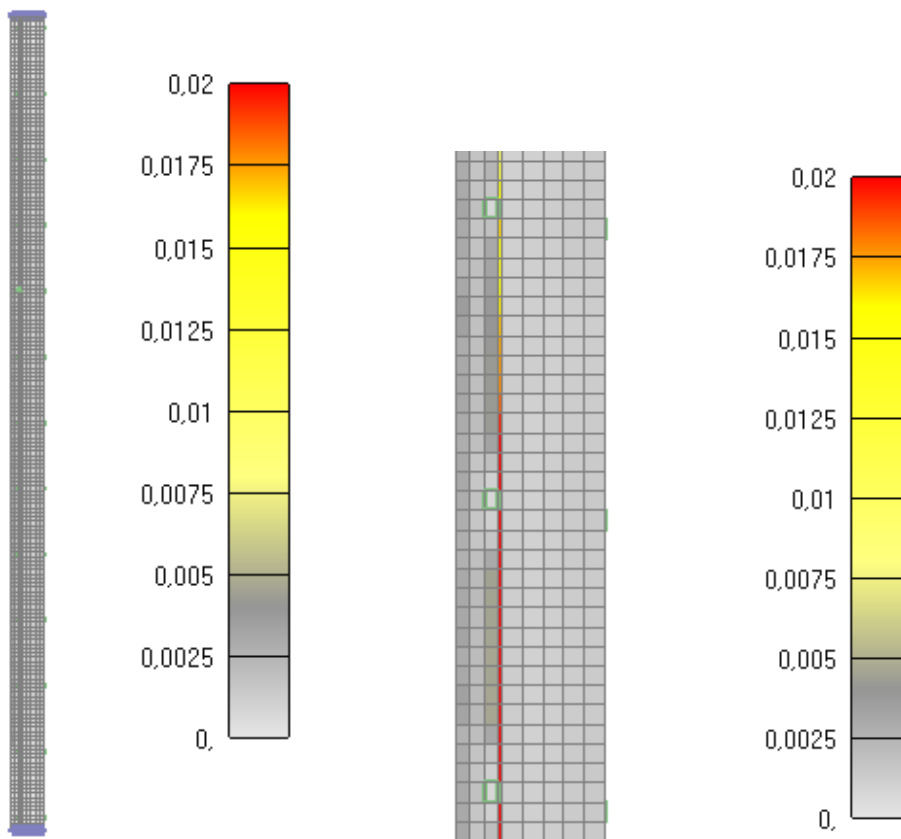
Slika 6.197: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona)



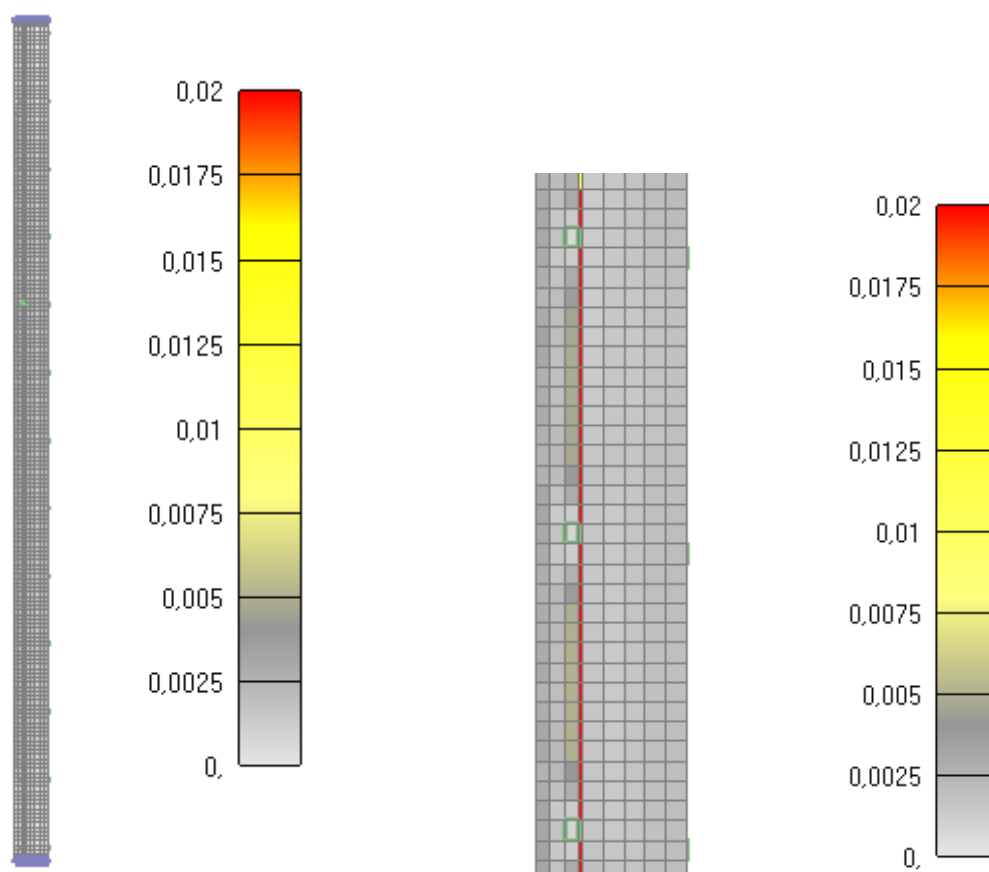
Slika 6.198: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona) (UBRZO NAKON OVE TOČKE PROMATRANJA STUP SE SRUŠIO)



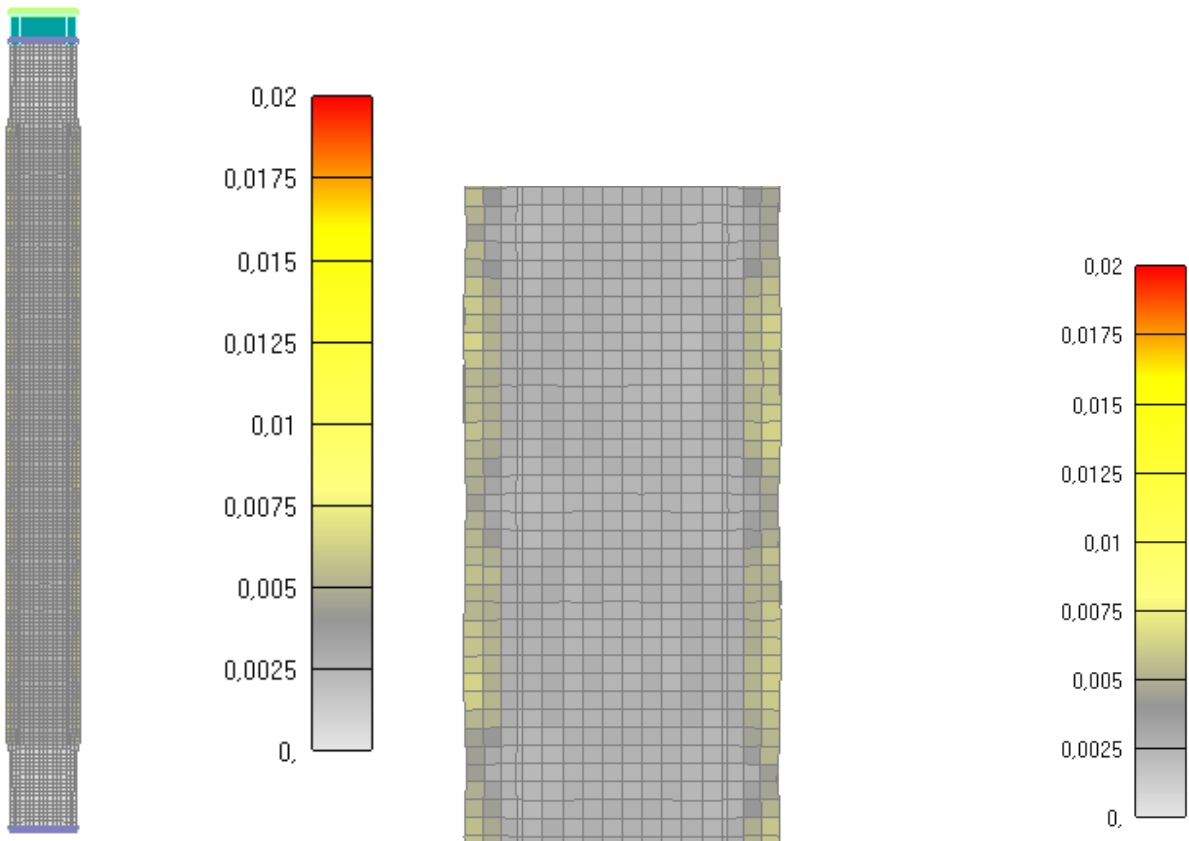
Slika 6.199: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



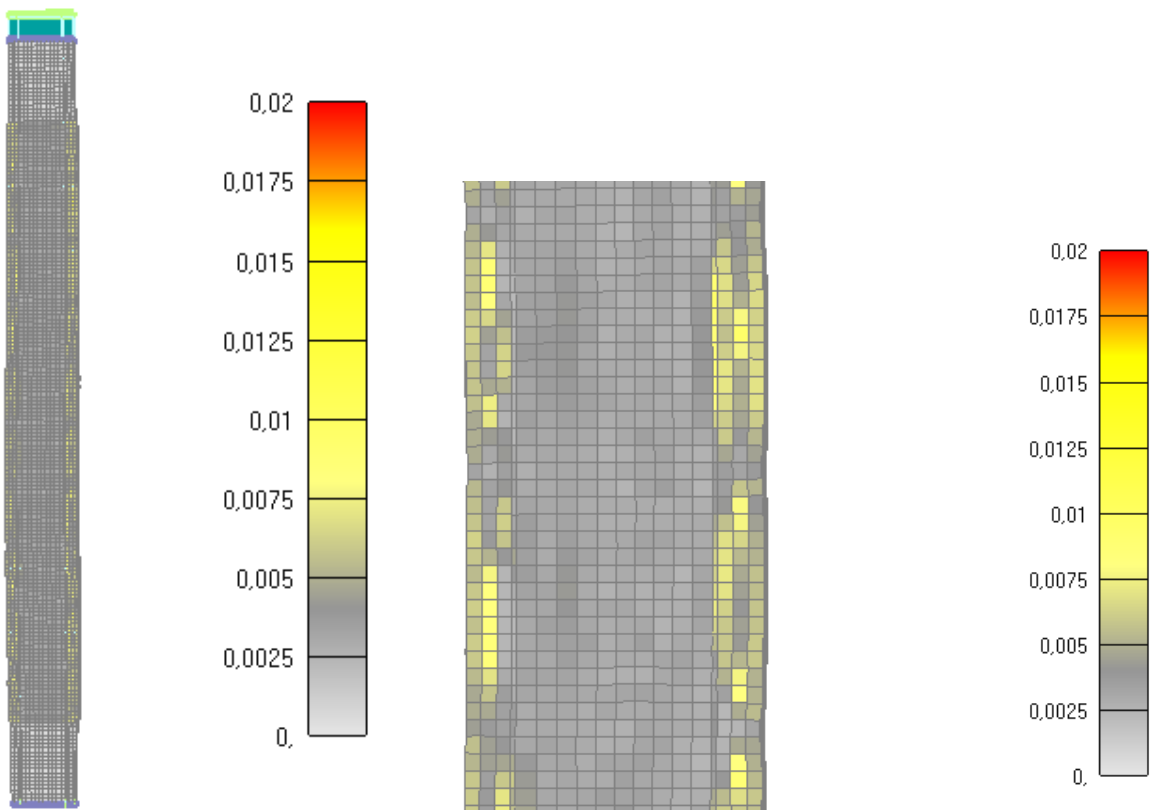
Slika 6.200: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



Slika 6.201: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) (UBRZO NAKON OVE TOČKE PROMATRANJA STUP  
SE SRUŠIO)

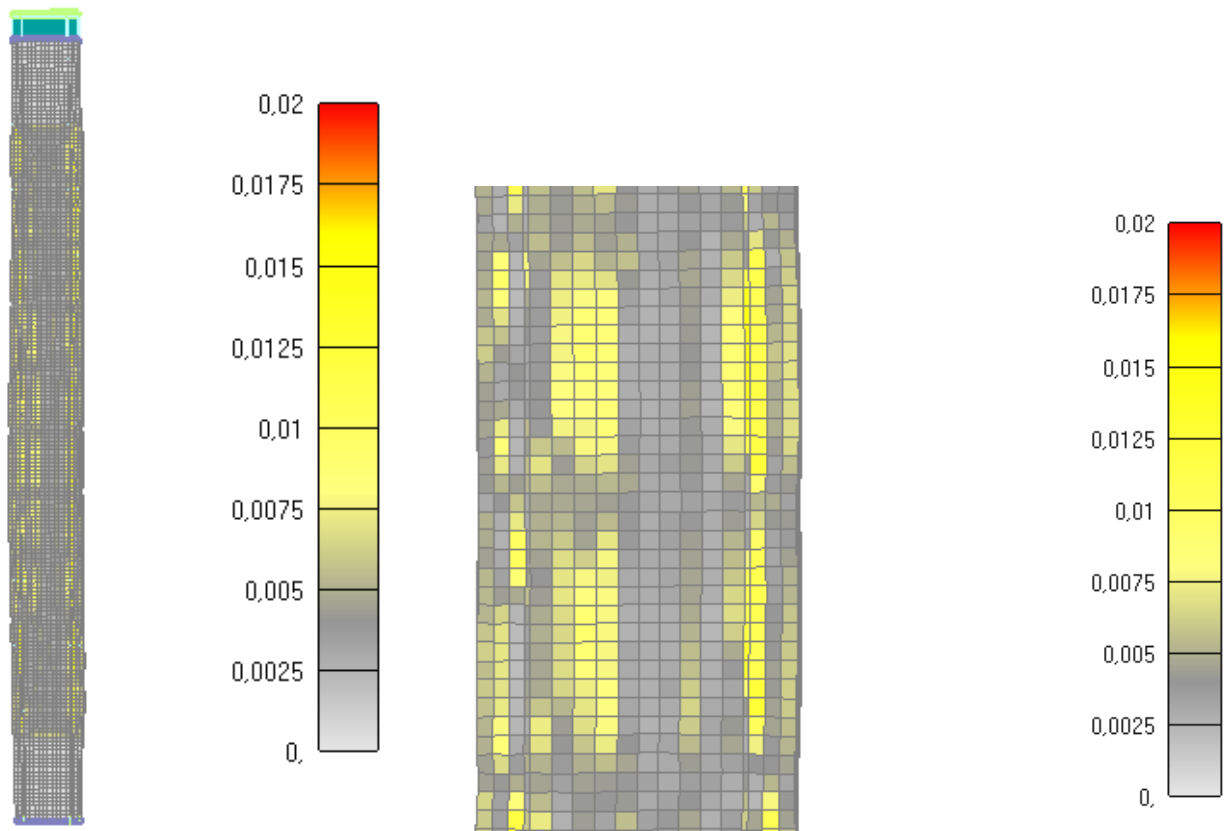


Slika 6.202: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.203: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



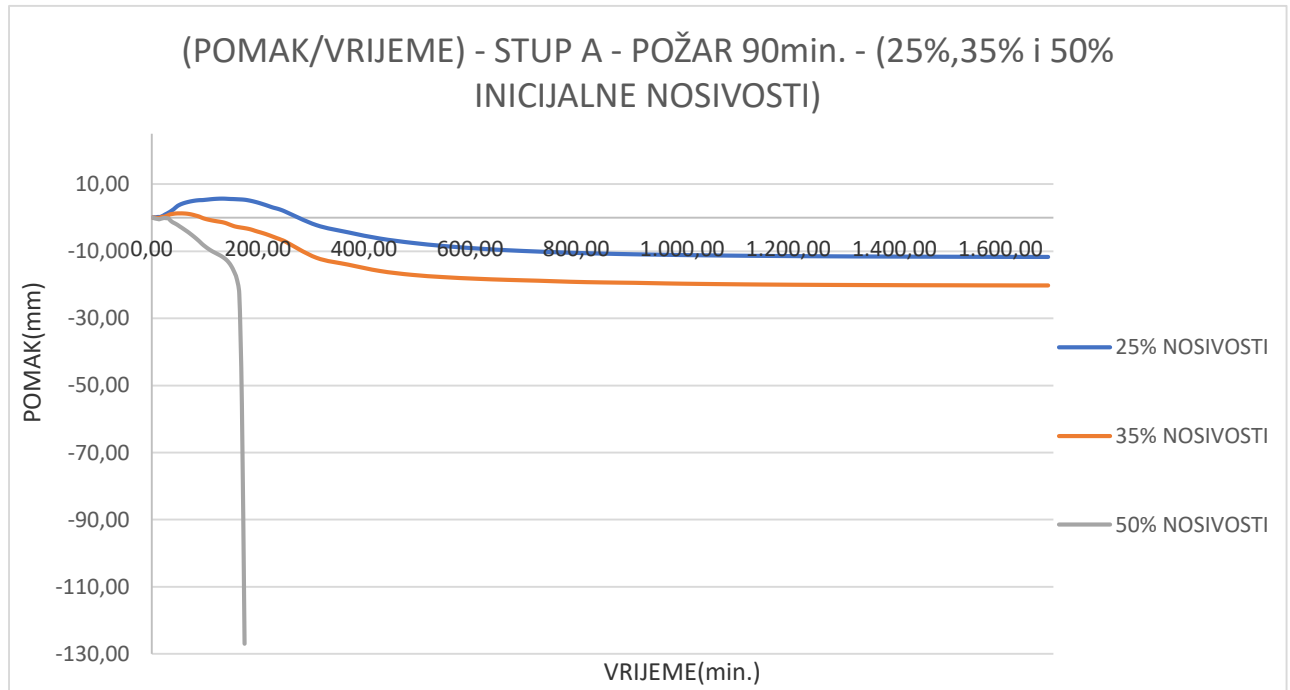


Slika 6.204: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) (UBRZO NAKON OVE TOČKE PROMATRANJA STUP SE  
SRUŠIO)

---

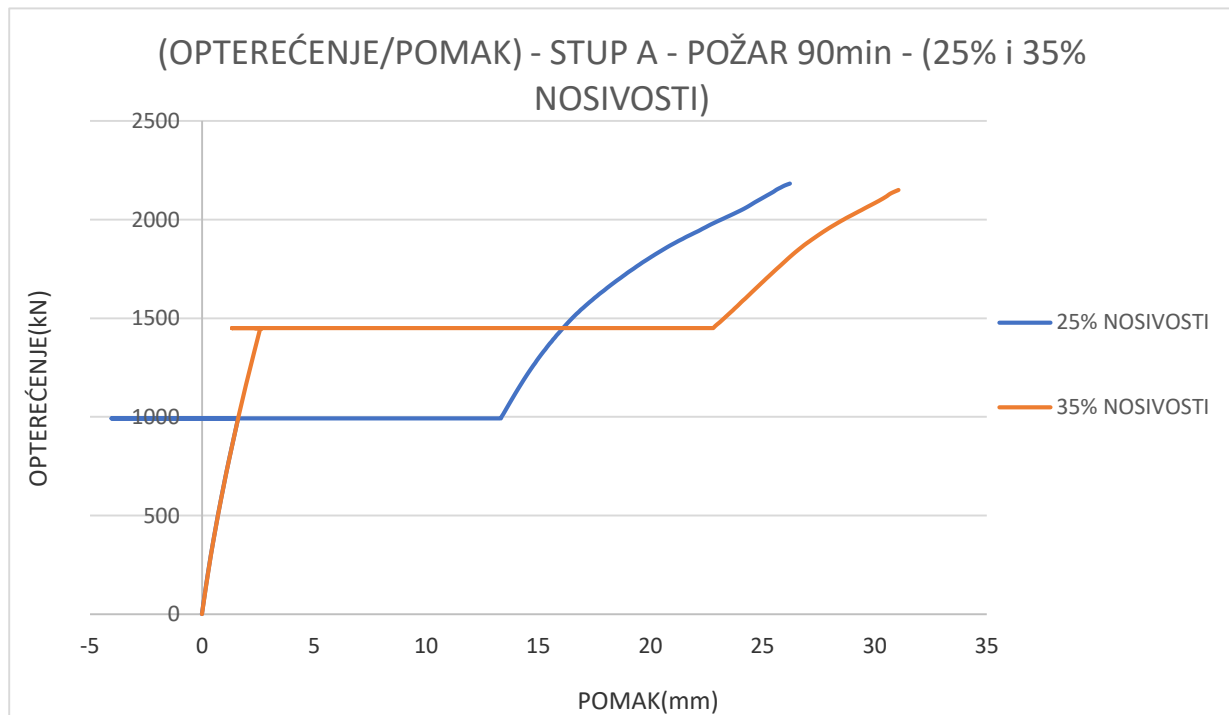
### **6.2.3.7. USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 90 min ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA**

U ovom poglavlju će se promatrati pomaci i sile pri kojima stup dolazi do loma. Uspoređivati će se dijagrami (pomak-vrijeme) i (opterećenje-pomak) za različite intezitete opterećenja sile, a jednako vrijeme požara od 90 minuta. Za vrijeme trajanja požara od 90 minuta su već prikazane pukotine (središnji poprečni presjek stupa, jedna četvrtina stupa i cijeli stup), te tečenje armature. Dijagram distribucije temperature će biti prikazan za trajanje požara od 90 minuta i on je neovisan o intezitetu sile tako da vrijedi za sva opterećenja.



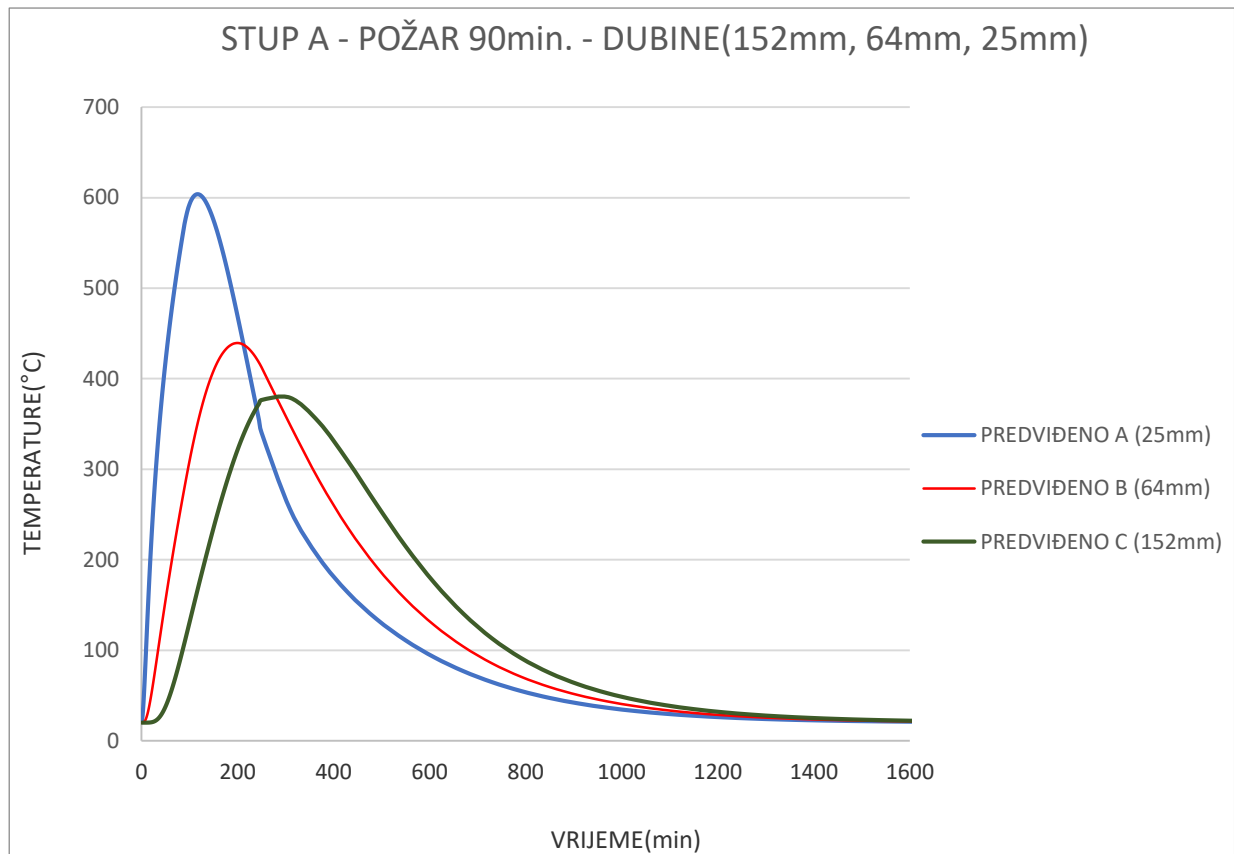
Slika 6.205: Prikaz dijagrama (pomak-vrijeme) za vrijeme požara od 90 minuta i različite intezitete opterećenja sile

Iz prethodnog dijagrama se može vidjeti da je stup "preživio" požarni proces za 2 inteziteta opterećenja 25% i 35%, dok se za intezitet sile od 50% inicijalne nosivosti stup srušio za vrijeme požarnog procesa. Stup s 25% inteziteta opterećenja ili 992kN za vrijeme zagrijavanja ima ekspanziju oko 6 mm, dok mu je sabijanje na kraju požarnog procesa oko 12mm. Stup s intezitetom opterećenja od 35% ili 1450kN ima manju ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog toga što na njega djeluje veća sila prije zagrijavanja i ekspanzija iznosi oko 1mm, dok mu sabijanje na kraju požarnog procesa iznosi oko 20mm. Stup s intezitetom opterećenja 50% od inicijalne nosivosti ili 2100kN gotovo i nema ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog velike sile koja djeluje na njega prije djelovanja požara, dok je njegovo sabijanje u požarnom procesu otišlo u beskonačnost, tj. stup se srušio za vrijeme požarnog procesa nakon negdje 2 i pol sata.



Slika 6.206: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) za vrijeme požara od 90 minuta i različite intezitete opterećenja sile

Iz prethodnog dijagrama (opterećenje-pomak) se može vidjeti trenutke u kojima je došlo do loma stupa za različite iznose opterećenja. Sile djeluju u iznosima 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti odnosno (992kN, 1450kN, i 2100kN). Na grafu su prikazani samo stupovi sa opterećenjem od 25% i 35% nosivosti zbog toga što se stup s opterećenjem od 50% nosivosti srušio još za vrijeme požarnog procesa. Iz grafa se može vidjeti da su moduli elastičnosti oba dva stupa identični prije djelovanja požara, a nakon završenog požarnog procesa nagib krivulja se smanjio što u biti znači da su mehaničke karakteristike materijala narušene, a samim time i modul elastičnosti je smanjen. Sila pri kojoj se stup slomije za opterećenje prije požara od 992kN iznosi 2180kN, dok sila sloma za opterećenje prije požara od 1450kN iznosi 2150kN.

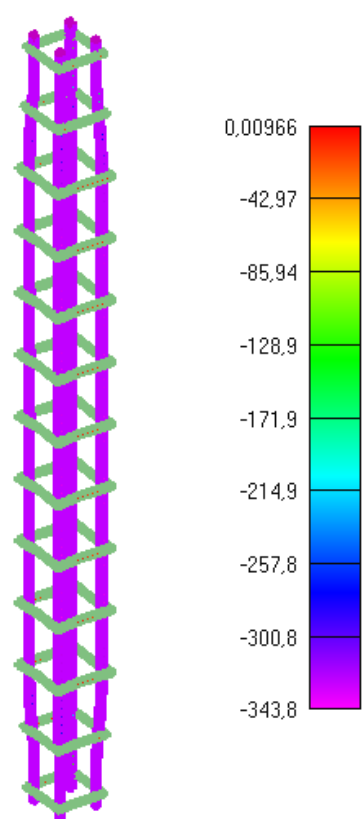


Slika 6.207: Prikaz dijagrama distribucije temperature za vrijeme požara od 90 minuta

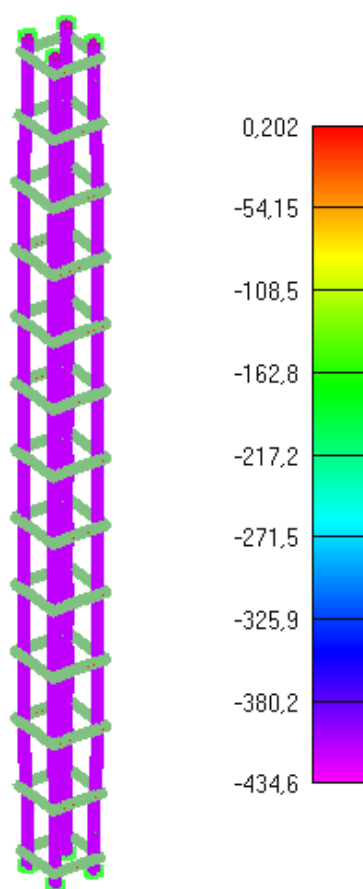
Prethodni dijagram prikazuje distribuciju temperature u točkama A, B i C na dubinama 25mm, 64mm i 125mm od površine stupa tijekom požarnog procesa. Može se vidjeti da se najviše temperature tijekom požara postižu u točki A zbog toga što se ona nalazi najbliže površini stupa dok se najniže temperature postižu u točki C koja se nalazi u centru stupa. U točki A maksimalna temperatura iznosi oko 600°C, dok je u točki C u centru stupa maksimalna temperatura negdje oko 380°C.

### **6.2.3.8. 6.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 25% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)**

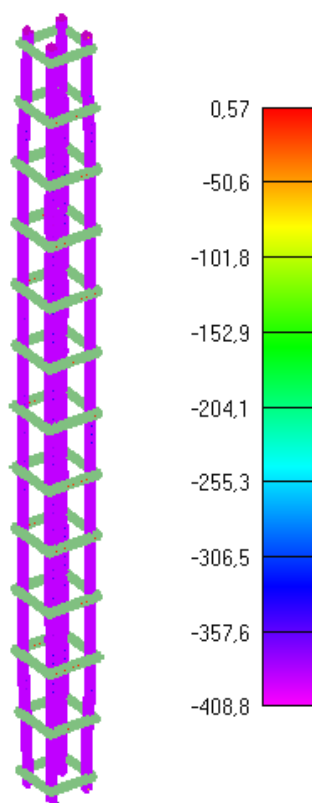
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu), te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrami pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će biti prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 120 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna iznosu sile tako da će se taj dijagram prikazati na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta.



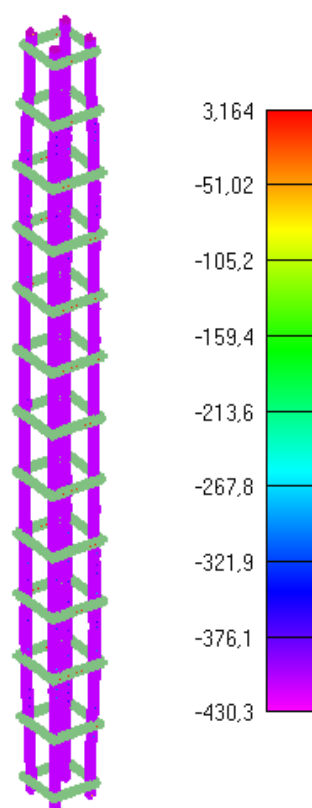
Slika 6.208: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



Slika 6.209: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min

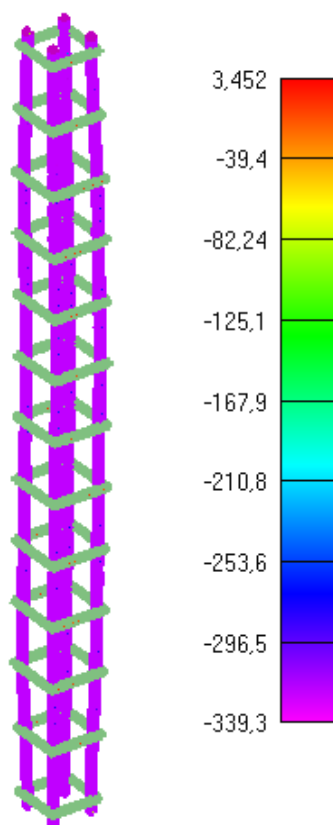


Slika 6.210: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min

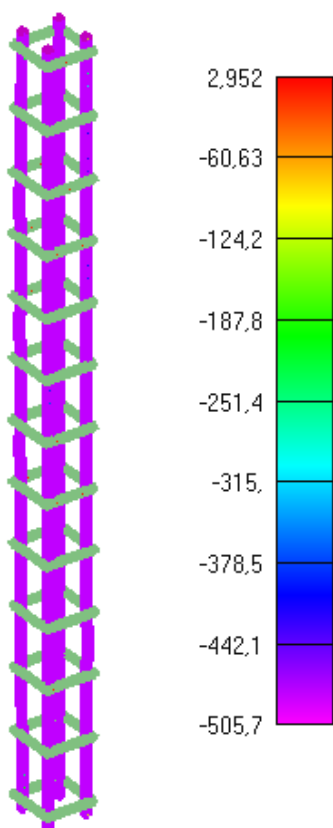


Slika 6.211: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 120min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA*

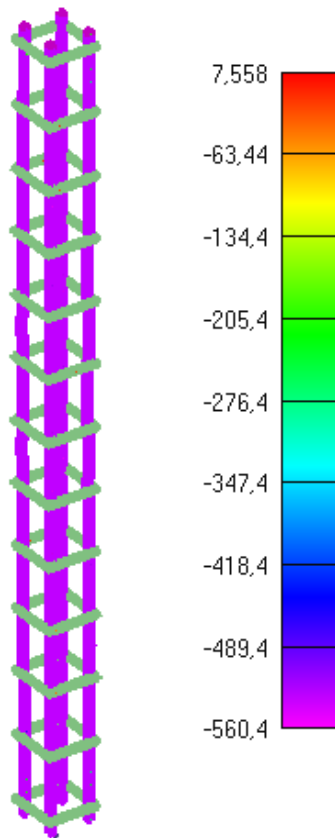




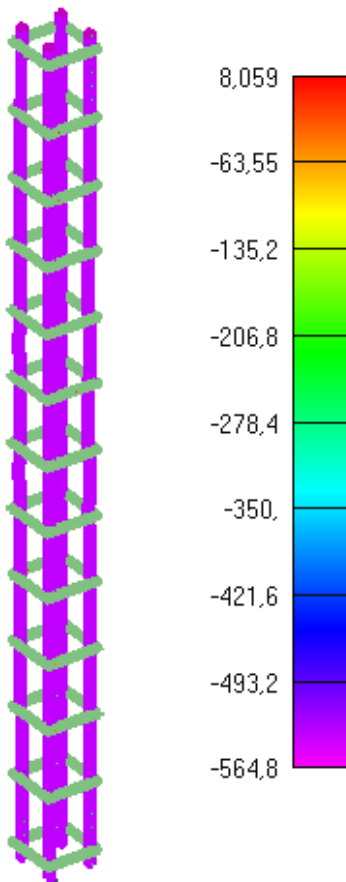
Slika 6.212: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 275min



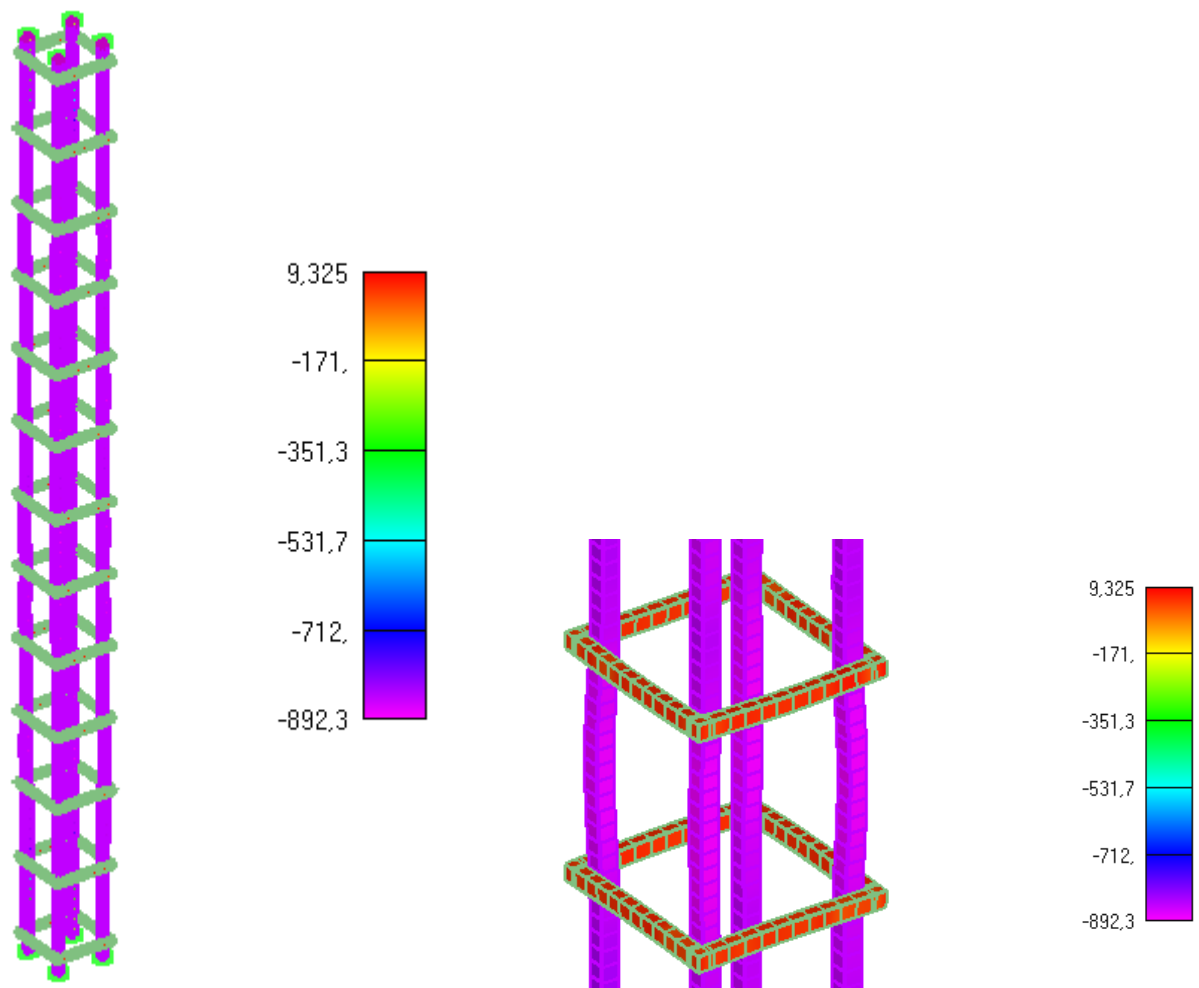
Slika 6.213: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 370min  
*KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA*



Slika 6.214: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1090min

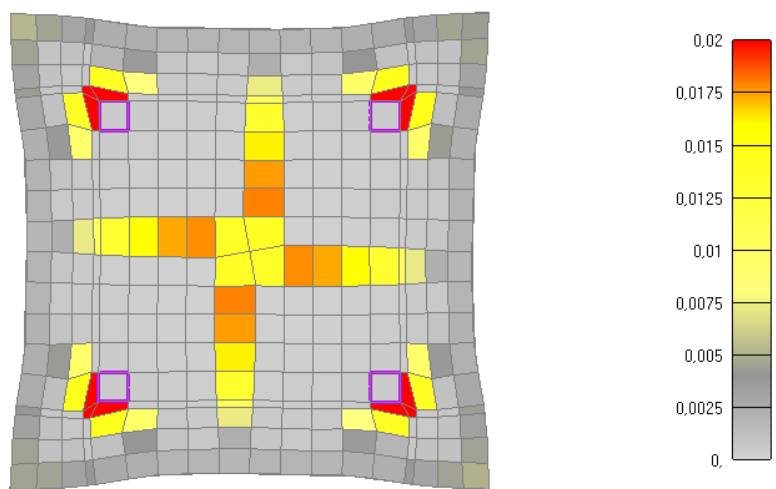
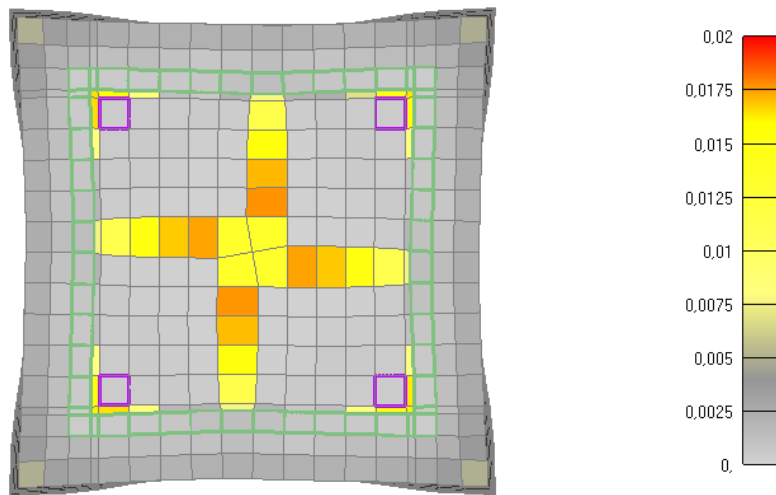


Slika 6.215: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 1810min  
*KRAJ POŽARNOG PROCESA*

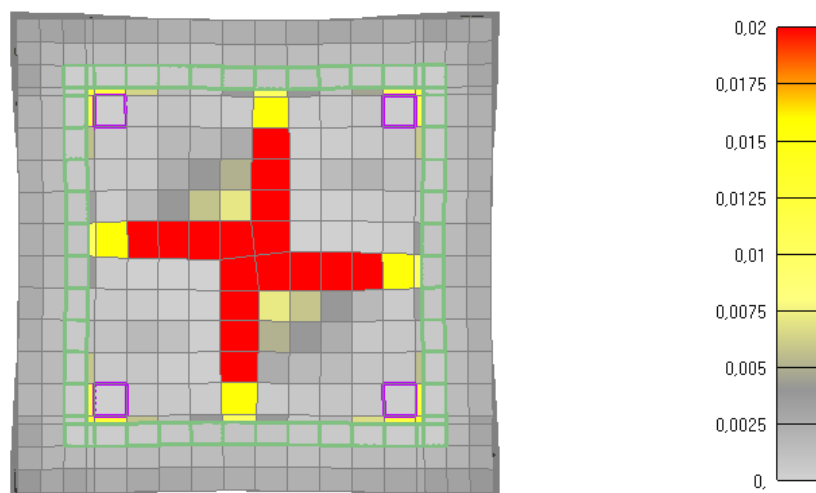


Slika 6.216: Prikaz napreznja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

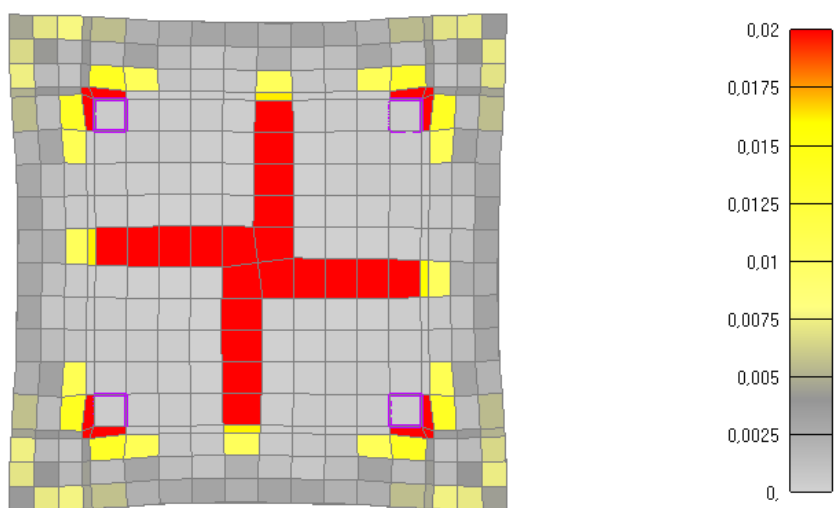
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi napreznja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



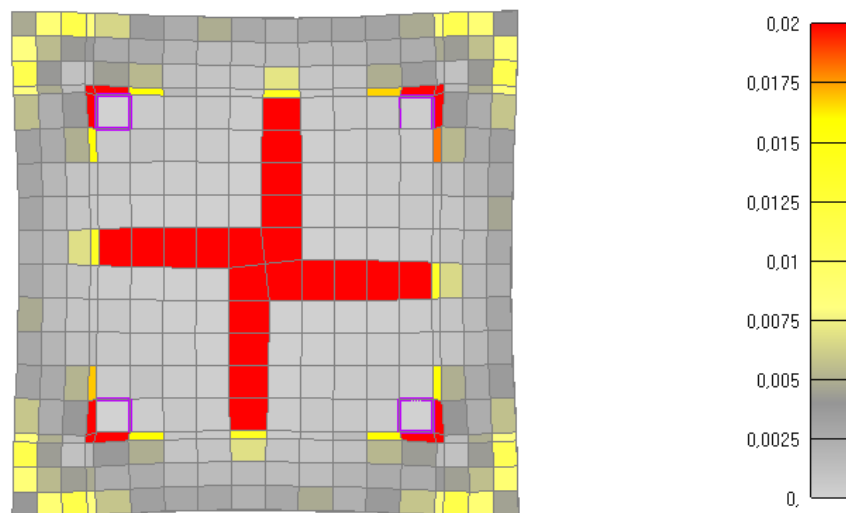
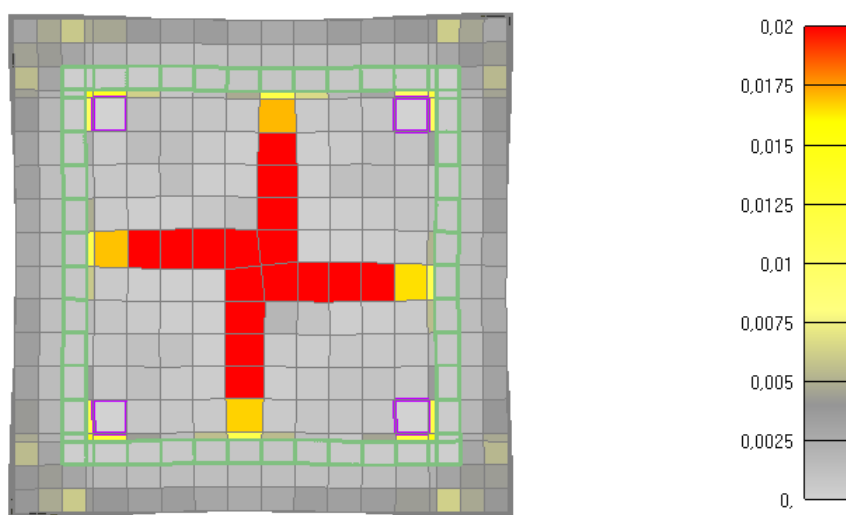
Slika 6.217: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



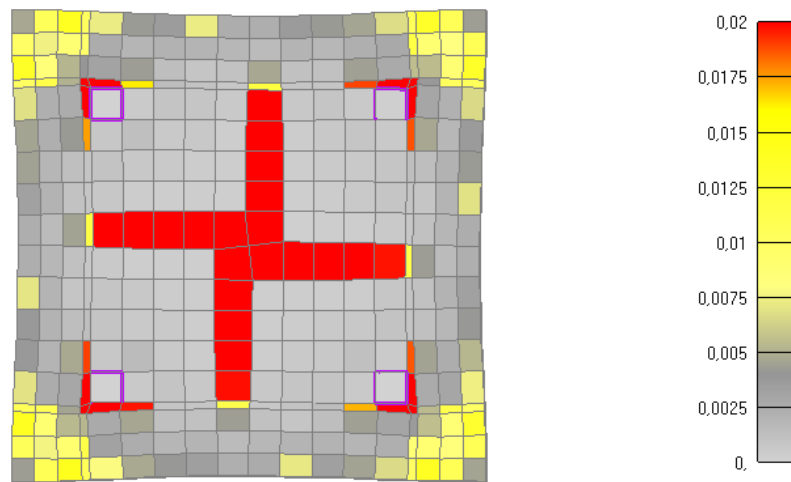
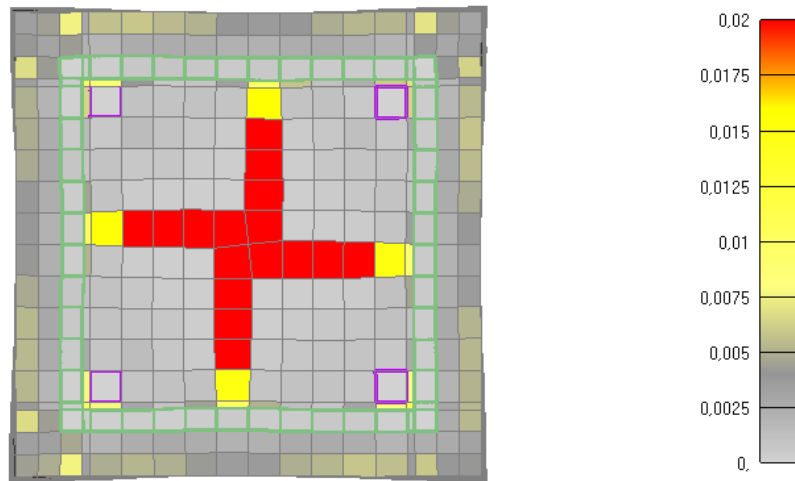
Slika 6.218: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)



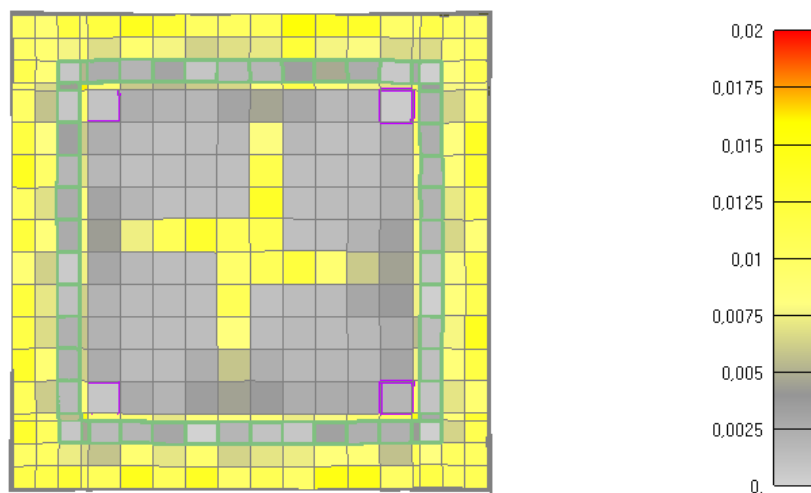
Slika 6.219: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona)



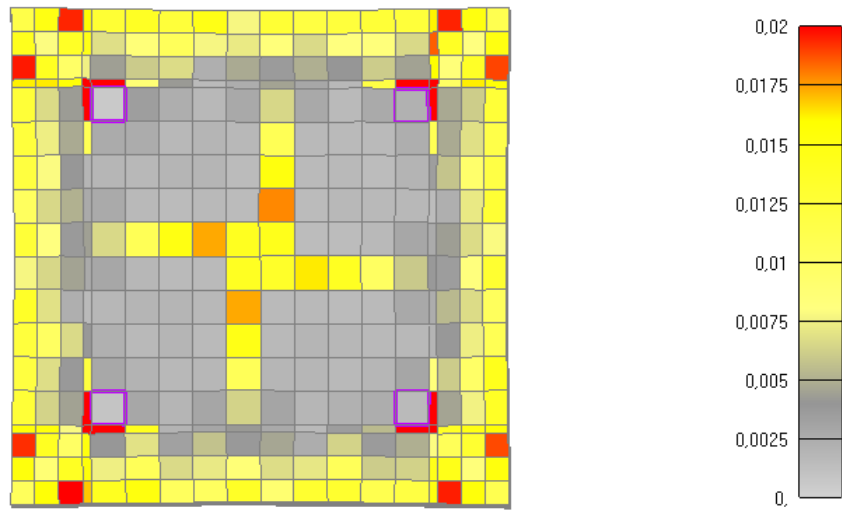
Slika 6.220: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta požara



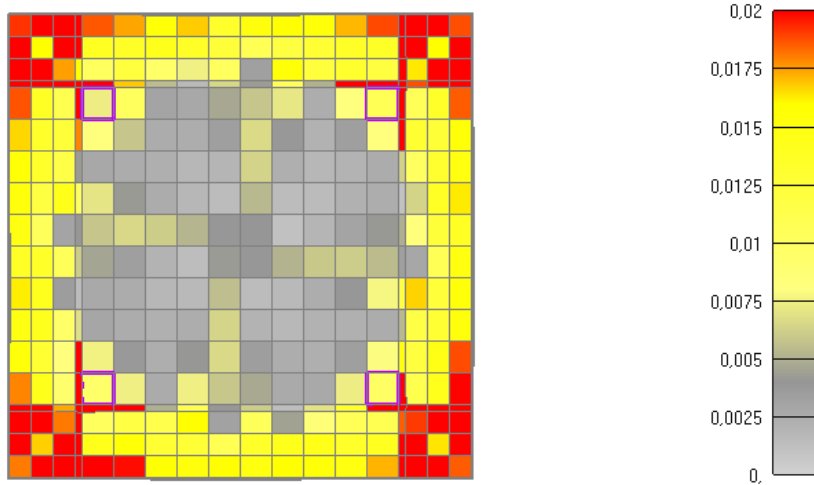
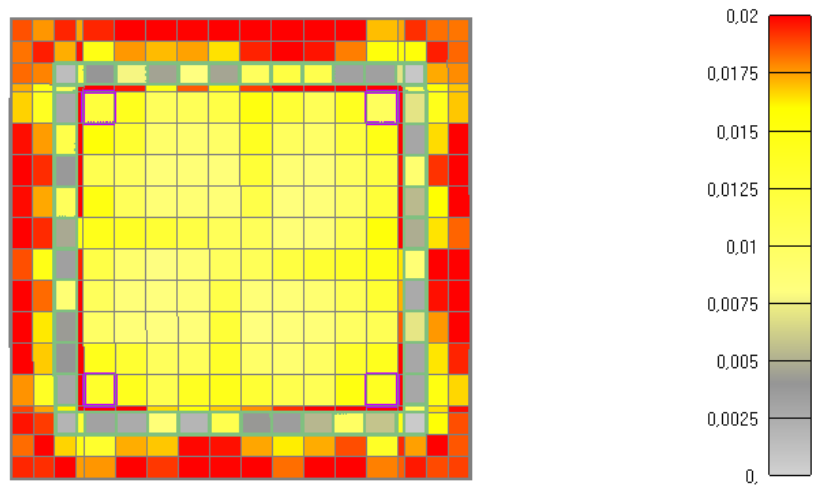
Slika 6.221: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 120 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLADENJA)



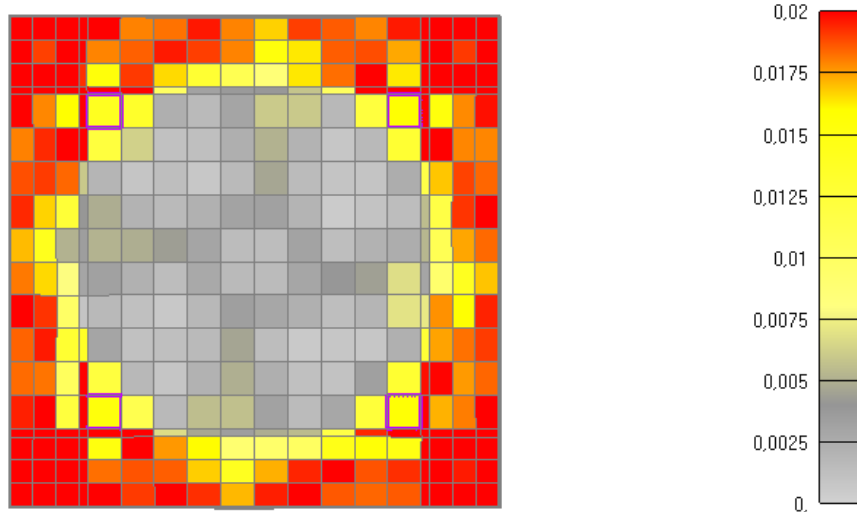
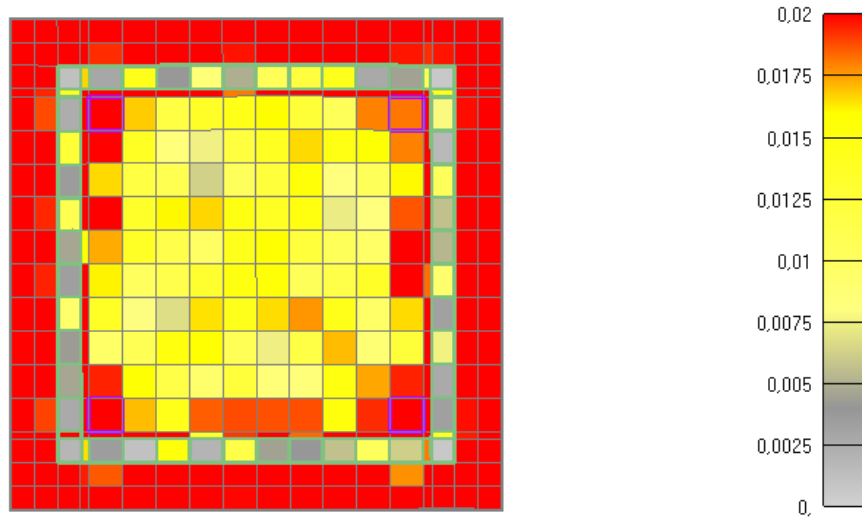
Slika 6.222: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 275 minuta požara (sa sponama)



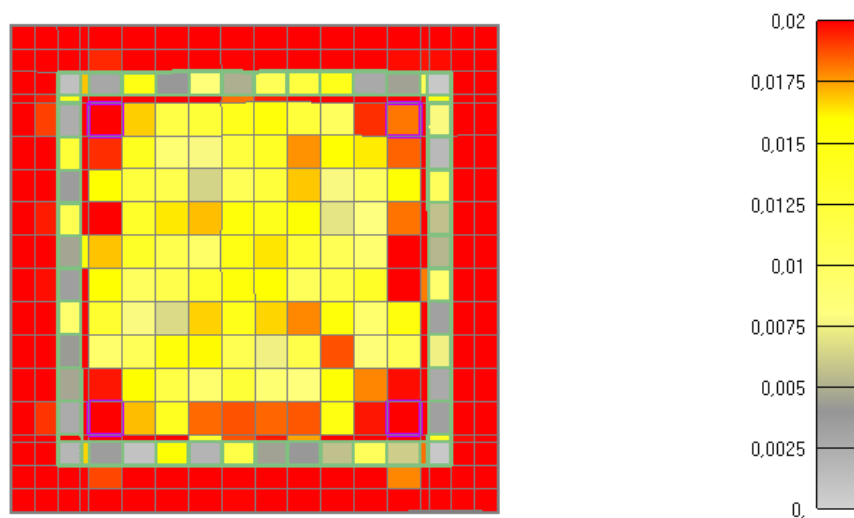
Slika 6.223: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 275 minuta požara  
(bez spona)



Slika 6.224: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 370 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona) -KRAJ LINEARNOG I POČETAK KONSTANTNOG  
HLADENJA

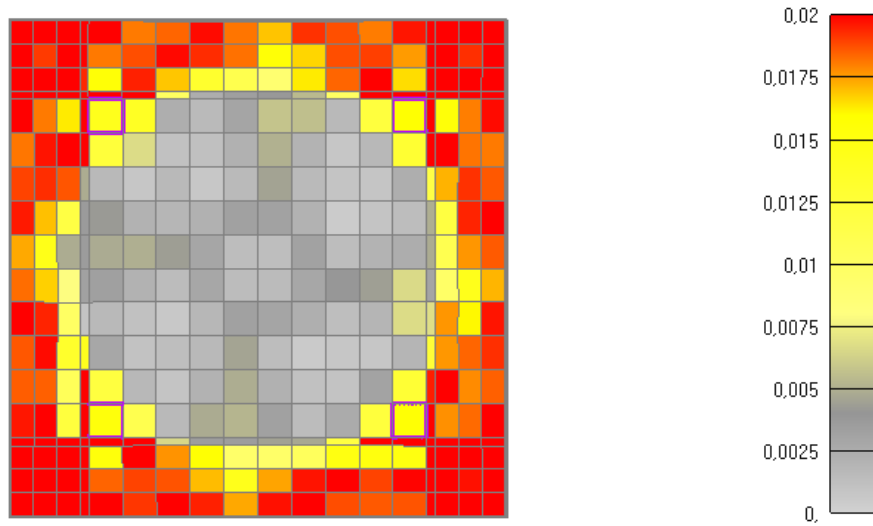


Slika 6.225: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1090 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)

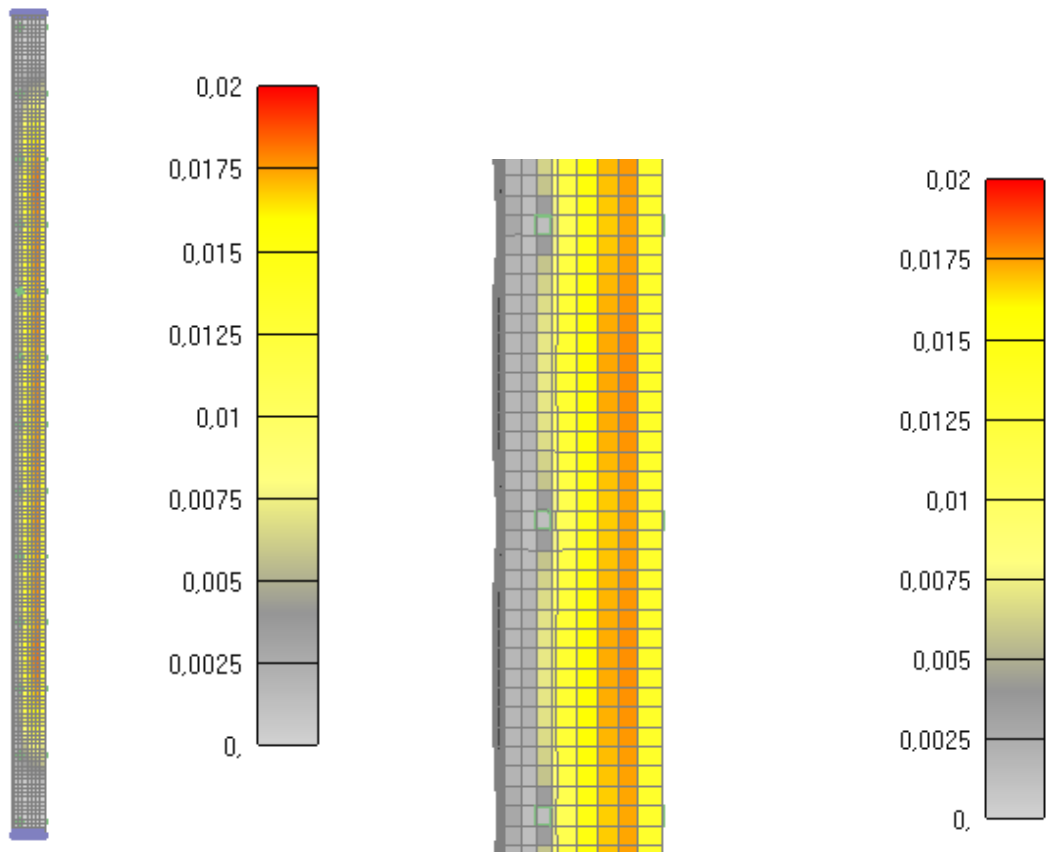


Slika 6.226: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1810 minuta  
(sa sponama)-KRAJ KONSTANTNOG HLADENJA

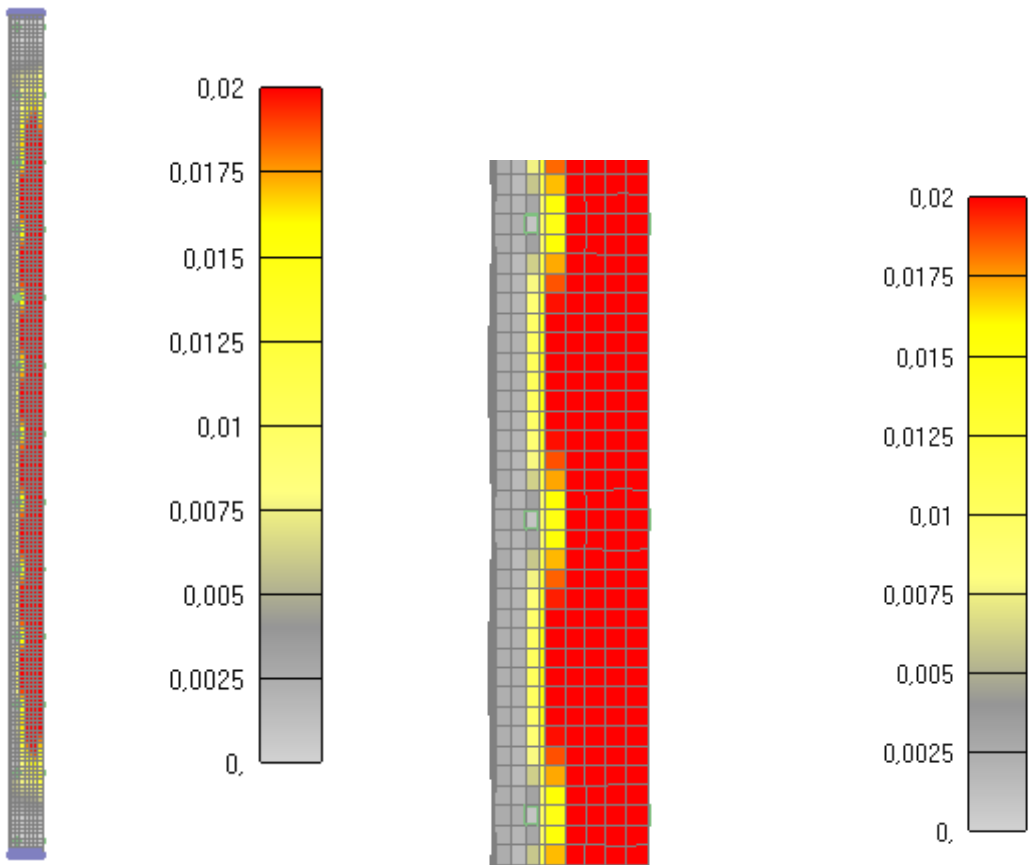




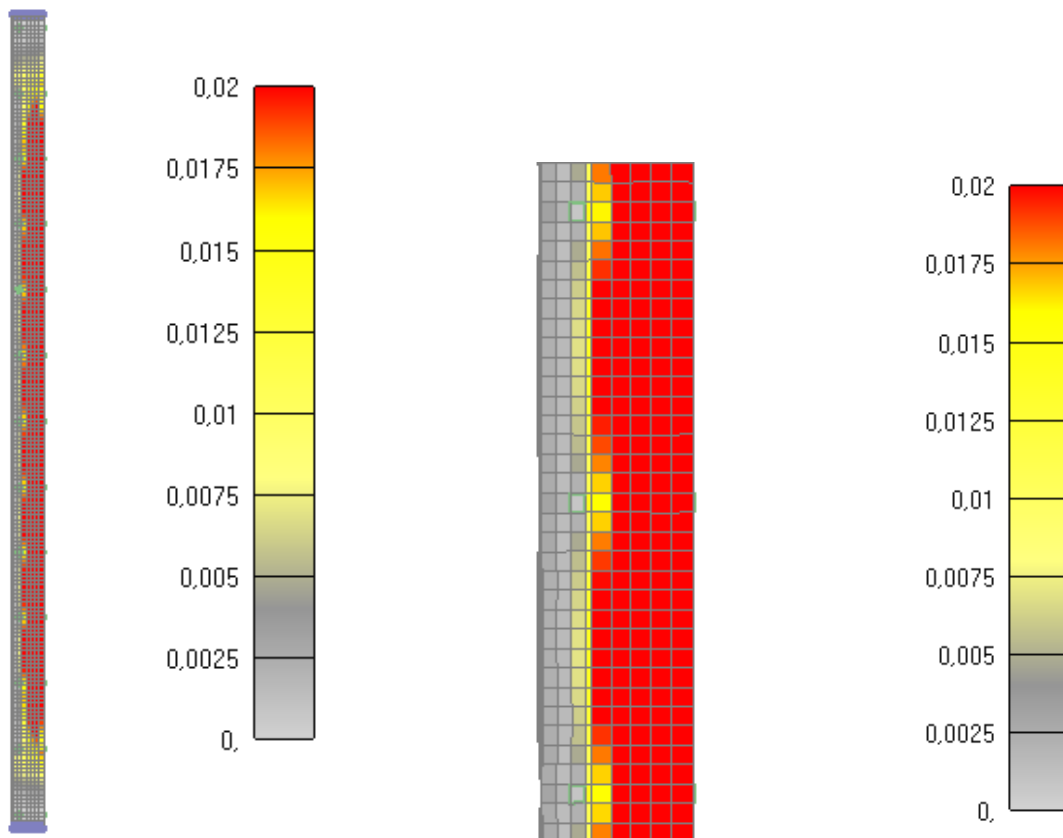
Slika 6.227: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 1810 minuta  
 (bez spona)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



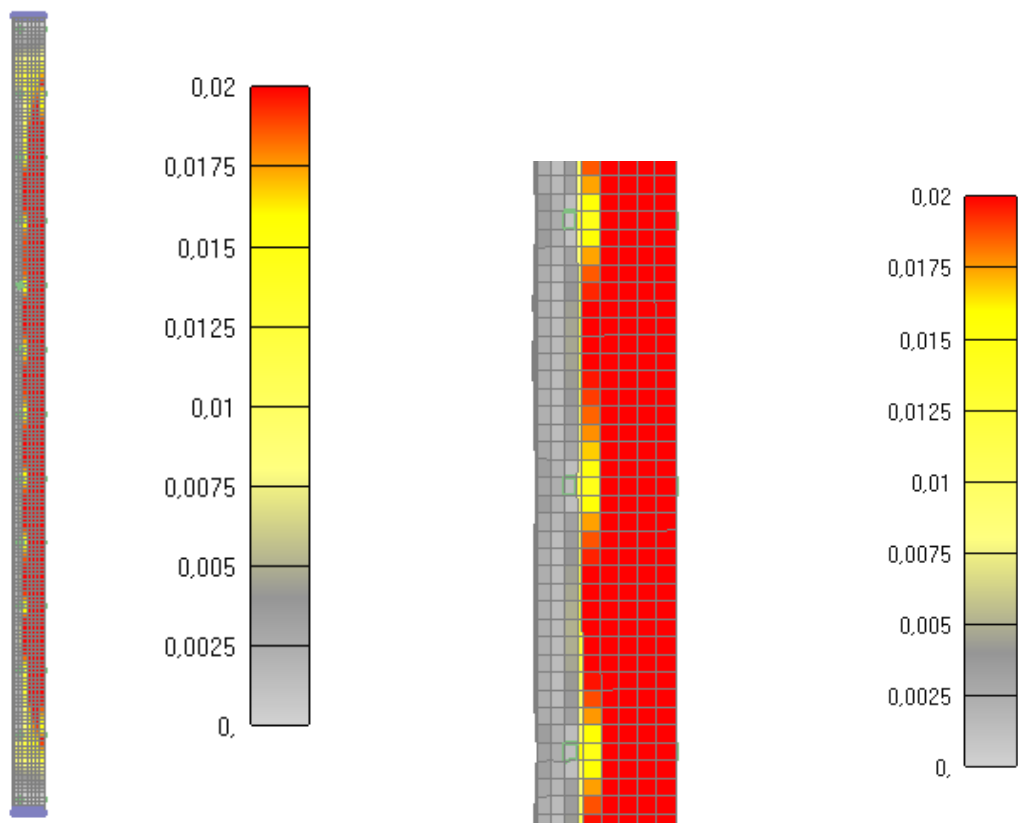
Slika 6.228: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



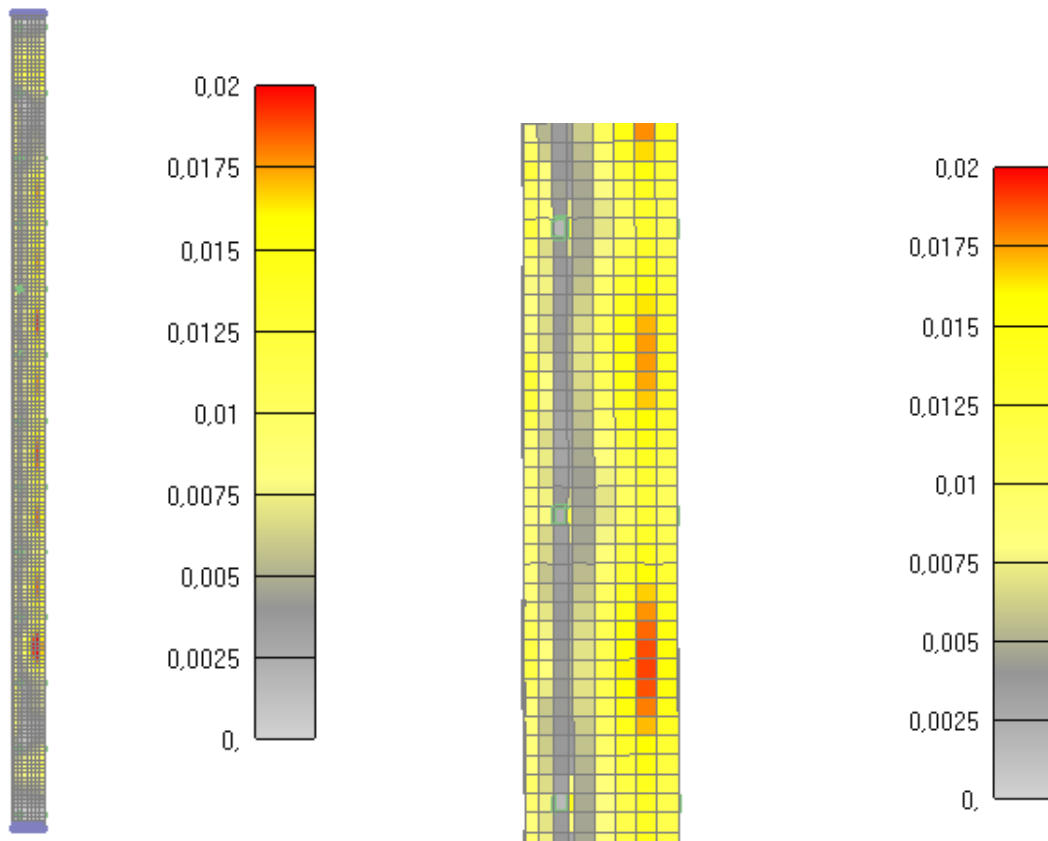
Slika 6.229: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



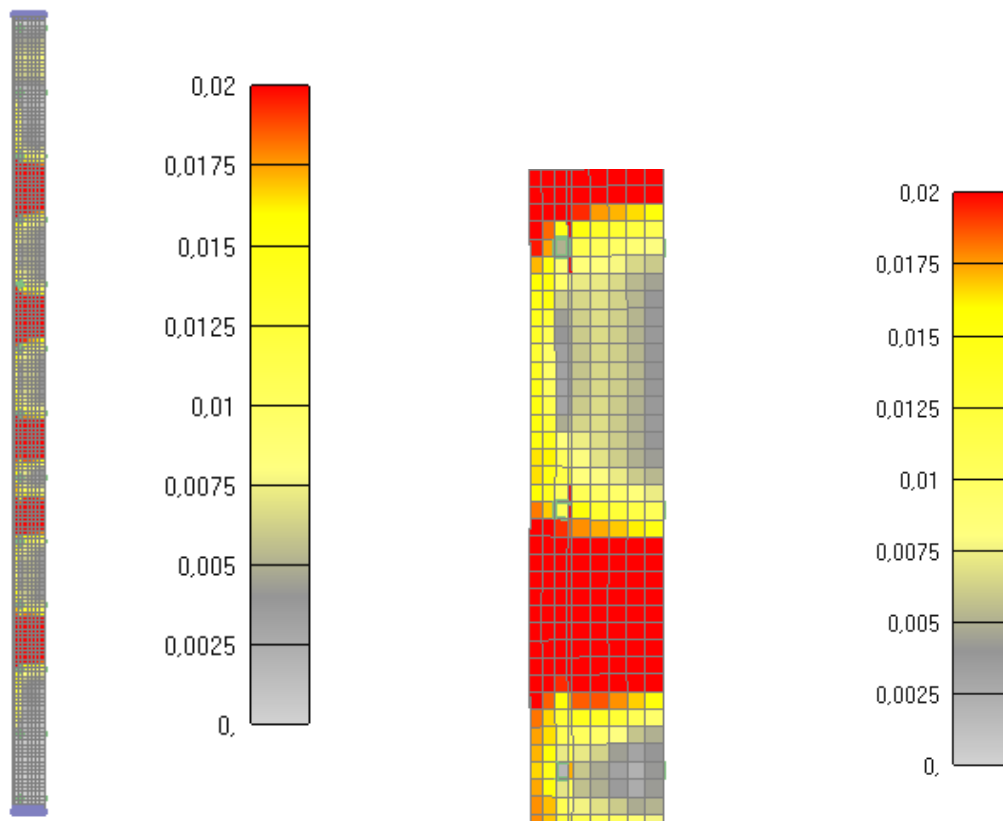
Slika 6.230: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



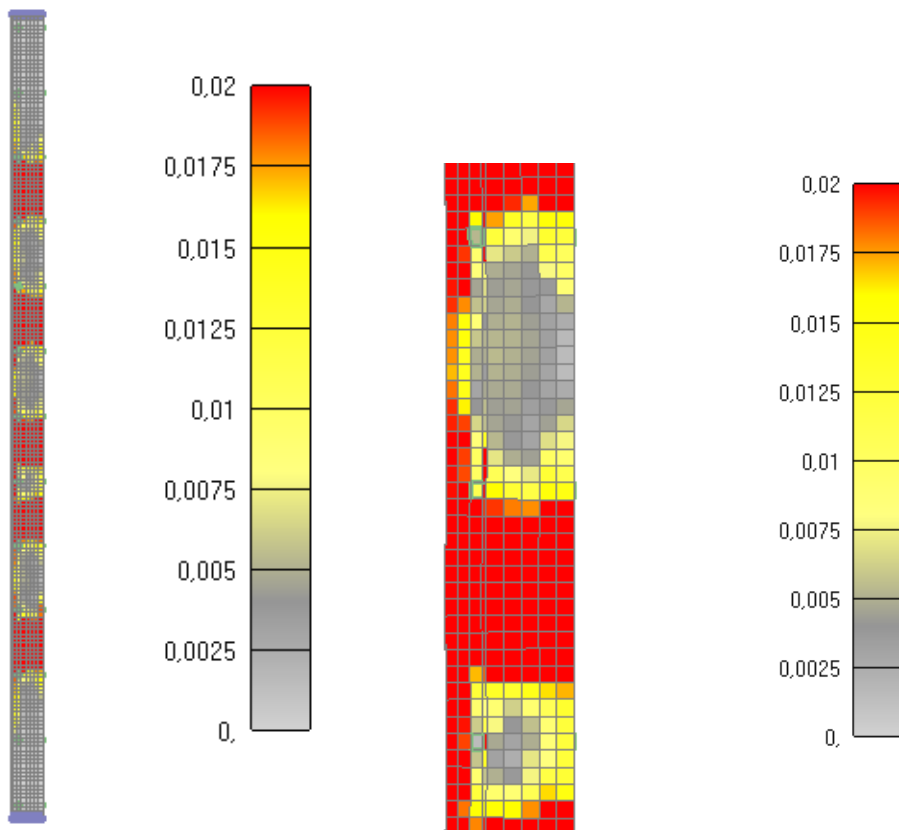
Slika 6.231: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 120 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA



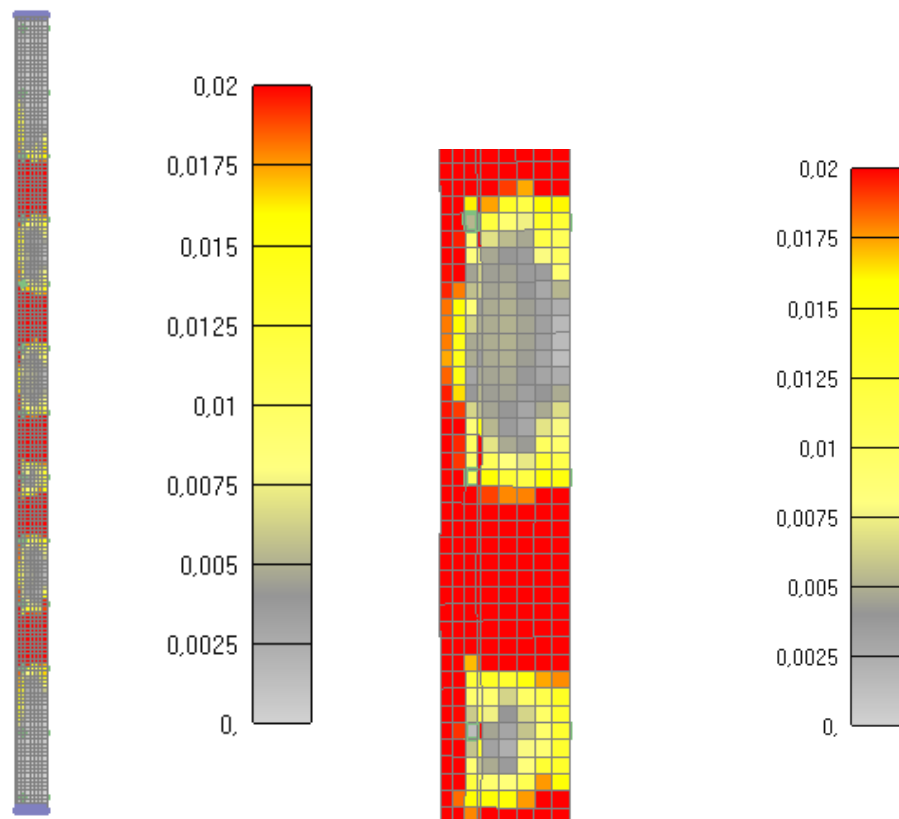
Slika 6.232: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 275 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



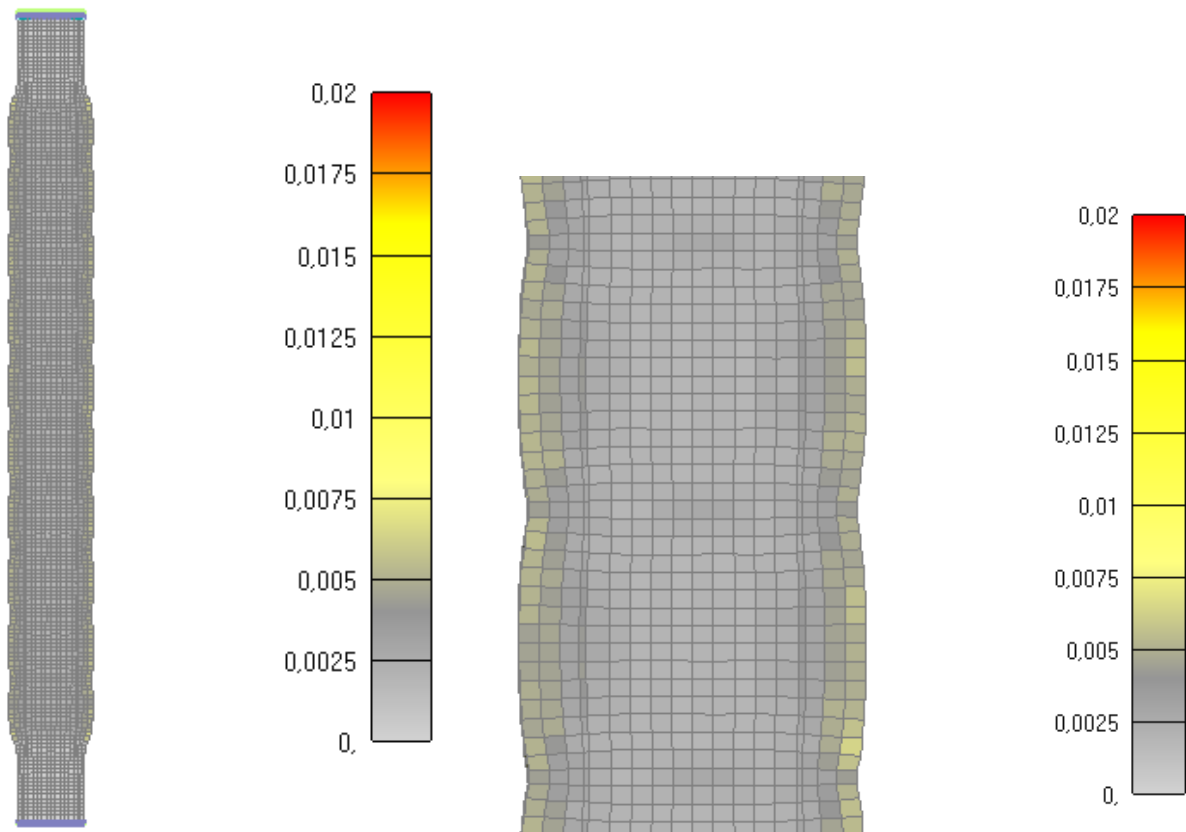
Slika 6.233: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 370 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA I POČETAK  
KONSTANTNOG HLAĐENJA



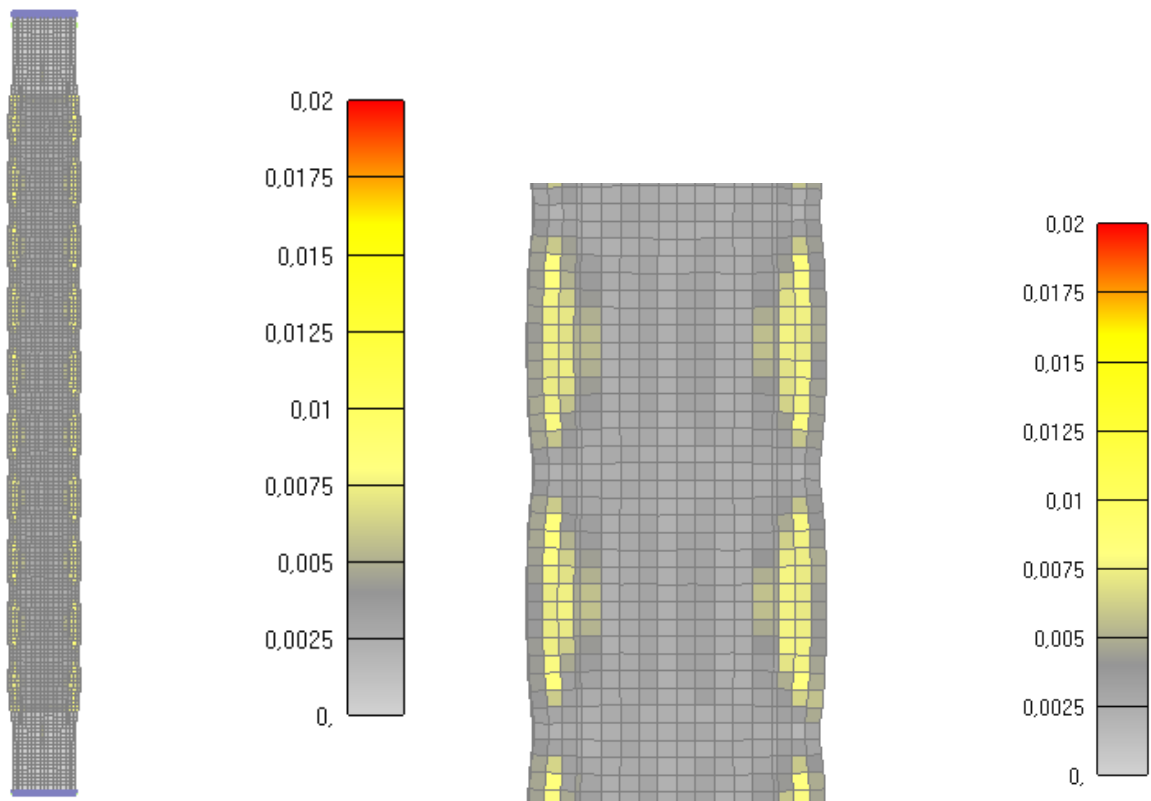
Slika 6.234: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1090 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



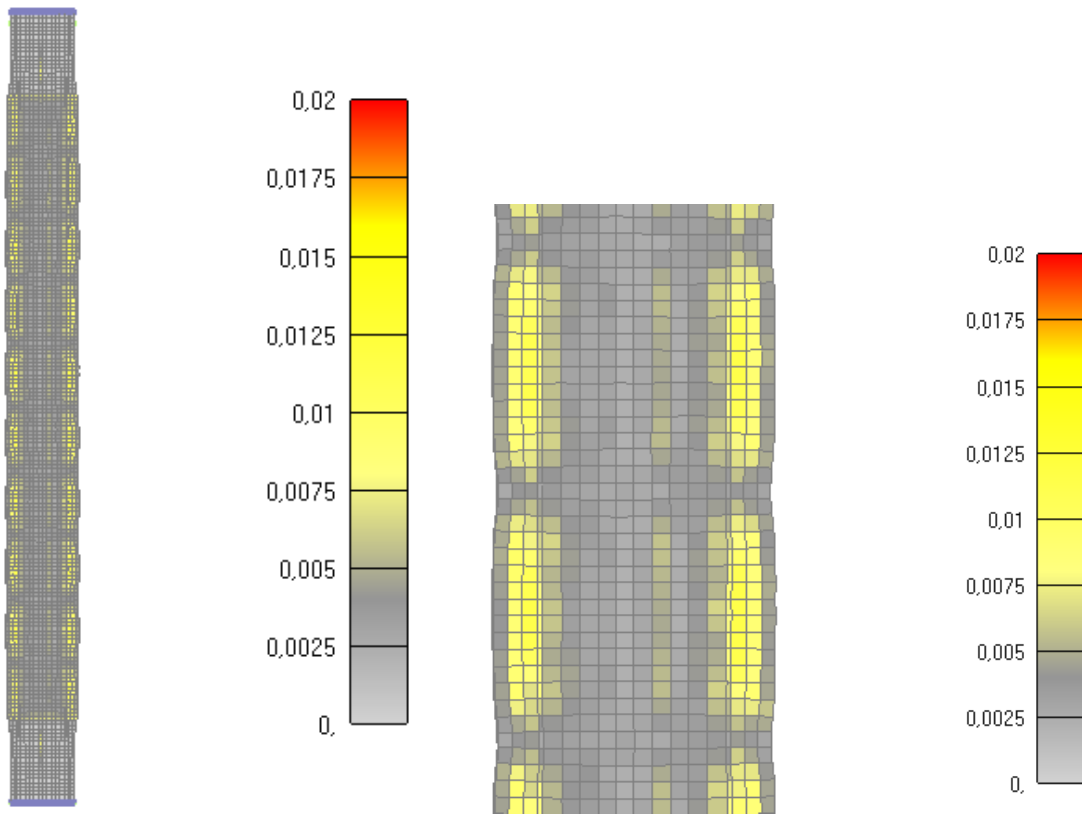
Slika 6.235: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 1810 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA



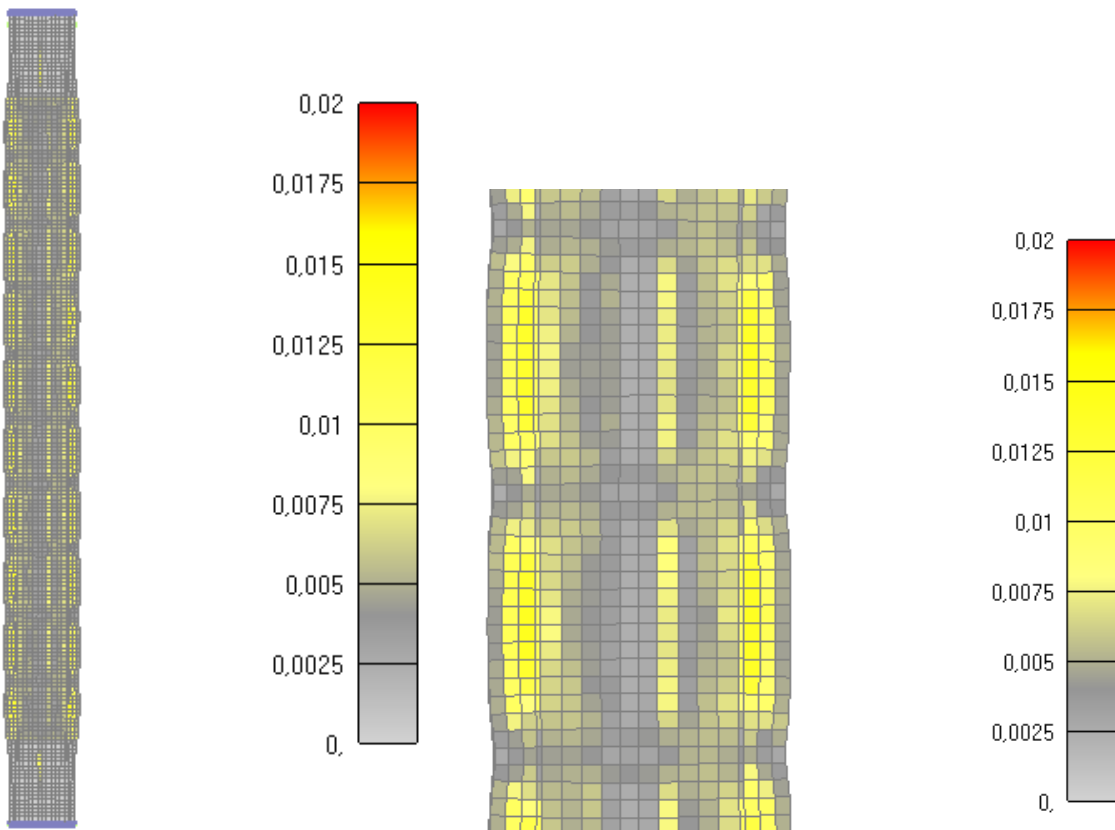
Slika 6.236: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



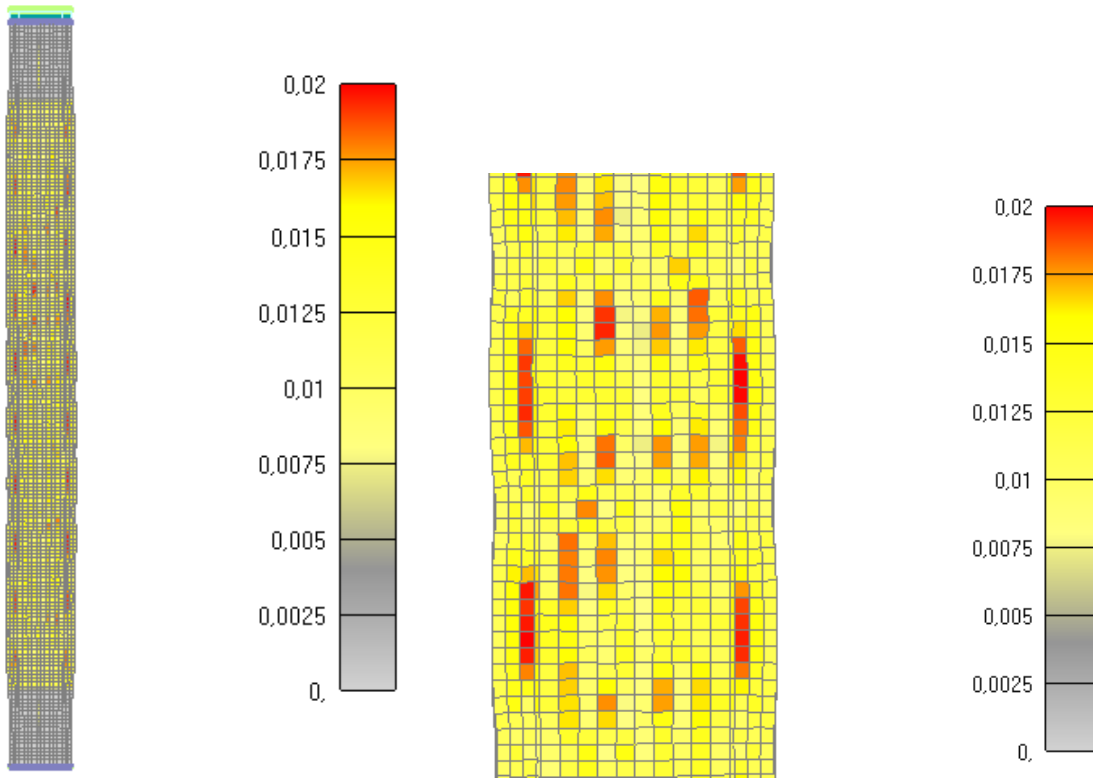
Slika 6.237: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



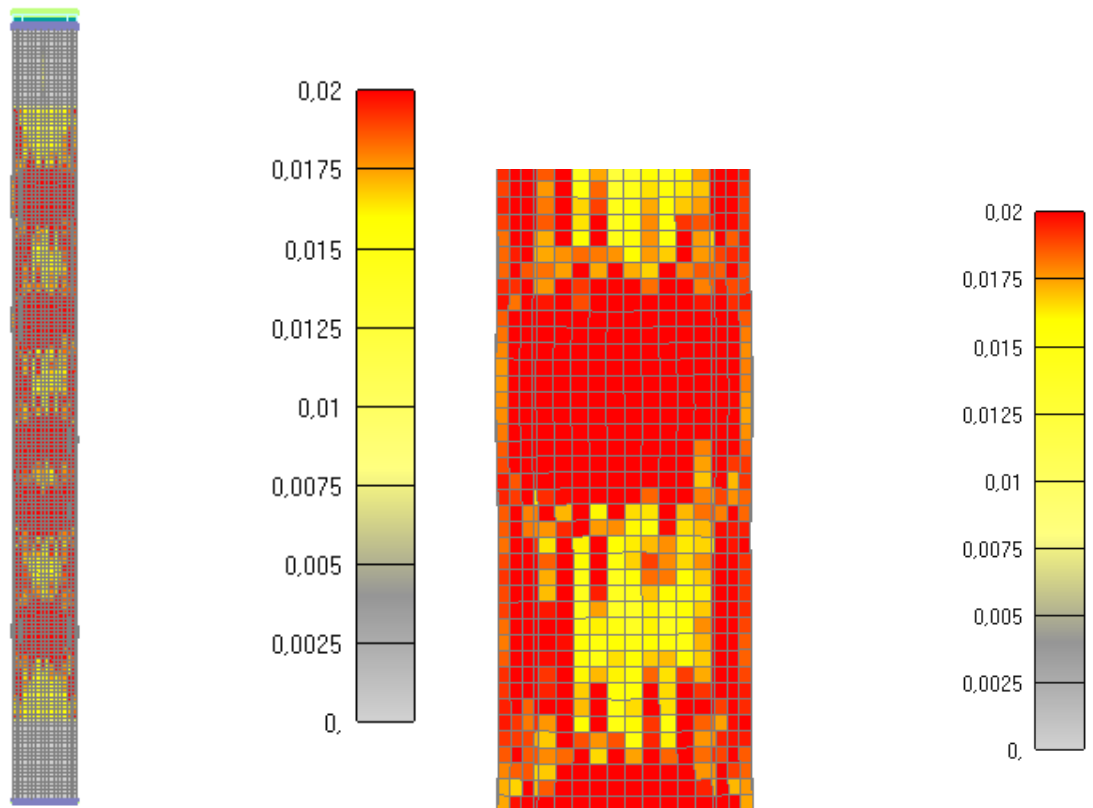
Slika 6.238: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



Slika 6.239: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 120 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA

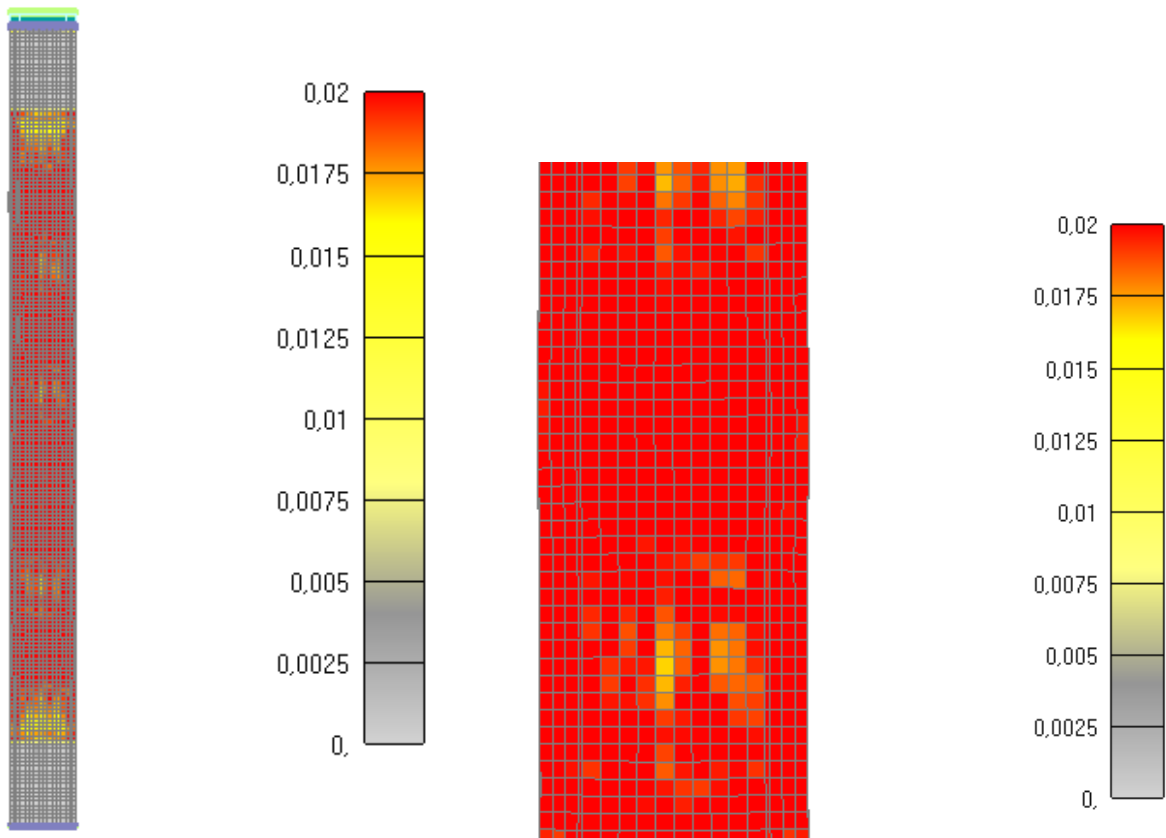


Slika 6.240: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 275 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)

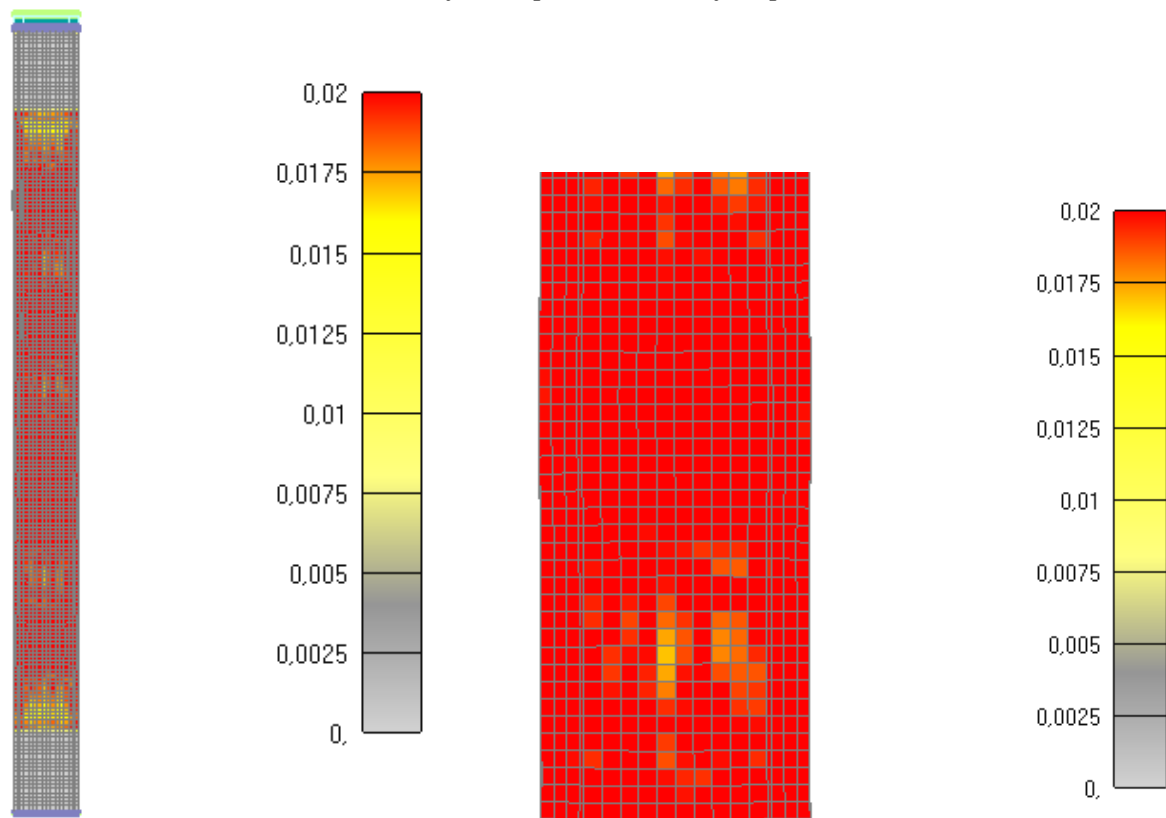


Slika 6.241: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 370 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ LINEARNOG HLAĐENJA  
I POČETAK KONSTANTNOG HLAĐENJA





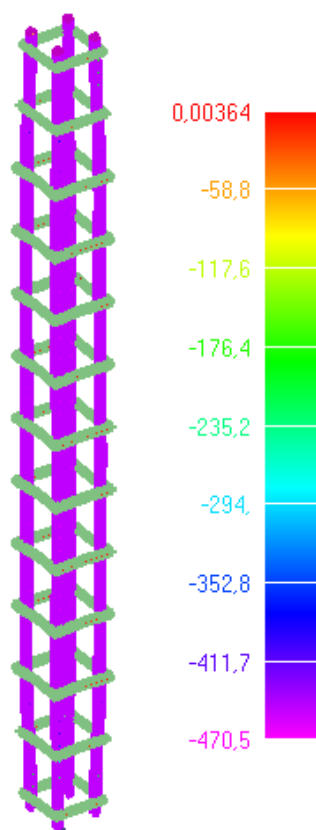
Slika 6.242: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1090 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



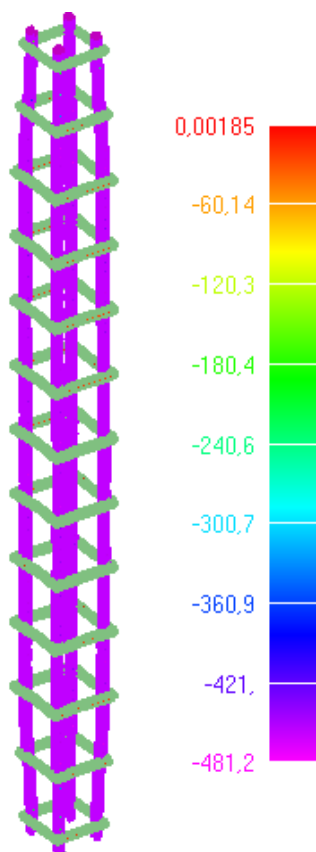
Slika 6.243: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 1810 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)-KRAJ KONSTANTNOG HLAĐENJA

### **6.2.3.9. 7.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 35% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)**

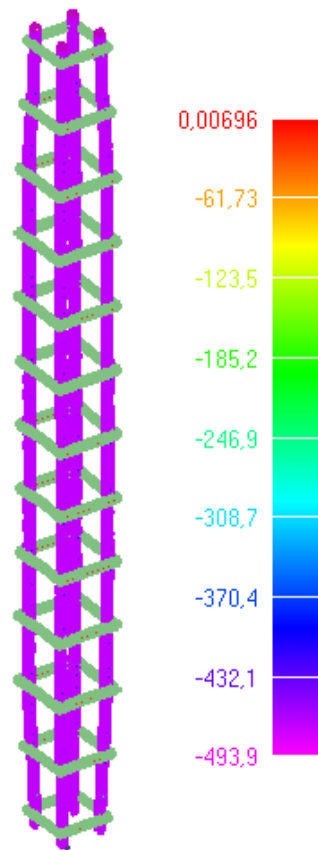
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu) te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 120 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna o iznosu sile tako da će se taj dijagram prikazati na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta.



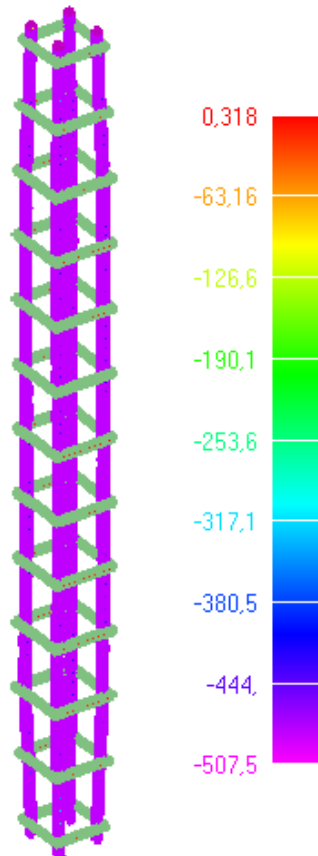
Slika 6.244: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



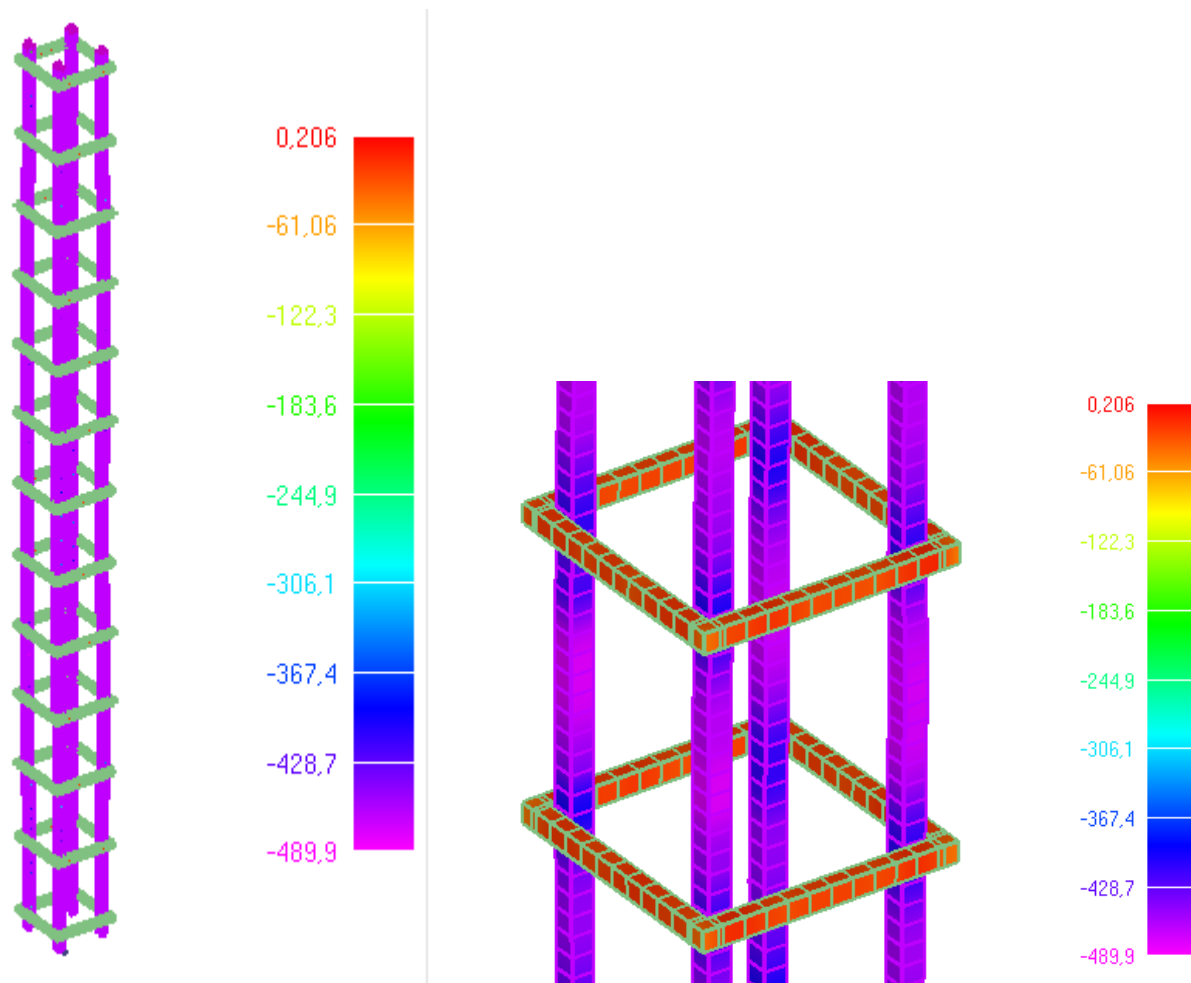
Slika 6.245: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min



Slika 6.246: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min

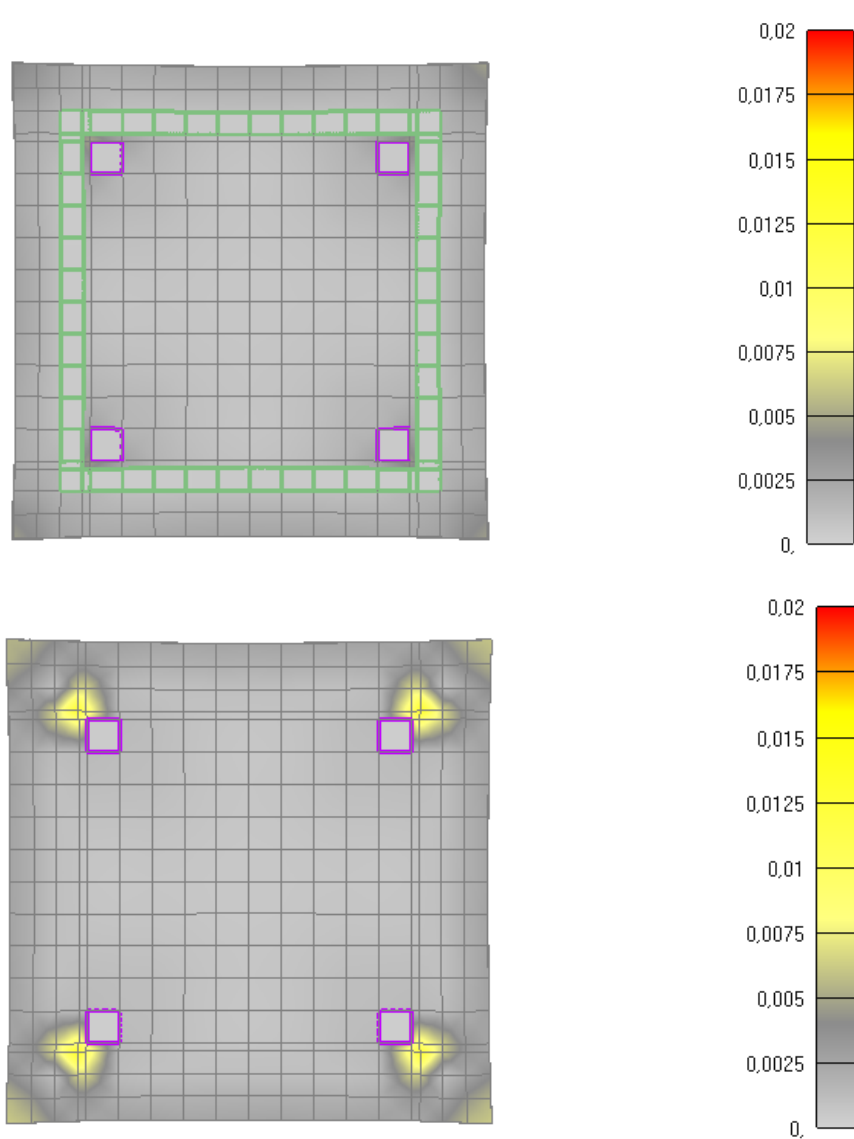


Slika 6.247: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 120min  
 KRAJ ZAGRIVAVANJA I POČETAK HLAĐENJA (NAKON OVOG  
 TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)

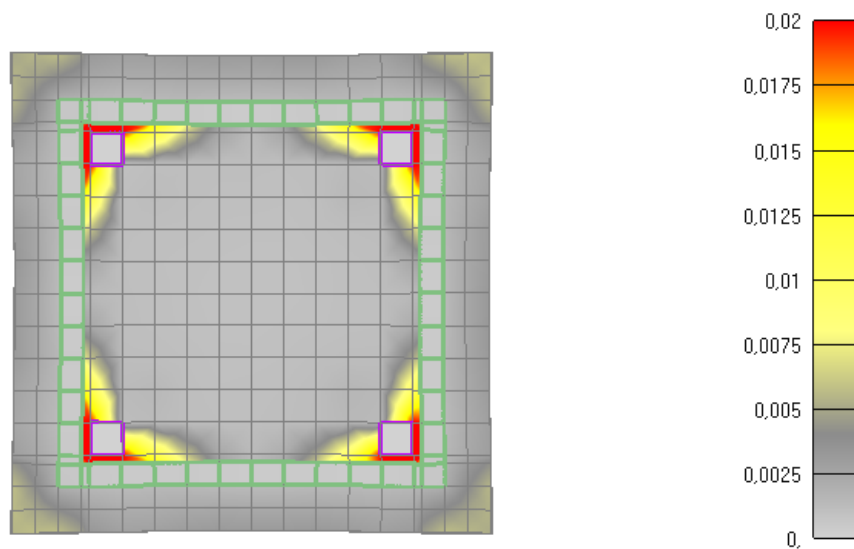


Slika 6.248: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

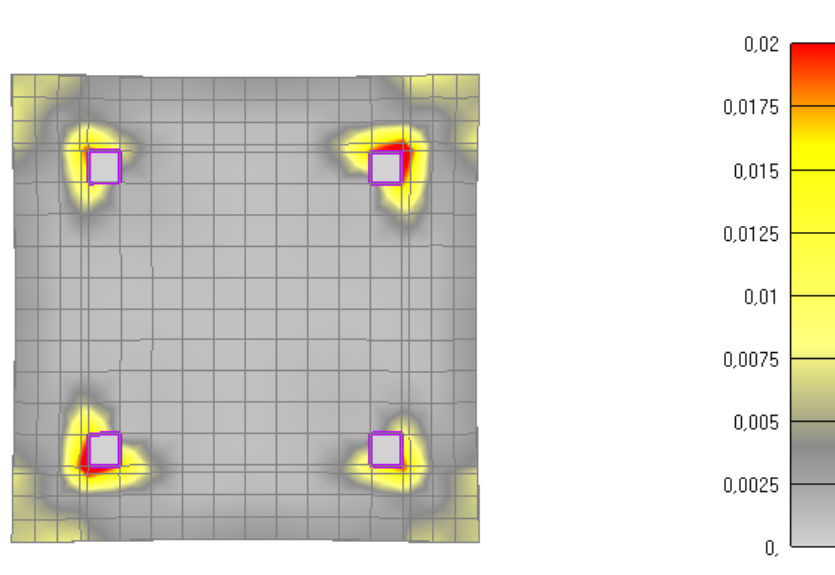
**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.



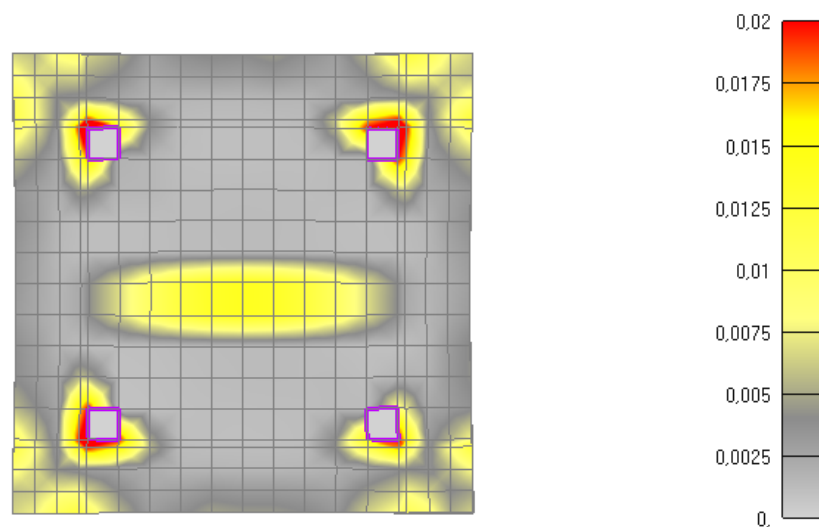
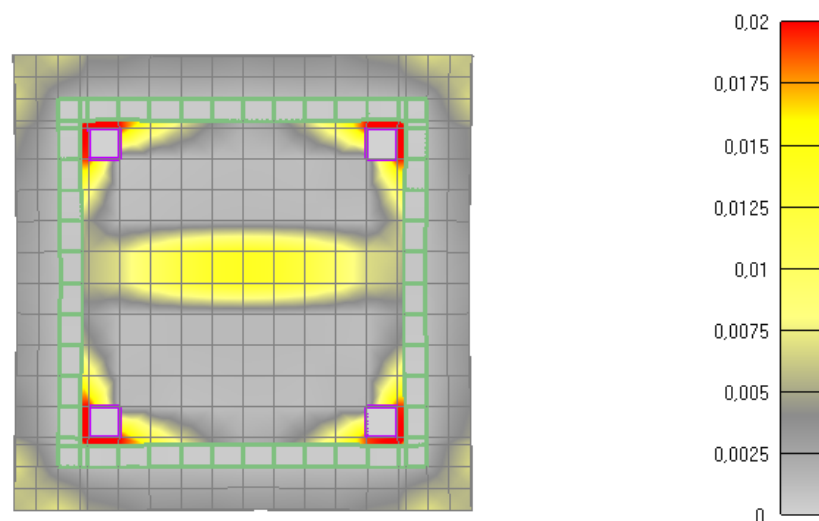
Slika 6.249: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



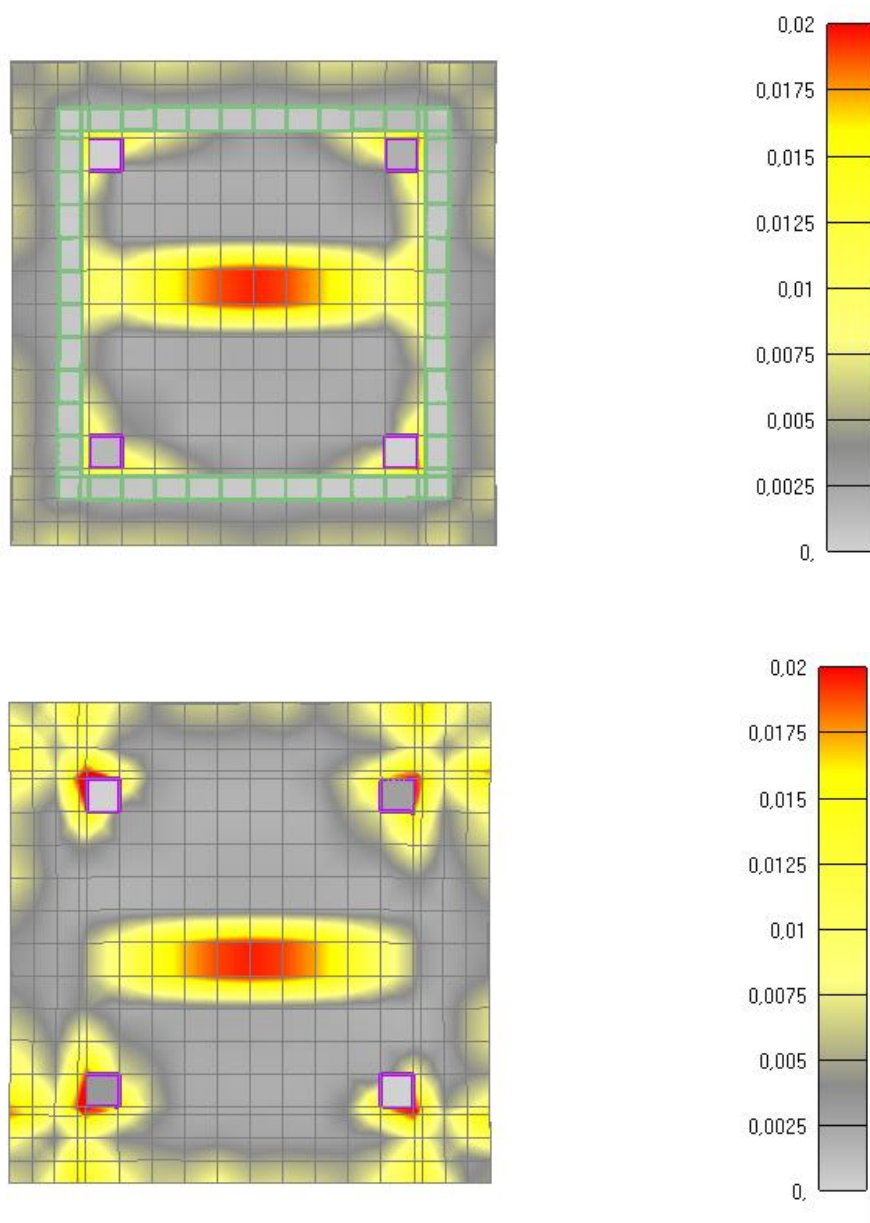
Slika 6.250: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)



Slika 6.251: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara (bez spona)

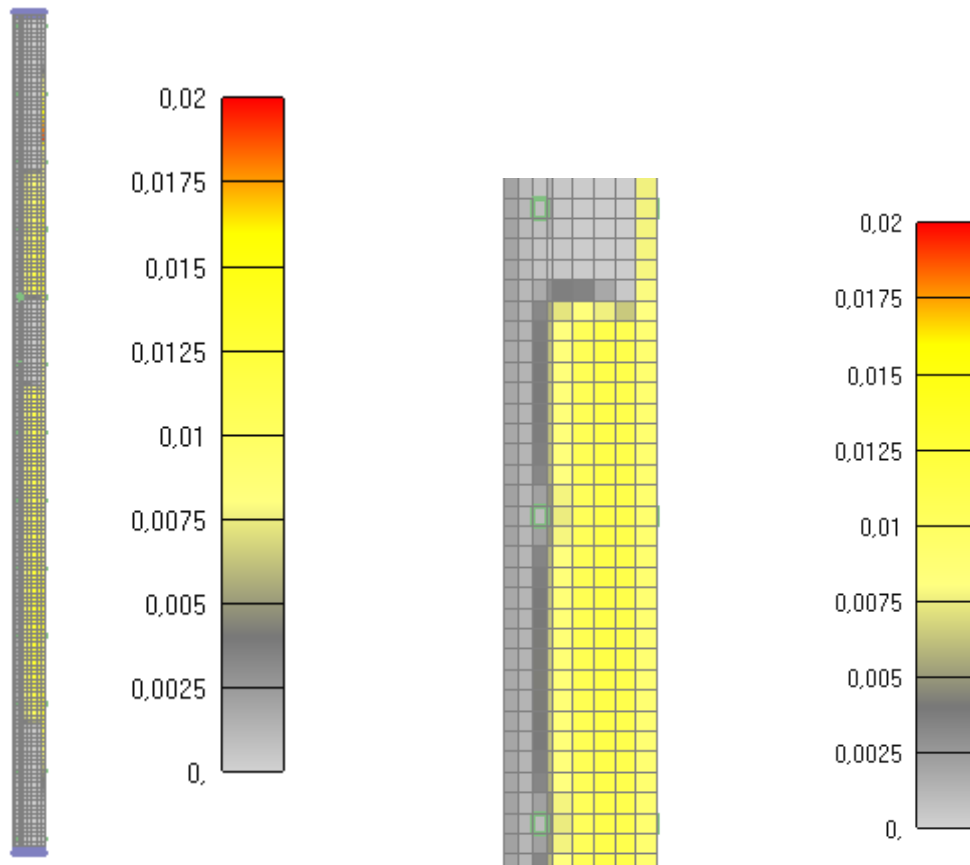


Slika 6.252: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta (gore-sa sponama, dolje-bez spona)

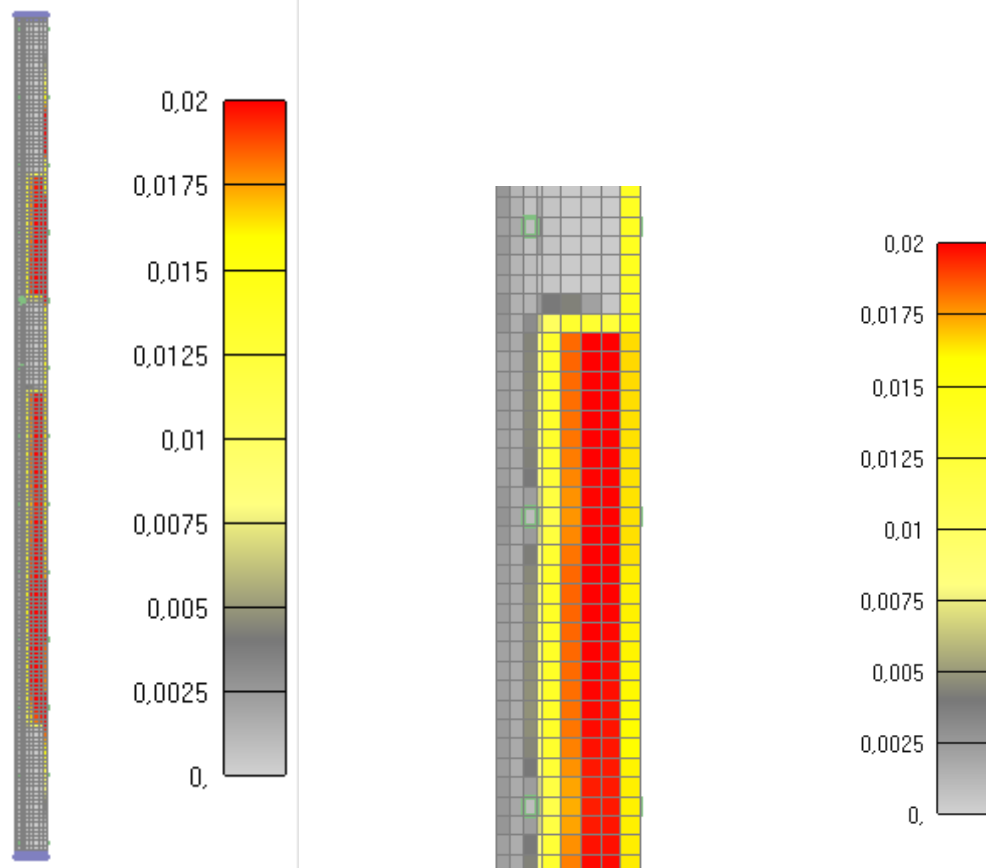


Slika 6.253: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 120 minuta požara (gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA) (NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)

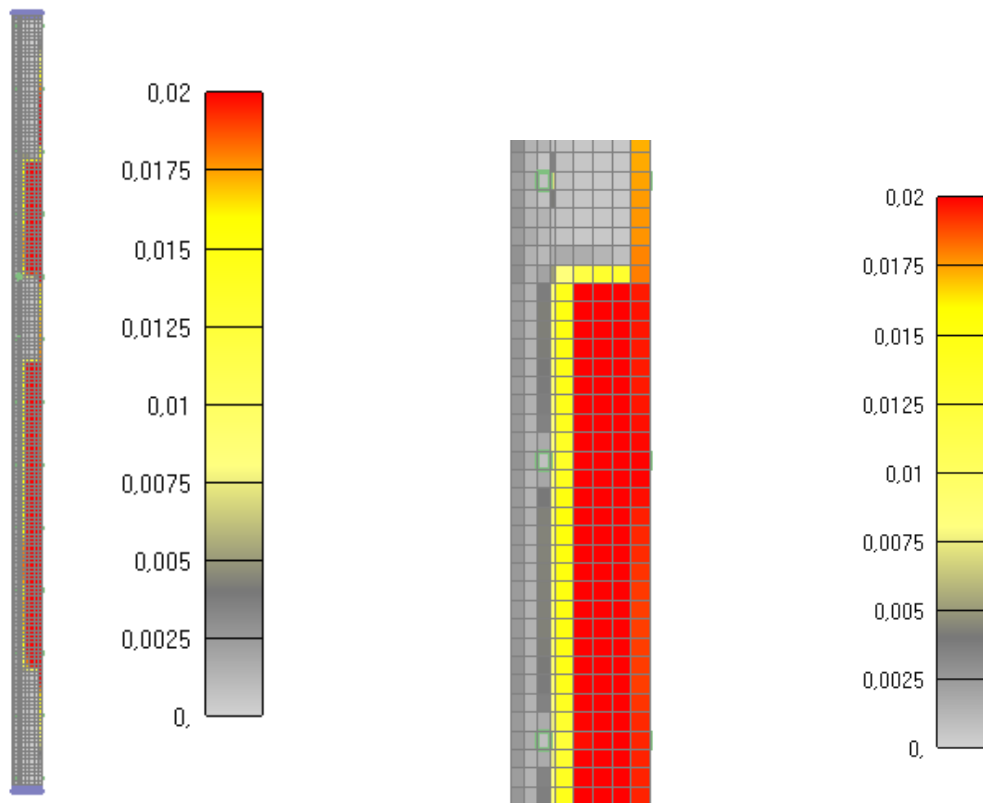




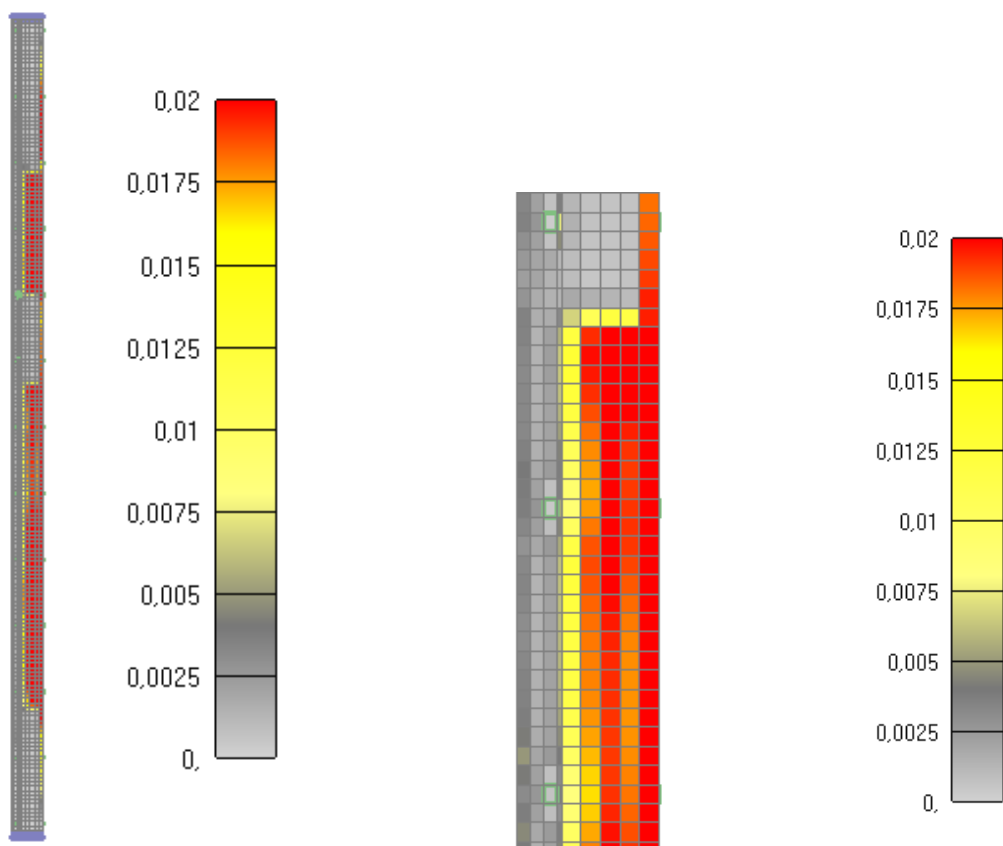
Slika 6.254: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



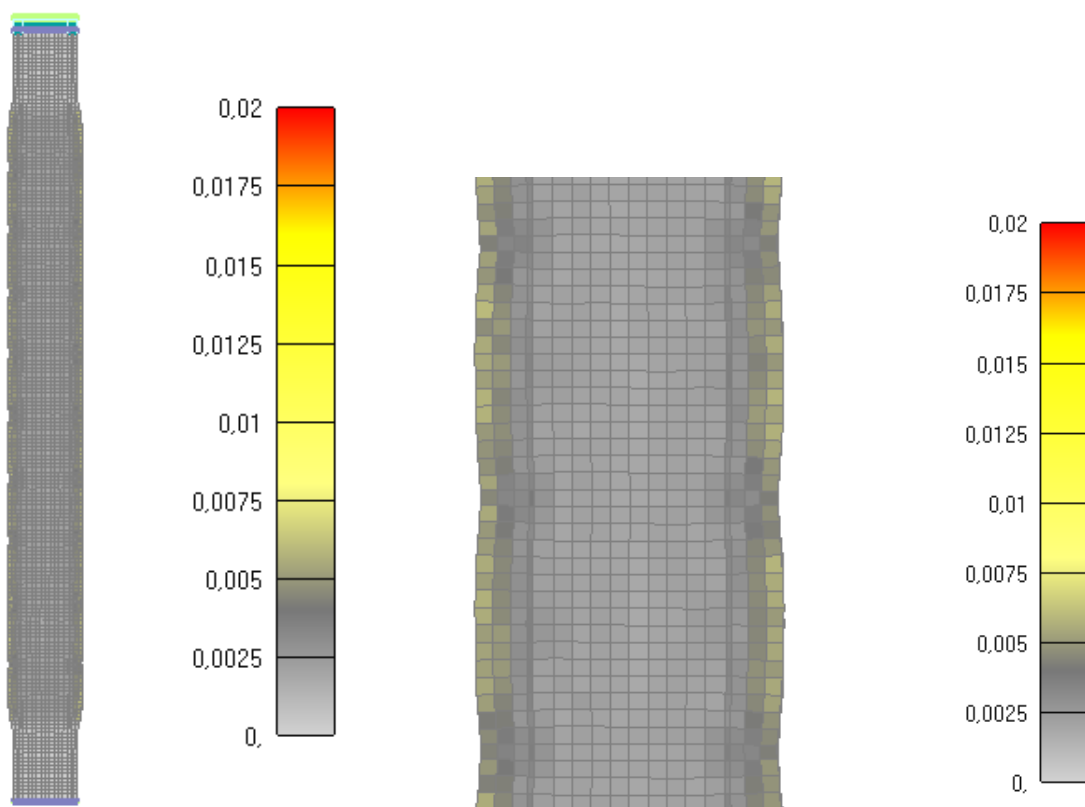
Slika 6.255: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



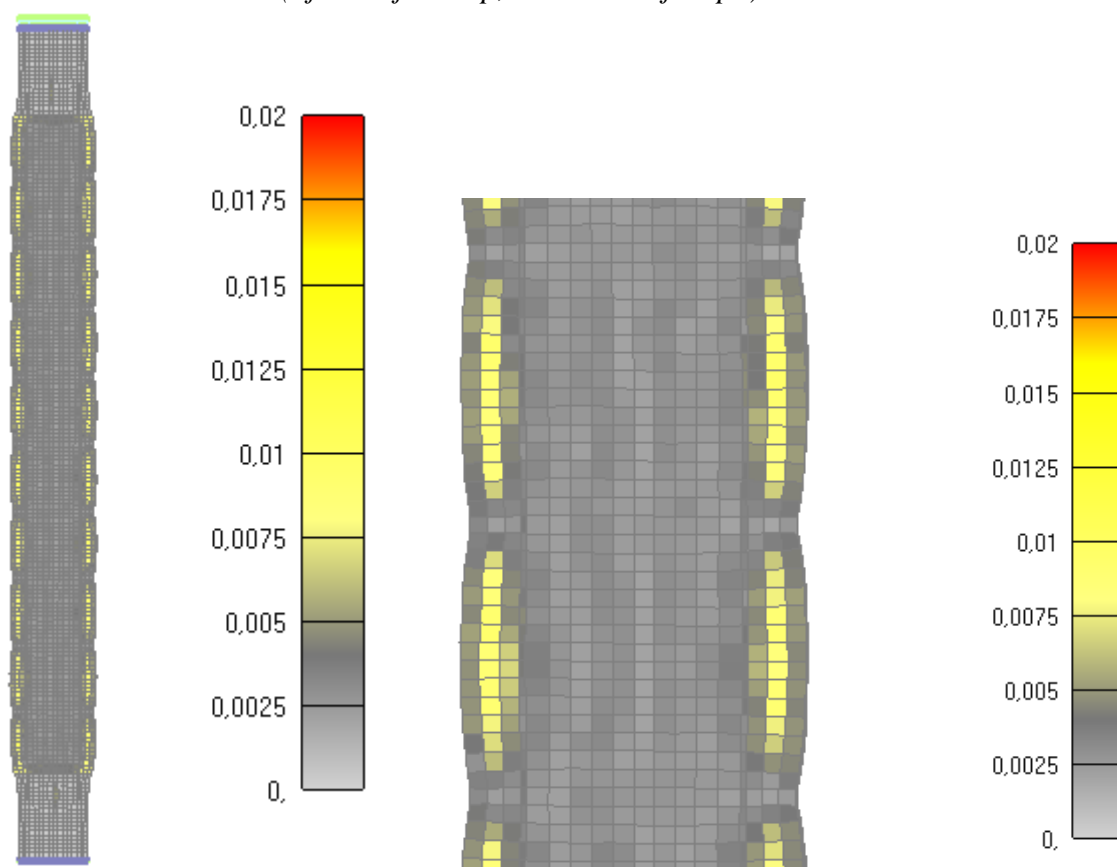
Slika 6.256: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



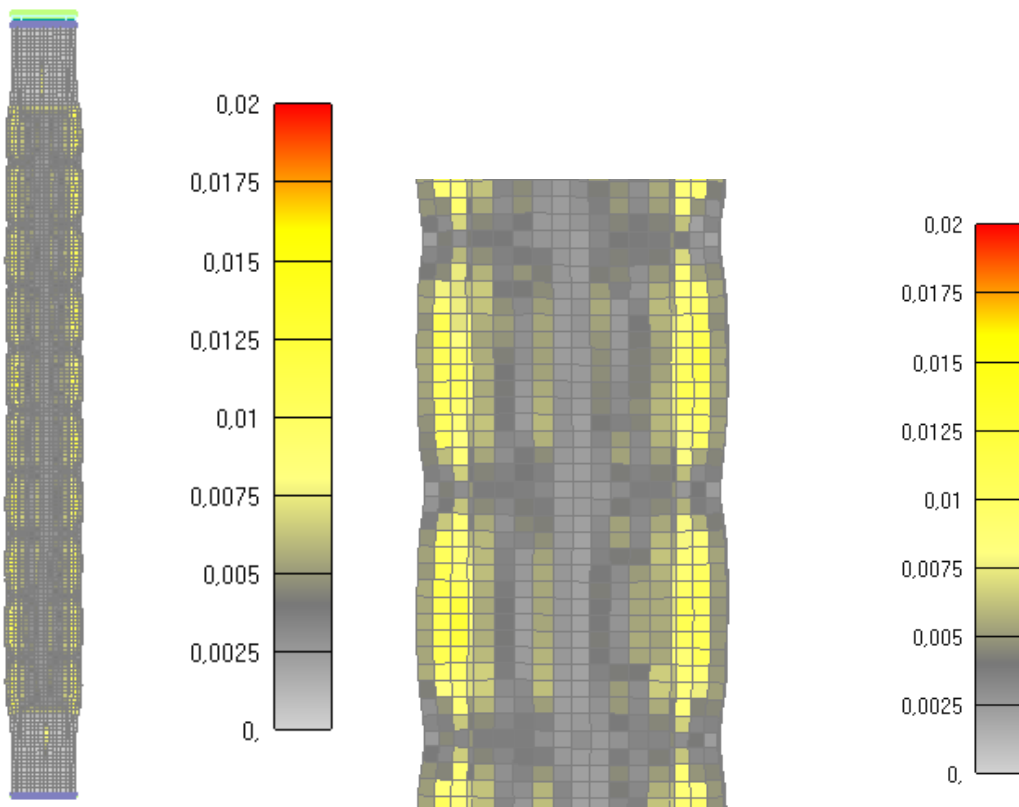
Slika 6.257: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 120 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA  
(NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)



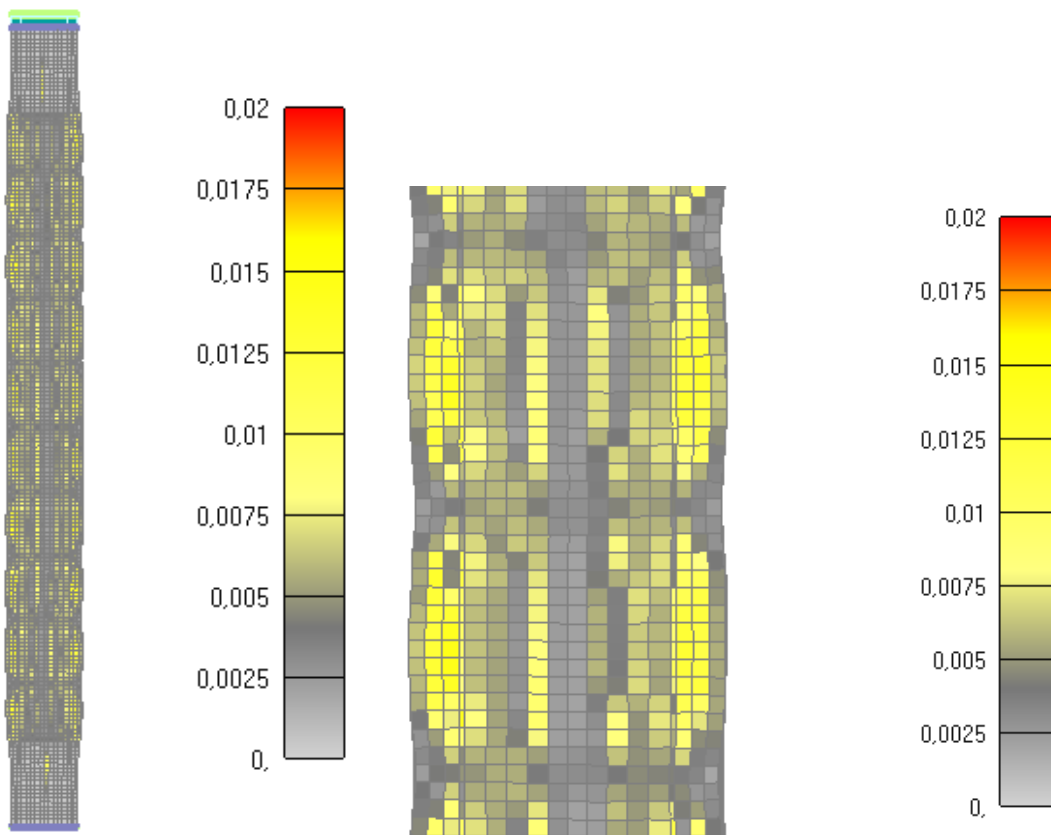
Slika 6.258: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.259: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



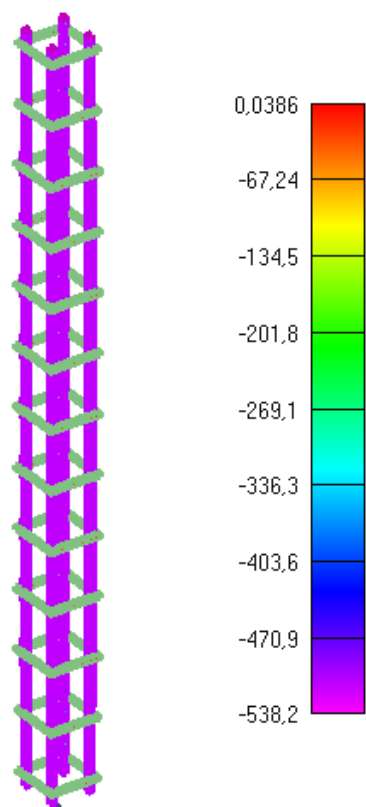
Slika 6.260: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



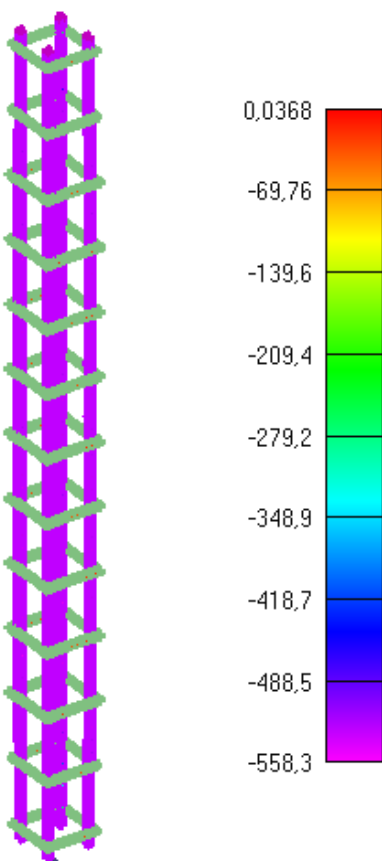
Slika 6.261: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 120 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA  
 (NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)

### **6.2.3.10. 8.KOMBINACIJA (IZNOS SILE 50% INICIJALNE NOSIVOSTI STUPA I VRIJEME DJELOVANJA POŽARA OD 120 minuta)**

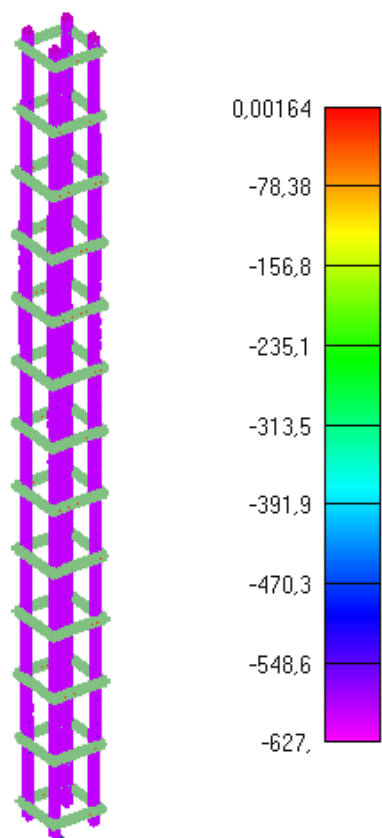
U ovom poglavlju će se prikazati samo pojavljivanje pukotina u stupu kako odmiče požar (u poprečnom presjeku stupa, jednoj četvrtini stupa i cijelom stupu) te tečenje armature kroz vrijeme djelovanja požara. Dijagrame pomaka kroz vrijeme i povećanje iznosa sile do sloma stupa će se prikazati naknadno u sljedećem poglavlju za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta i sve će ih se skupa usporediti. To su konkretno 3 kombinacije sa djelovanjem iznosa sile od 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti stupa za požar od 120 minuta. Distribucija temperature u stupu je neovisna o iznosu sile tako da će se taj dijagram prikazati na kraju jednom za sve kombinacije u kojima požar traje 120 minuta.



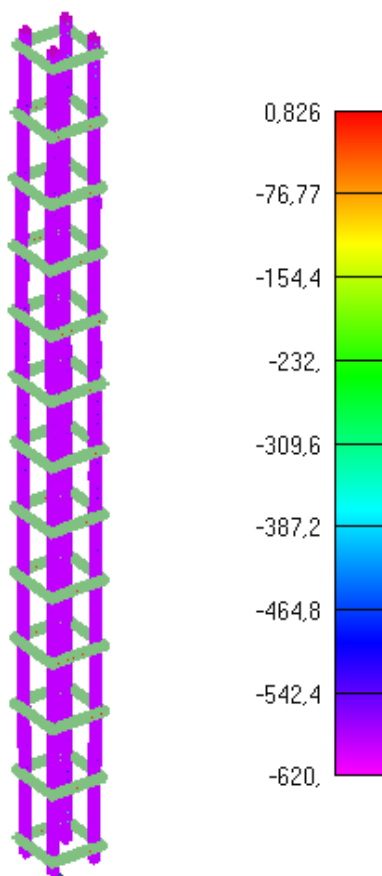
Slika 6.262: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 30min



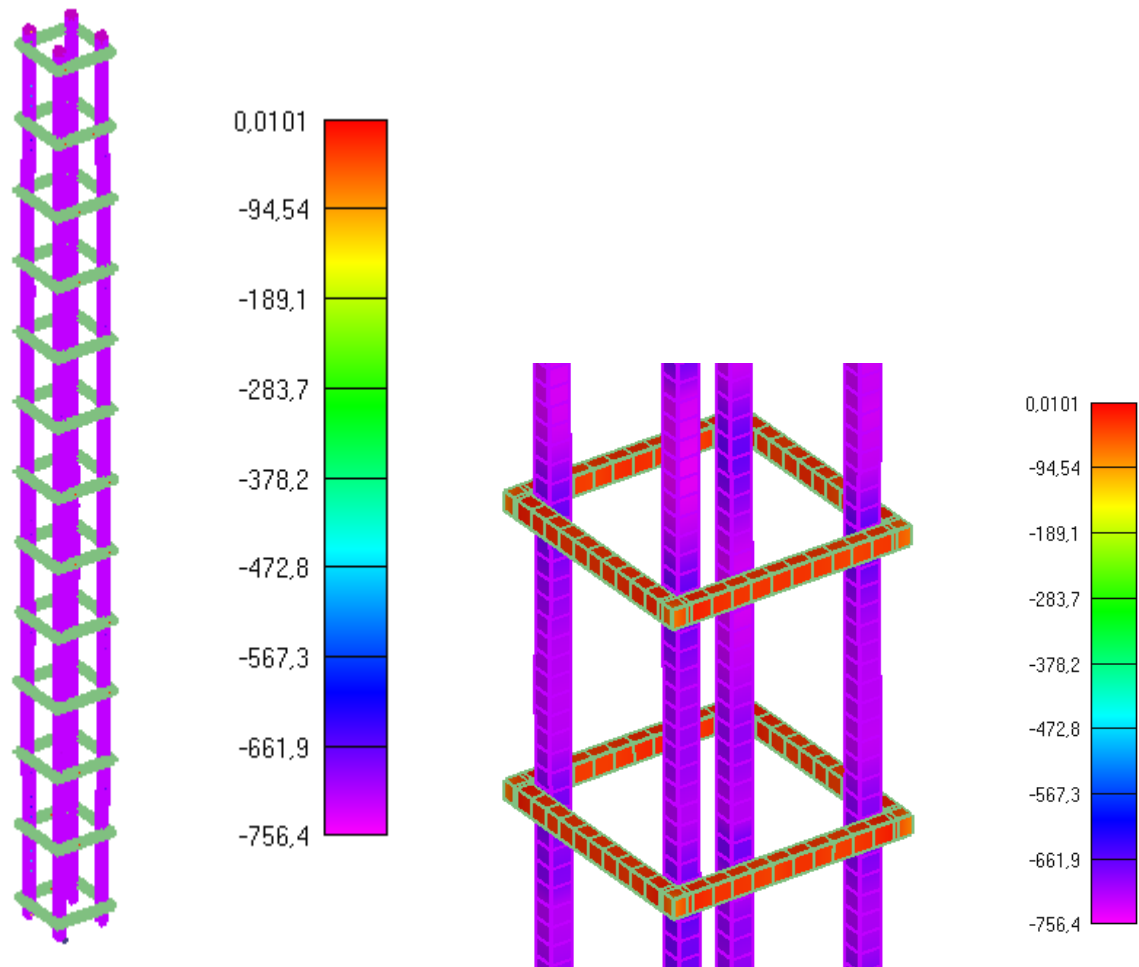
Slika 6.263: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 60min



Slika 6.264: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 90min



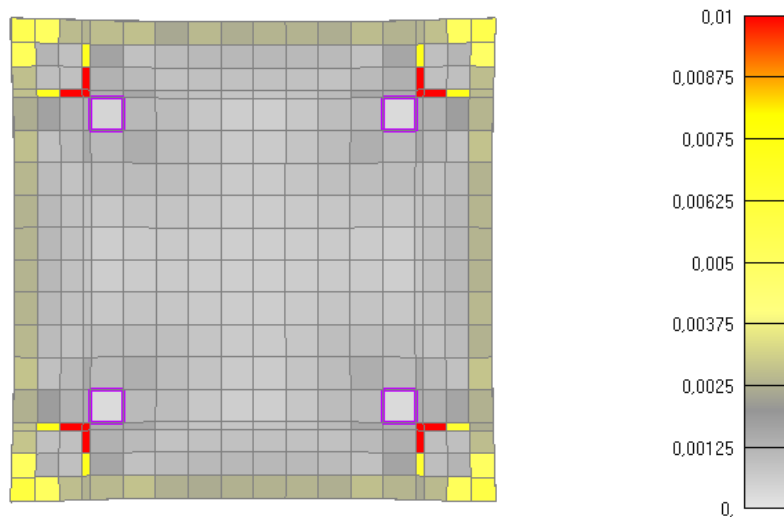
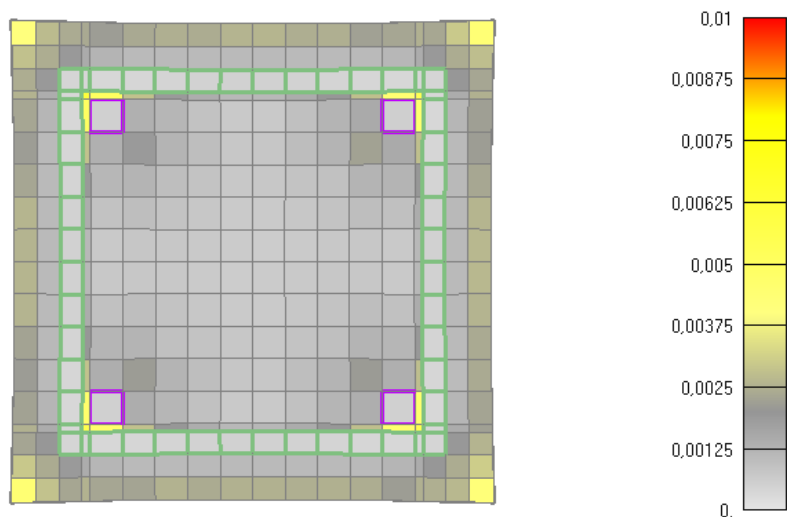
Slika 6.265: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature za djelovanje požara od 120min  
*KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLAĐENJA (NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)*



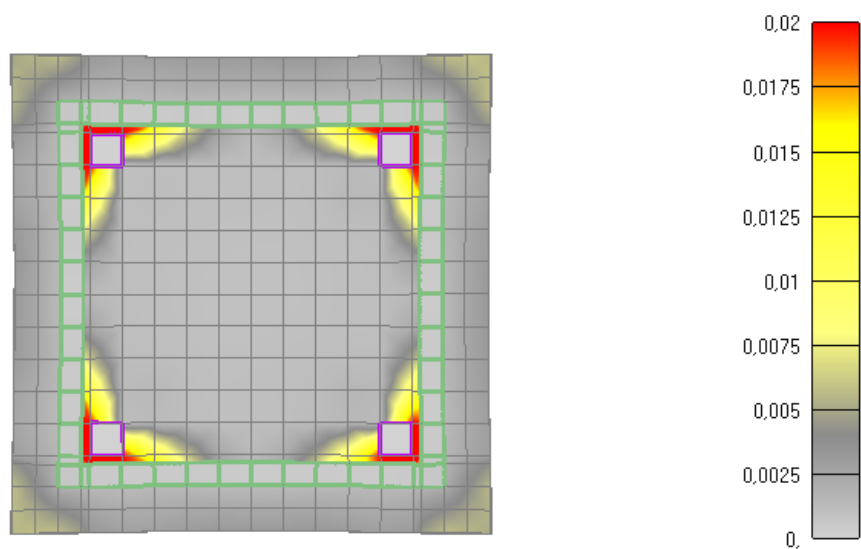
Slika 6.266: Prikaz naprezanja glavne uzdužne armature i spona u trenutku popuštanja stupa (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)

**NAPOMENA:** Prikazani iznosi naprezanja na legendama nisu stvarni iznosi nego skalirani iznosi. Skalirani su zbog toga što mreža u programskom modelu nije imala iste dimenzije kao i pojedini elementi u stvarnosti i onda su karakteristike materijala shodno tomu promijenjene.

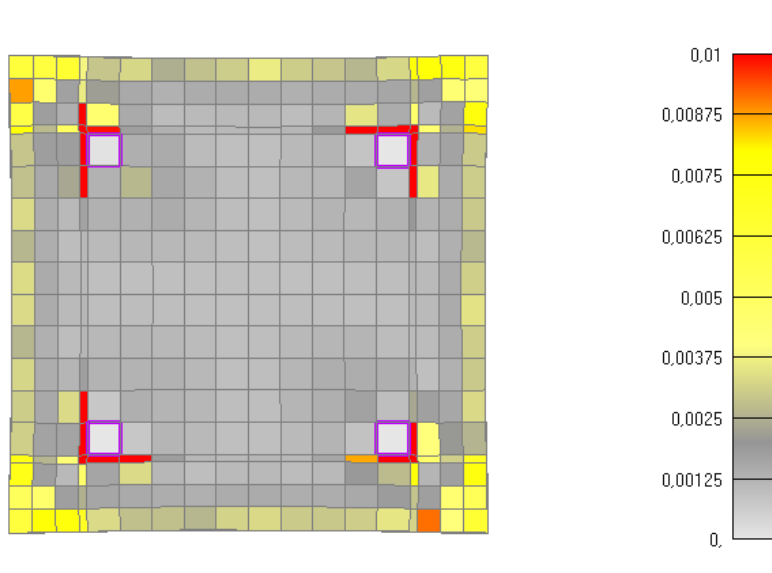




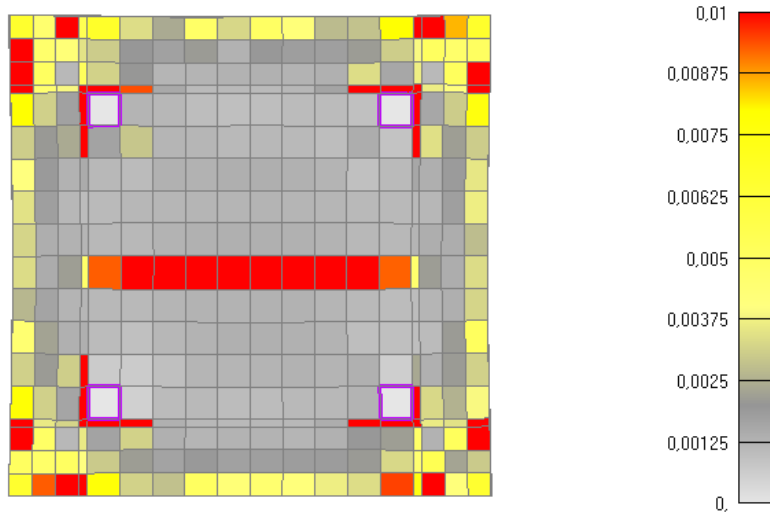
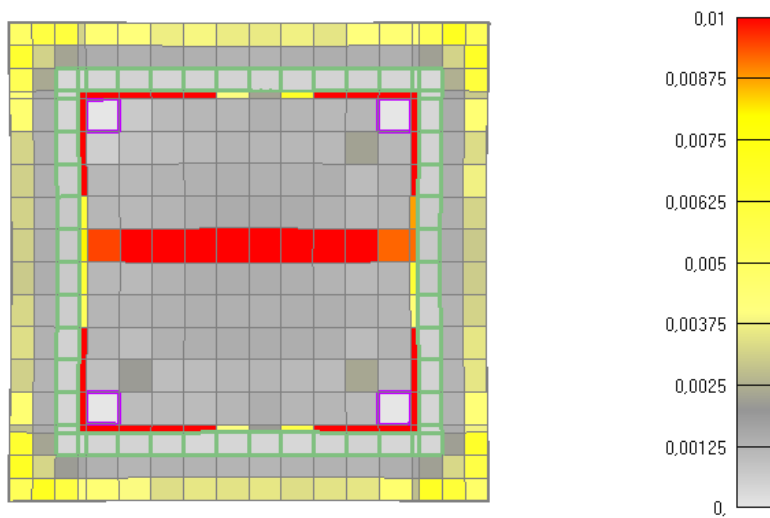
Slika 6.267: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 30 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



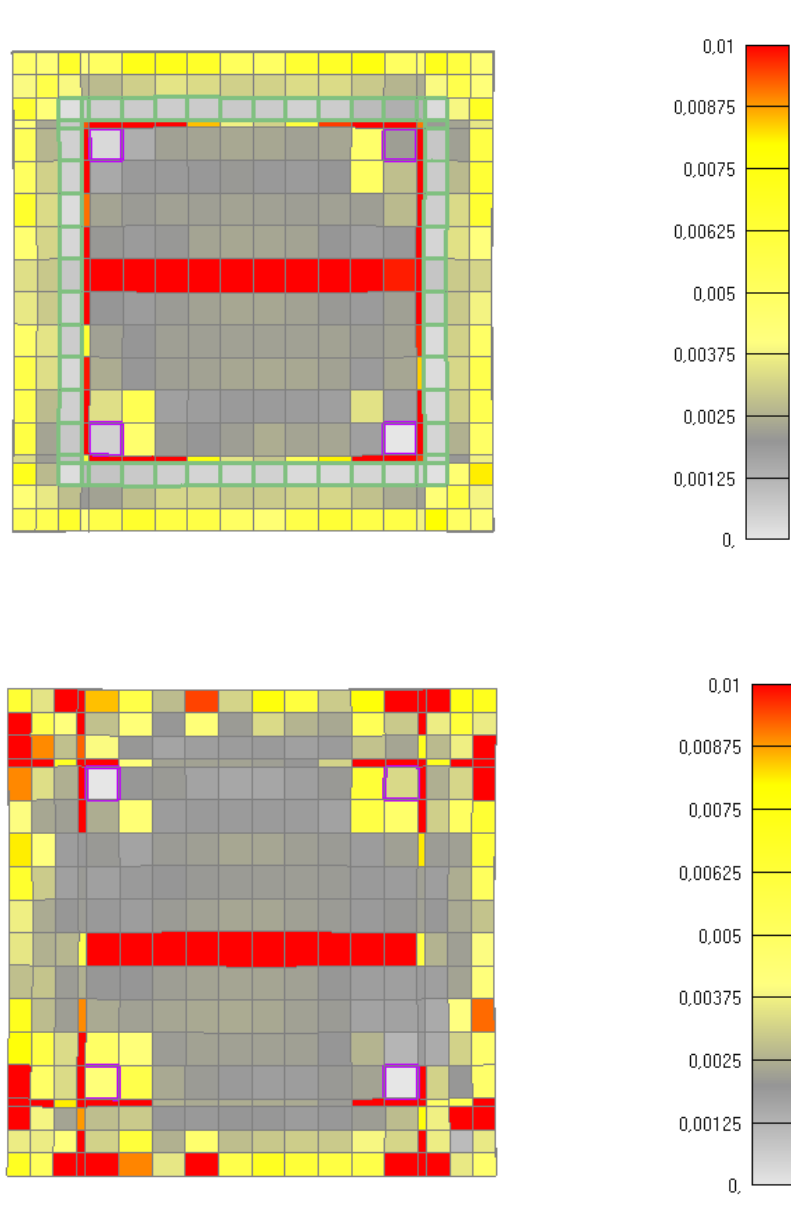
Slika 6.268: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(sa sponama)



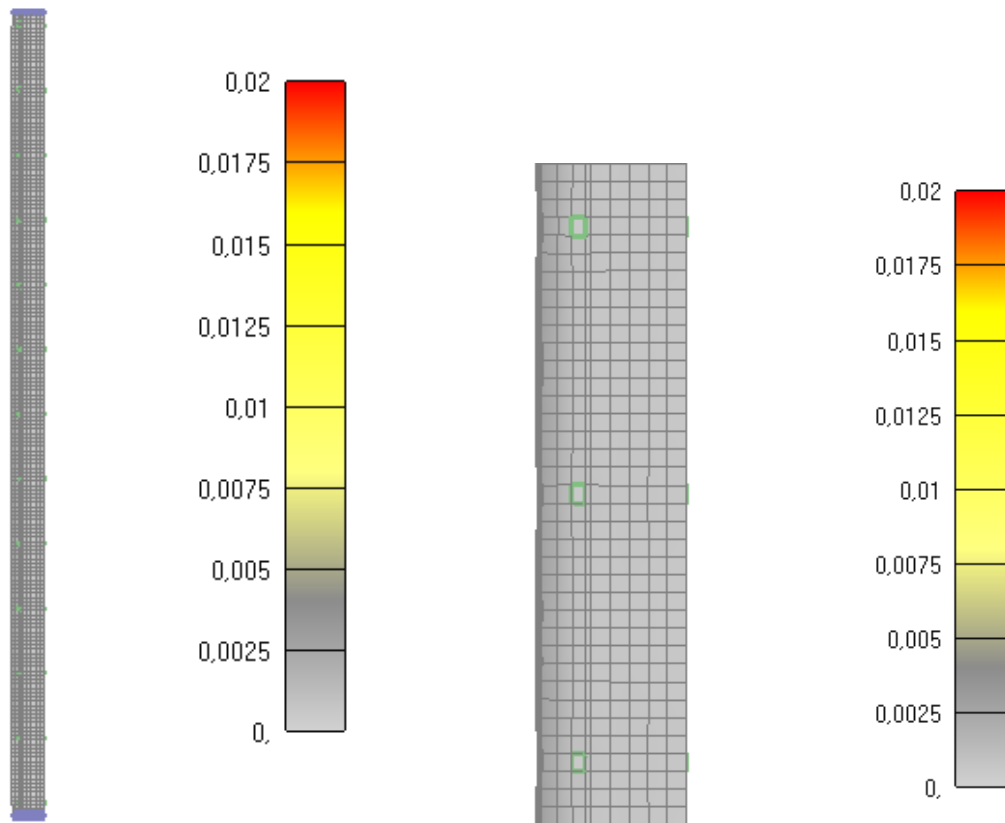
Slika 6.269: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 60 minuta požara  
(bez spona)



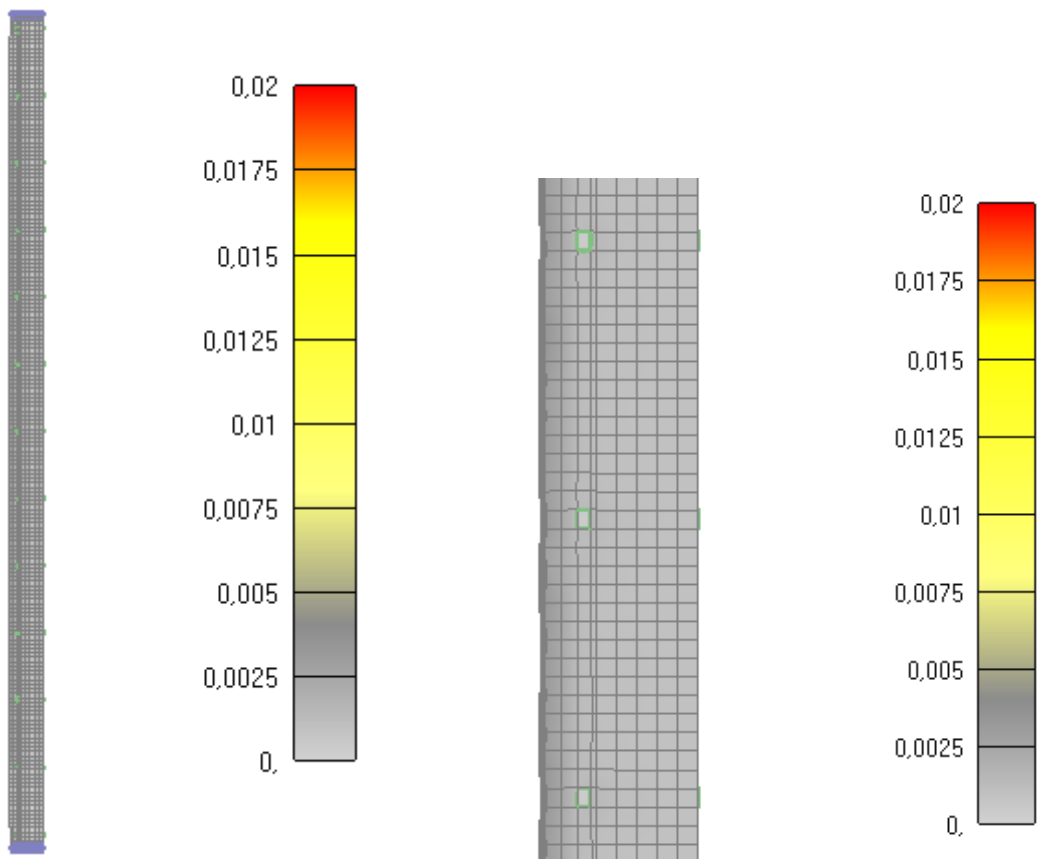
Slika 6.270: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 90 minuta  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona)



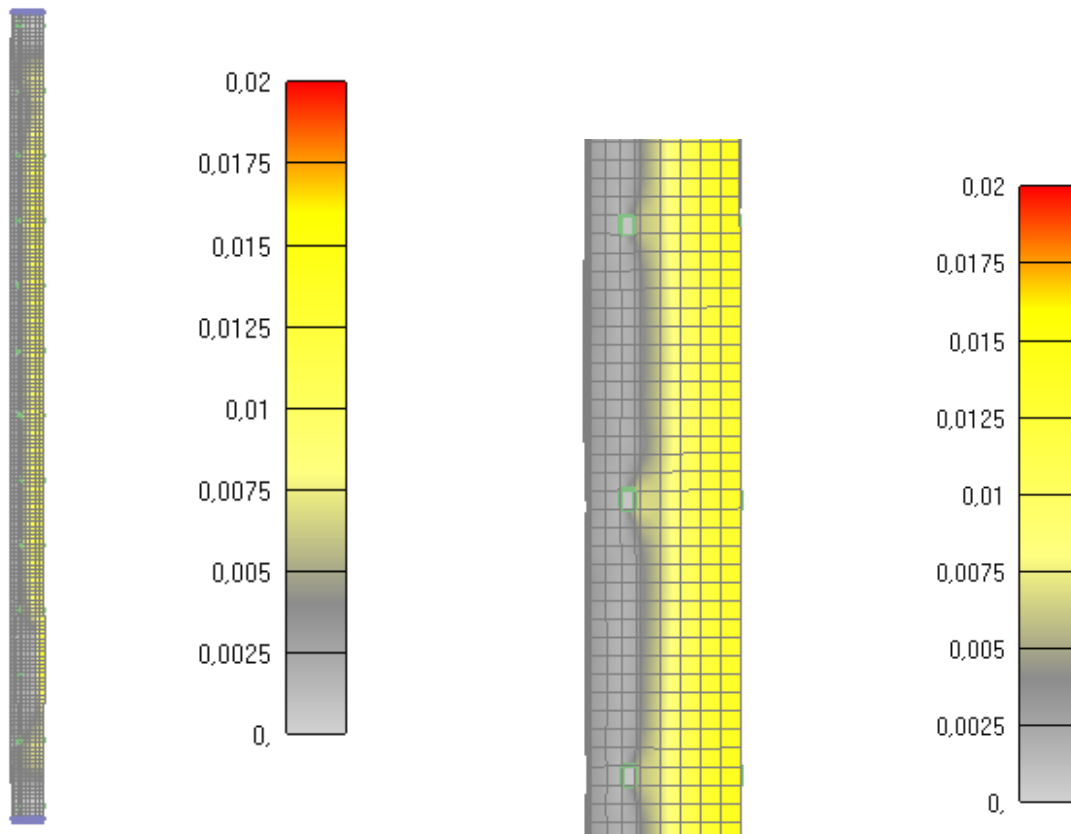
Slika 6.271: Prikaz pukotina za poprečni presjek stupa nakon 120 minuta požara  
(gore-sa sponama, dolje-bez spona) (KRAJ ZAGRIJAVANJA I POČETAK HLADENJA)  
(NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)



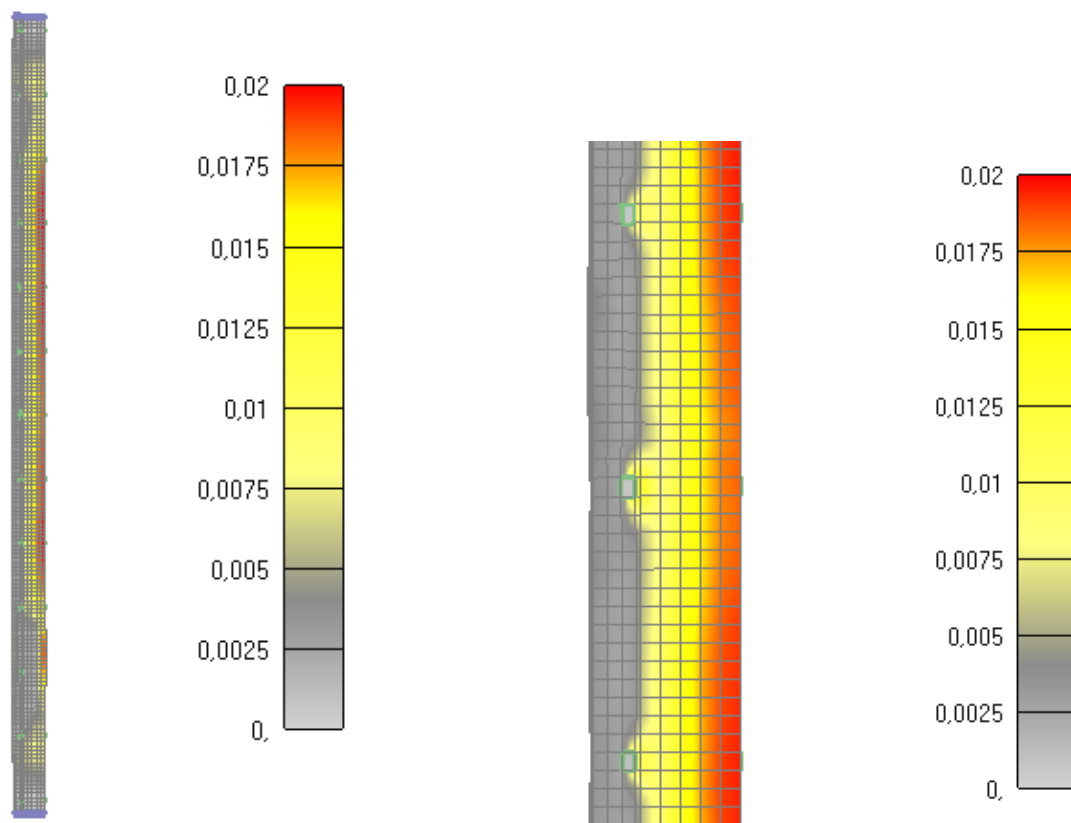
Slika 6.272: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 30 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



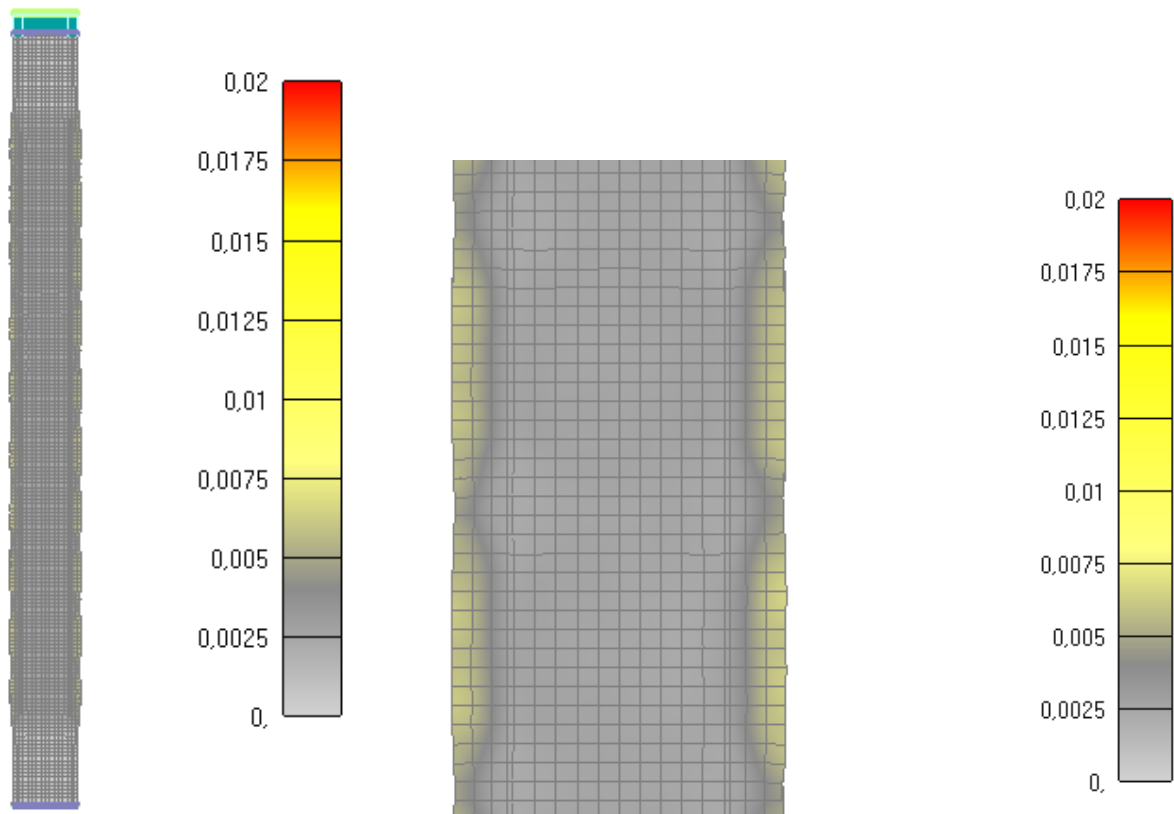
Slika 6.273: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 60 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



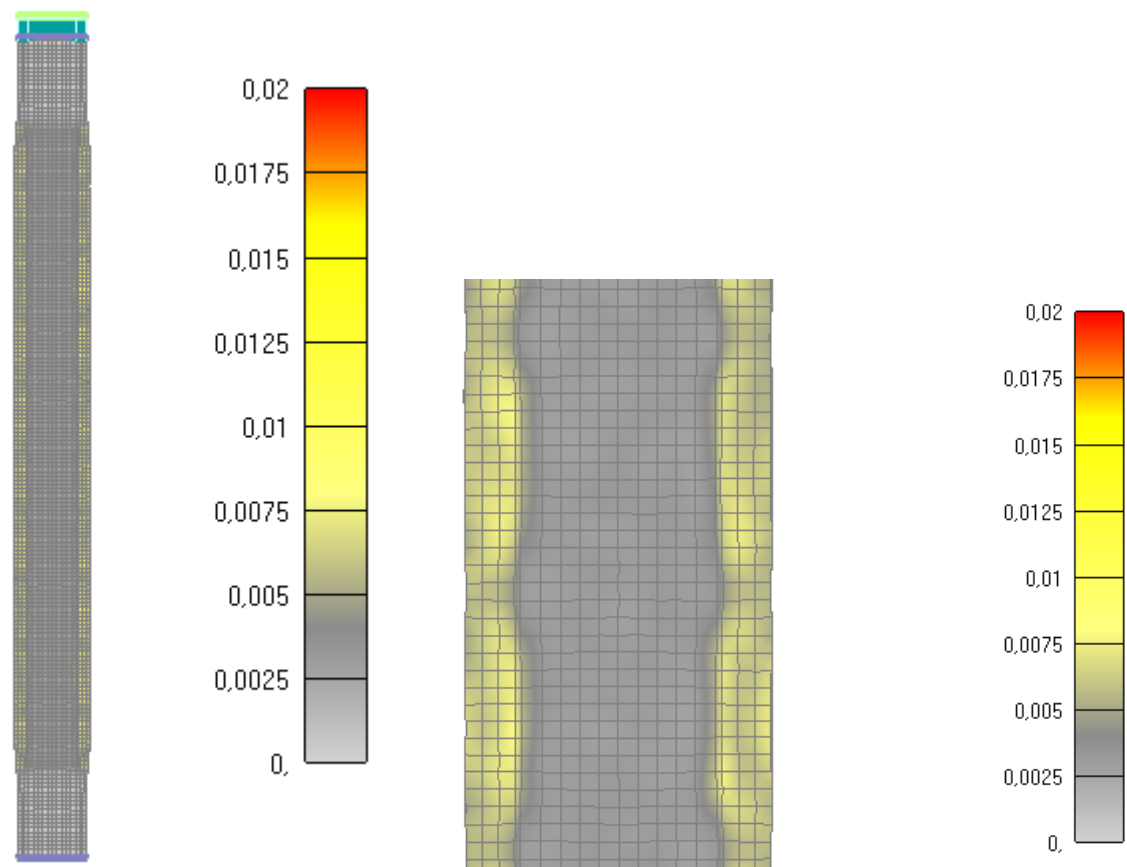
Slika 6.274: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 90 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*)



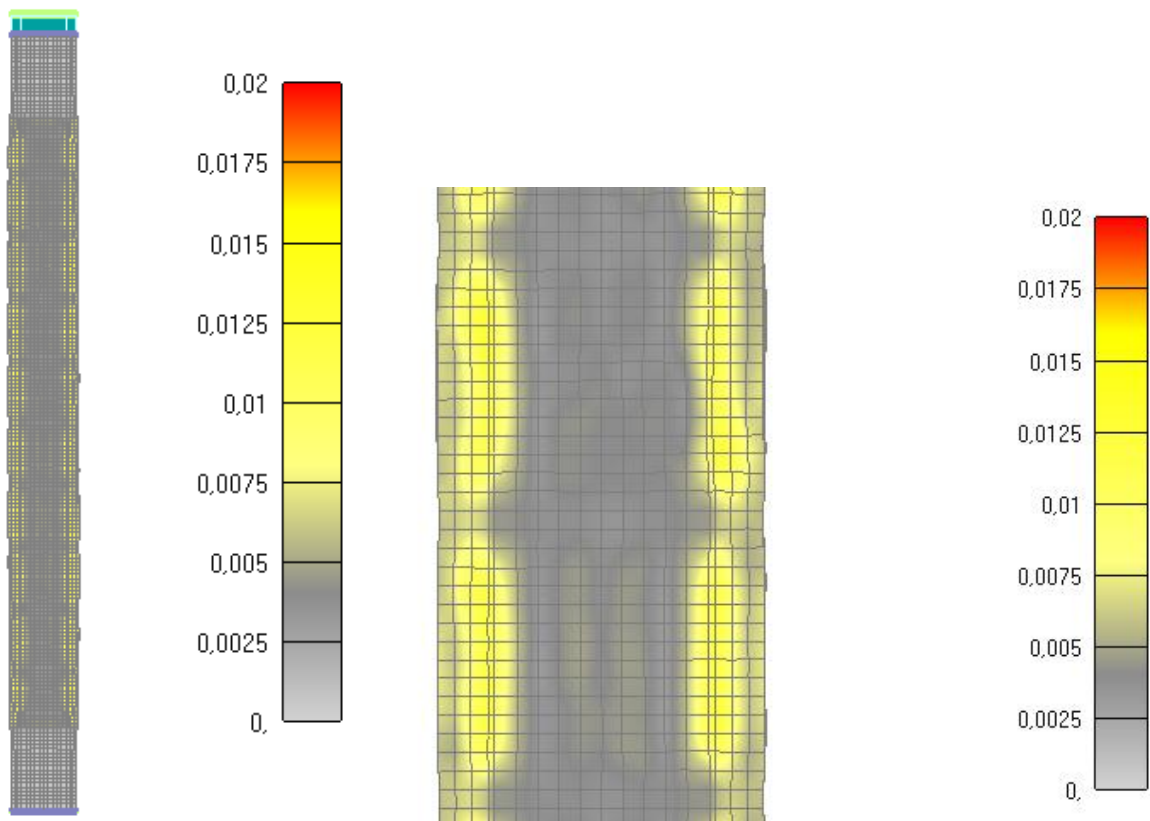
Slika 6.275: Prikaz pukotina za jednu četvrtinu stupa nakon 120 minuta  
(*lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa*) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLADENJA  
(*NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO*)



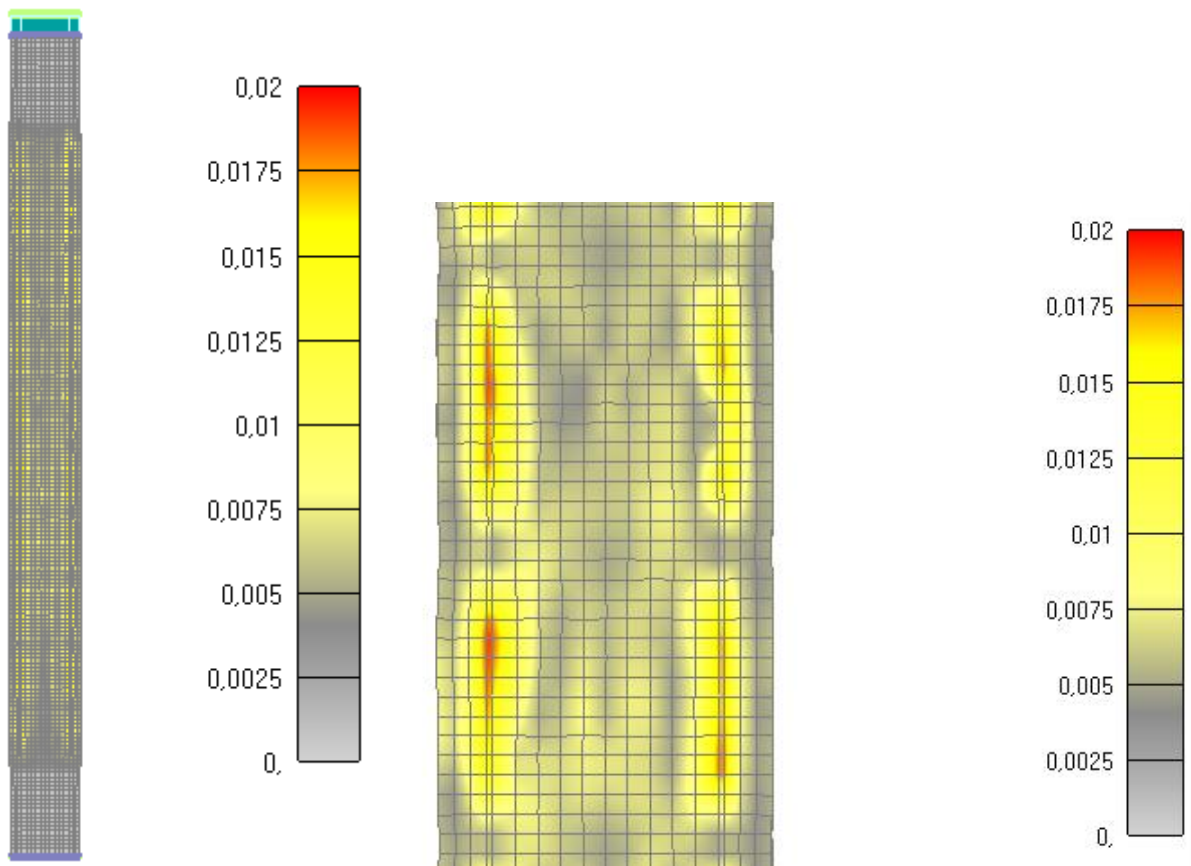
Slika 6.276: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 30 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.277: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 60 minuta  
(lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



Slika 6.278: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 90 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa)



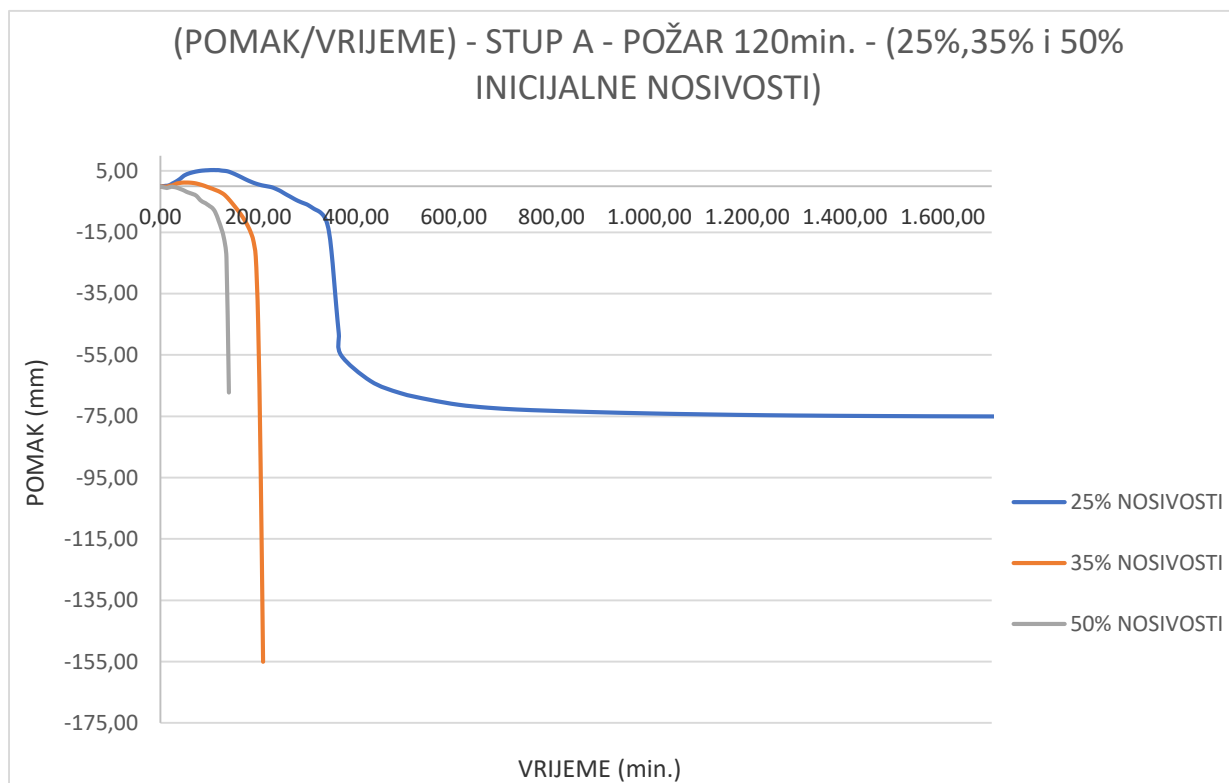
Slika 6.279: Prikaz pukotina za cijeli stup nakon 120 minuta  
 (lijevo-cijeli stup, desno-detalj stupa) -KRAJ GRIJANJA I POČETAK HLAĐENJA  
 (NAKON OVOG TRENUTKA STUP SE VRLO BRZO SRUŠIO)

---

### **6.2.3.11. USPOREDBA REZULTATA ZA VRIJEME POŽARA OD 120 minuta ZA RAZLIČITE IZNOSE OPTEREĆENJA**

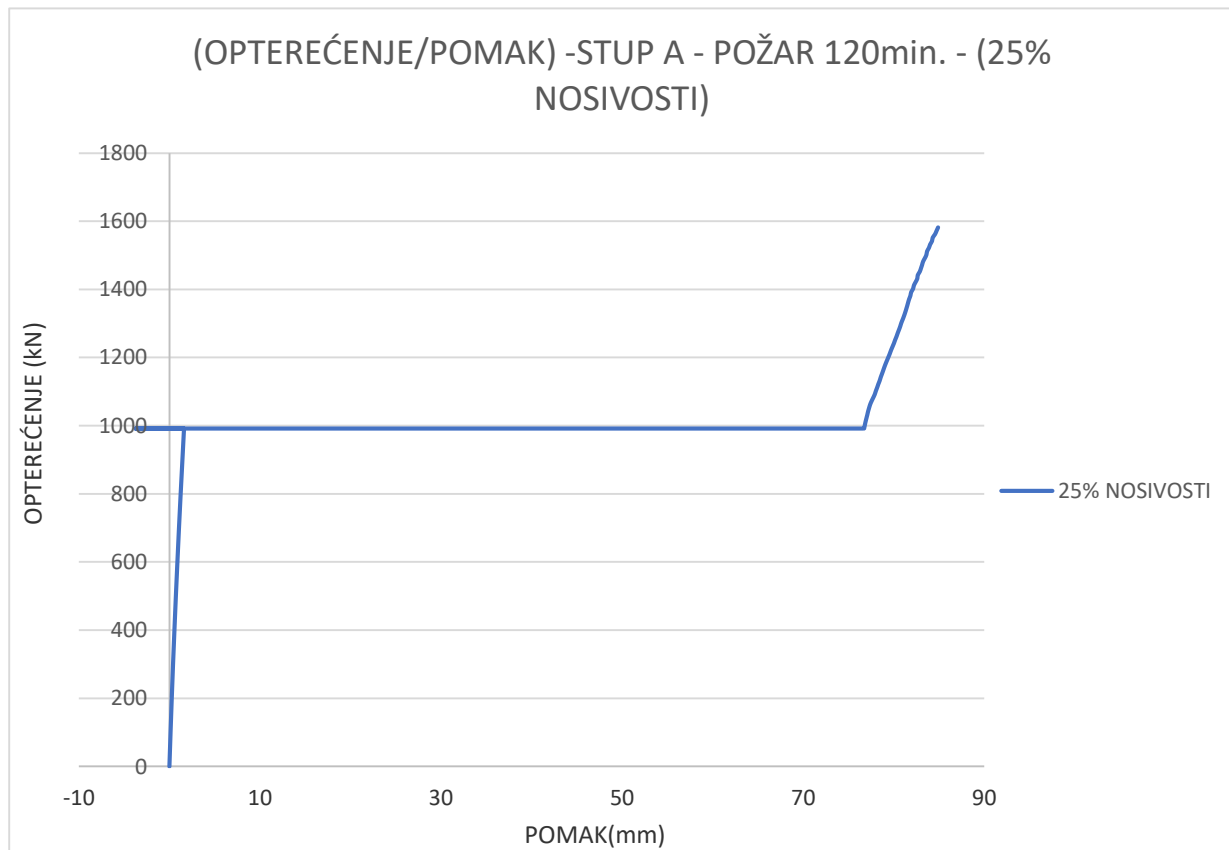
U ovom poglavlju će se promatrati pomaci i sile pri kojima stup dolazi do loma. Uspoređivati će se dijagrami (pomak-vrijeme) i (opterećenje-pomak) za različite intezitete opterećenja sile, a jednako vrijeme požara od 120 minuta. Za vrijeme trajanja požara od 120 minuta su već prikazane pukotine (središnji poprečni presjek stupa, jedna četvrtina stupa i cijeli stup), te tečenje armature. Dijagram distribucije temperature će biti prikazan za trajanje požara od 120 minuta i on je neovisan o intezitetu sile tako da vrijedi za sva opterećenja.





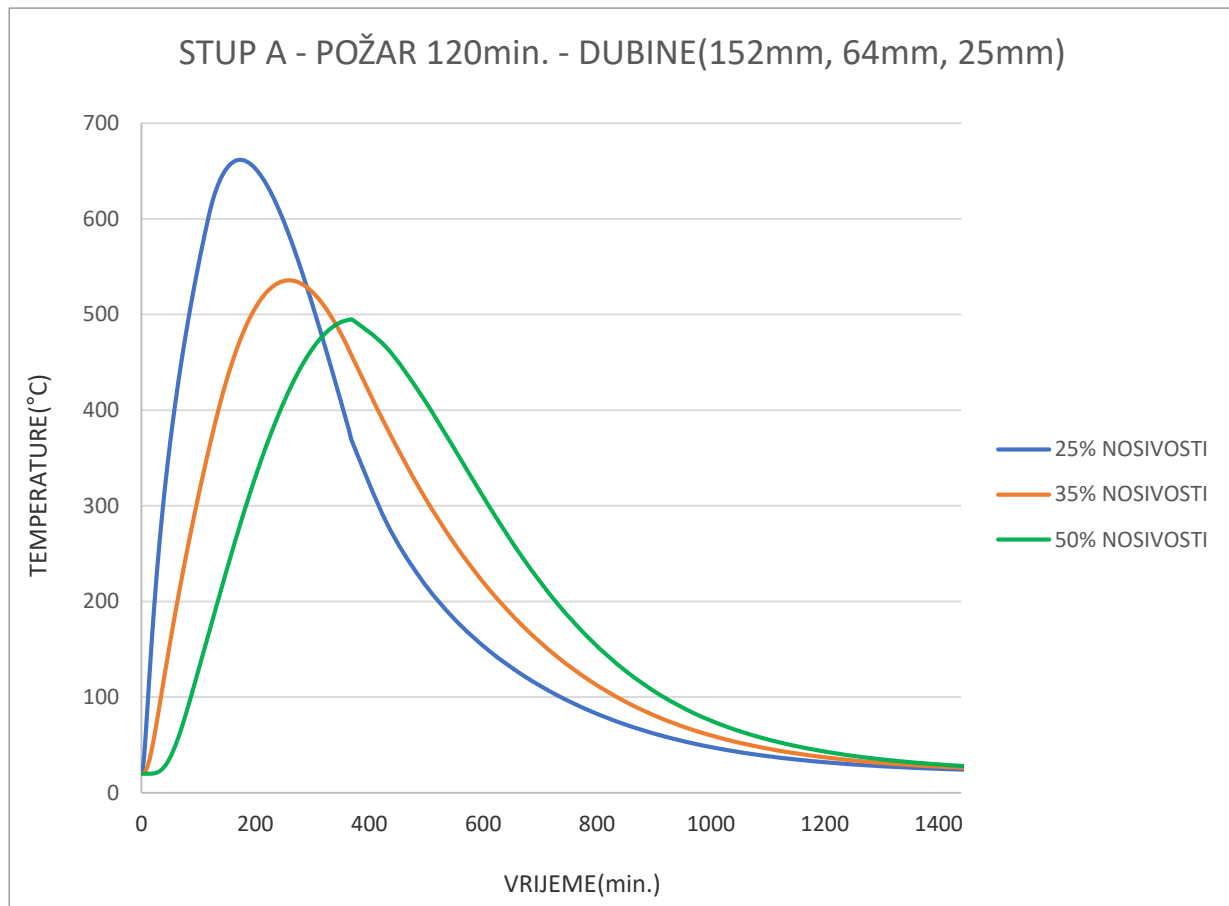
Slika 6.280: Prikaz dijagrama (pomak-vrijeme) za vrijeme požara od 120 minuta i različite intezitete opterećenja sile

Iz prethodnog dijagrama se može vidjeti da je stup preživio požarni proces za najmanji intezitet opterećenja 25%, dok se za intezitet sila od 35% i 50% inicijalne nosivosti, stup srušio za vrijeme požarnog procesa. Stup s 25% inteziteta opterećenja ili 992kN za vrijeme zagrijavanja ima ekspanziju oko 5 mm, dok mu je sabijanje na kraju požarnog procesa oko 75mm. Stup s intezitetom opterećenja od 35% ima manju ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog toga što na njega djeluje veća sila prije zagrijavanja i ekspanzija iznosi oko 1mm, dok je njegovo sabijanje u požarnom procesu otišlo u beskonačnost, tj. stup se srušio za vrijeme požarnog procesa nakon negdje 3 i pol sata. Stup s intezitetom opterećenja 50% od inicijalne nosivosti gotovo i nema ekspanziju u vremenu zagrijavanja zbog velike sile koja djeluje na njega prije djelovanja požara, dok je njegovo sabijanje u požarnom procesu otišlo u beskonačnost, tj. stup se srušio za vrijeme požarnog procesa nakon negdje 2 i pol sata.



Slika 6.281: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) za vrijeme požara od 120 minuta i različite intezitete opterećenja sile

Iz prethodnog dijagrama (opterećenje-pomak) može se vidjeti trenutke u kojima je došlo do loma stupa za različite iznose opterećenja. Sile djeluju u iznosima 25%, 35% i 50% od inicijalne nosivosti odnosno (992kN, 1450kN, i 2100kN). Na grafu je prikazan samo stup sa opterećenjem od 25% nosivosti zbog toga što su se stupovi s opterećenjem od 35% i 50% nosivosti srušili još za vrijeme požarnog procesa. Iz grafa se može vidjeti da se nakon završenog požarnog procesa nagib krivulje smanjio što u biti znači da su mehaničke karakteristike materijala narušene, a samim time i modul elastičnosti je smanjen. Sila pri kojoj se stup slomije za opterećenje prije požara od 992kN iznosi 1560kN.

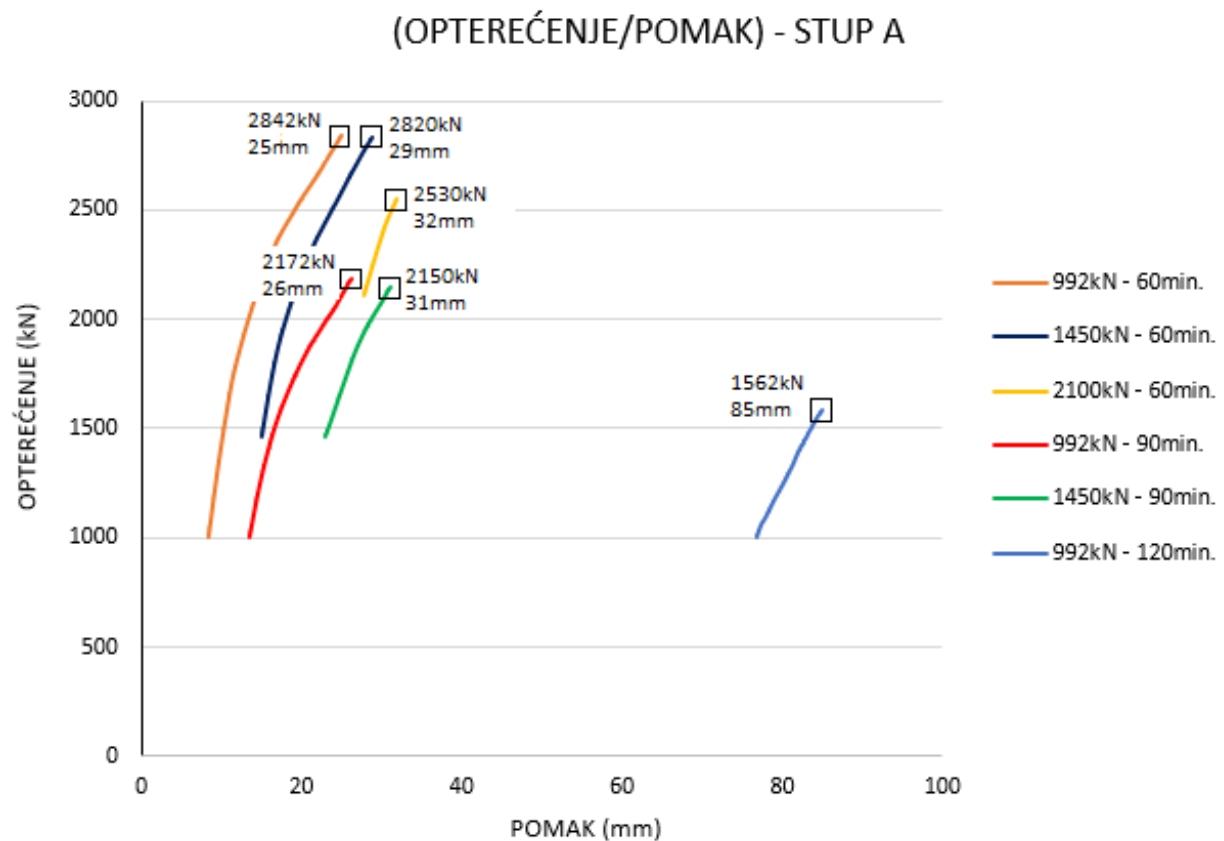


Slika 6.282: Prikaz dijagrama distribucije temperature za vrijeme požara od 120 minuta

Prethodni dijagram prikazuje distribuciju temperature u točkama A, B i C na dubinama 25mm, 64mm i 125mm od površine stupa tijekom požarnog procesa. Može se vidjeti da se najviše temperature tijekom požara postižu u točki A zbog toga što se ona nalazi najbliže površini stupa dok se najniže temperature postižu u točki C koja se nalazi u centru stupa. U točki A maksimalna temperatura iznosi oko 660°C, dok je u točki C u centru stupa maksimalna temperatura negdje oko 490°C.

### **6.2.3.12. PRIKAZ DIJAGRAMA NOSIVOSTI I USPOREDBA REZULTATA ZA SVE KOMBINACIJE PARAMETARSKE STUDIJE STUPA A**

U ovom poglavlju će se uspoređivati sila sloma stupa za sve kombinacije opterećenja parametarske studije stupa A. Rezultati će biti prikazati dijagramom (opterećenje-pomak) i na njemu će se moći očitati iznosi sila sloma i iznosi njihovih pripadajućih pomaka. Ukupno imamo 9 različitih kombinacija: 3 različita iznosa opterećenja (25%, 35% i 50%) od inicijalne nosivosti stupa, te 3 različita vremena djelovanja požara (60min, 90min i 120min). Od ovih 9 kombinacija opterećenja stup je uspio “preživjeti“ njih 6 da se nije srušio tijekom požarnog procesa, nego tek naknadno postupnim podizanjem iznosa sile loma. Stup nije “preživio“ 3 kombinacije tijekom požarnog procesa: (opterećenje od 50% inicijalne nosivosti stupa i vrijeme požara od 90min.), (opterećenje od 35% inicijalne nosivosti stupa i vrijeme požara od 120min), (opterećenje od 50% inicijalne nosivosti stupa i vrijeme požara od 120min). Te tri kombinacije se neće prikazati na dijagramu usporedbe nego samo onih ostalih 6 kombinacija.



Slika 6.283: Prikaz dijagrama (opterećenje-pomak) i sile sloma stupova za kombinacije iz parametarske studije

Iz prethodnog dijagrama mogu se vidjeti sile sloma s njihovim pripadajućim pomacima za 6 kombinacija iz parametarske studije stupa A. Inicijalna nosivost stupa bez djelovanja požara iznosi 4154kN, a ove nosivosti iz dijagrama nakon djelovanja požara su sve redom manje od ove inicijalne u ovisnosti o djelovanju iznosa opterećenja na stup prije požara, i dužine djelovanja samog požarnog opterećenja. Na dijagramu u legendi mogu se vidjeti iznosi sile opterećenja od (992kN, 1450kN i 2100kN), što u prijevodu znači opterećenje od (25%,35% i 50%) od inicijalne nosivosti stupa. Može se vidjeti da krivulje sa duljinom požara od 60 minuta imaju najveću nosivost u intervalu od 2530-2840kN. Dvije “preživjele“ krivulje požara od 90 minuta imaju nosivost oko 2150kN, dok je sila sloma za jedinu “preživjelu“ kombinaciju za vrijeme trajanja požara od 120 minuta 1560kN. Treba naglasiti da krivulje prikazuju stanje nosivosti stupa nakon završenog požarnog procesa, tj. prikazuju vrijeme u kojemu djeluje postupan prirast sile opterećenja u inkrementima od 10kN do konačnog sloma stupa.

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju prikazanih rezultata vidi se značajan pad nosivosti stupa usljed djelovanja požara zbog toga što su mehaničke karakteristike materijala poprilično narušene. Događa se značajno oštećenje materijala kao i njegova degradacija.

Rezultati nosivosti dobiveni numeričkim putem za validacijske slučajeve stupova A i B se poprilično dobro poklapaju s rezultatima iz eksperimenta [2]. Predviđena nosivost stupa A iznosi 2842kN, dok je eksperimentalna nosivost 2671kN što je razlika manja od 6%. Predviđena nosivost stupa B iznosi 1702kN, dok je eksperimentalna nosivost 1987kN što je razlika manja od 15%.

U nastavku ćemo prikazati tablicu nosivosti stupa A za njegovu parametarsku studiju:

REZULTATI ISPITIVANJA		
STUP A		
INICIJALNA NOSIVOST	OPTEREĆENJE POMAKOM(kN)	PAD SILE(%)
	4154	
KOMBINACIJE:	OPTEREĆENJE SILOM+TEMP.	
	pomak(mm) /sila(kN)	
Validacijski slučaj stupa A	25 / 2842	31,6
(1450 kN i 60 min. požar)	29 / 2820	32,1
(2100 kN i 60 min. požar)	32 / 2530	39,1
(992 kN i 90 min. požar)	26 / 2172	47,7
(1450 kN i 90 min. požar)	31 / 2150	48,2
(2100 kN i 90 min. požar)	" srušio se tijekom požara"	
(992 kN i 120 min. požar)	85 / 1562	62,4
(1450 kN i 120 min. požar)	" srušio se tijekom požara"	
(2100 kN i 120 min. požar)	" srušio se tijekom požara"	

Slika 7.1: Prikaz tablice nosivosti stupa A za njegovu parametarsku studiju

Iz prethodne tablice može se vidjeti rezultate parametarske analize pada nosivosti stupa A u odnosu na inicijalnu nosivost usljed djelovanja opterećenja i požara zajedno. Prikazano je svih devet kombinacija iz parametarske studije s tim da ih je samo šest "preživjelo" požarni proces. Kod njih se može vidjeti da je pad nosivosti nakon djelovanja požara i opterećenja popriličan osobito za duljine požara od 90 minuta i 120 minuta. Može se vidjeti da je pad nosivosti za trajanje požara od 60 minuta u intervalu od 30-40% u odnosu na inicijalnu nosivost stupa u ovisnosti o iznosu opterećenja. Pad nosivosti za dvije "preživjele" kombinacije za trajanje požara od 90 minuta je oko 50% što je već na pragu sigurnosti i upitno je da li je tu rekonstrukcija konstrukcije isplativa ili treba krenuti u rušenje.

Za djelovanje požara od 120 minuta i za jedinu pripadajuću “preživjelu“ kombinaciju pad nosivosti sile iznosi ekstremnih 62%, uz ogromne pomake od 85mm u trenutku sloma stupa. Za ovaj slučaj konstrukciju je najbolje strušiti i izraditi novu jer njena nosivost nakon djelovanja požara ne zadovoljava minimalne uvjete nosivosti i uporabivosti za konstrukciju.

## **8. LITERATURA**

- [1] Joško Ožbolt et al, 3D numerical analysis of reinforced concrete beams exposed to elevated temperature, *Engineering structures* 58, 2014.
- [2] T. T. Lie et al, Residual Strength of Fire-Exposed Reinforced Concrete Columns, SP 92-9
- [3] Joško Ožbolt, Finite element code MASA (Macroscopic Space Analysis)
- [4] Eurocode 1: Part 1-2 (EN 1991-1-2:2002)

Korišteni programski paketi:

- [1] MASA (Macroscopic Space Analysis)
- [2] FEMAP®
- [3] AutoCad 2018
- [4] Microsoft Office Excell
- [5] Microsoft Office Word