

Mestna občina Celje

ŠOLSKI CENTER CELJE

Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

PRIMERJAVA IZRAČUNOV PO METODI KONČNIH ELEMENTOV Z RAZLIČNIMI PROGRAMSKIMI PAKETI

Raziskovalna naloga

Avtorja:

Jure TOJNKO, S-4. a

Davor ZAVRŠEK, S-4. a

Mentorji:

Aleš FERLEŽ, mag. inž. energ.

Martin AMON, mag. inž. str.

Žan PODBREGAR, mag. inž. energ.

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje, marec 2020

IZJAVA

Mentorji Martin Amon, Aleš Ferlež in Žan Podbregar v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljamo, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Primerjava izračunov po metodi končnih elementov z različnimi programskimi paketi, katere avtorja sta Jure Tojnko in Davor Završek:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, _____

žig šole

Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe

POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.

DOVOLJENJE ZA OBJAVO AVTORSKE FOTOGRAFIJE V RAZISKOVALNI NALOGI

Podpisana Jure Tojnko in Davor Završek izjavljava, da sva avtorja fotografskega gradiva, navedenega v priloženem seznamu, in dovoljujema v skladu z 2. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, da se lahko uporabi pri pripravi raziskovalne naloge pod mentorstvom Aleša Ferleža, Žana Podbregarja in Martina Amona z naslovom Primerjava izračunov po metodi končnih elementov z različnimi programskimi paketi, katere avtorja sta Jure Tojnko in Davor Završek.

Dovoljujemo tudi, da sme Osrednja knjižnica Celje vključeno fotografsko gradivo v raziskovalno nalogo objaviti na knjižničnih portalih z navedbo avtorstva v skladu s standardi bibliografske obdelave.

Celje, _____

Podpis avtorjev:

Priloga:

- seznam fotografskega gradiva (kazalo slik)

ZAHVALA

Zahvaljujeva se vsem, ki so kakorkoli pomagali pri izdelavi raziskovalne naloge. Brez pomoči naloga ne bi nastala, pa naj je šlo le za spodbudne besede, majhno idejo ali nasvete in kritike pri izdelovanju izdelka.

Zahvaljujeva se mentorjem Alešu Ferležu, mag. inž. energ., Žanu Podbregarju, mag. inž. energ., in Martinu Amonu, mag. inž. str., za ves trud, čas, podporo in vztrajnost, ki so jo vložili v izdelovanje raziskovalne naloge, ter za tehnični pregled le-te.

Zahvala gre tudi Tadeji Kolman, prof., za slovnični pregled in ravnateljici Simoni Črep, prof., ki podpira raziskovalno dejavnost na šoli.

POVZETEK

V raziskovalni nalogi smo predstavili teorijo o metodah končnih elementov, in sicer osnovne korake te analize, tipe analiz in programske pakete, v katerih so bile simulacije narejene. Pripravili in zmodelirali smo modela, ki smo jih kasneje uporabili pri izvajanju simulacij. Za verodostojnejšo primerjavo smo med seboj primerjali dva tipa analiz, statični tip analize (L-kotnik) in termalni tip analize (posoda za kuhanje kave). Najprej smo za vsak tip analize naredili simulacije v programih, jih komentirali in na koncu ovrednotili.

Ključne besede: metode končnih elementov, L-kotnik, posoda za kuhanje kave, statični tip analize, termalni tip analize, simulacije

SUMMARY

In the research paper, we presented the theory of final element methods, namely the basic steps of this analyses, the types of analyses, and the software packages in which the simulations were made. We prepared and modelled the models that were later used in the simulations. For more accurate comparison, we compared two types of analyses, the static type of analyses (L-angle) and the thermal type of analyses (coffee pot). First, for each type of analyses, we made simulations in programs, commented on them, and finally evaluated them.

Key words: final element methods, L-angle, coffee pot, static type of analyses, thermal type of analyses, simulations

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	HIPOTEZE.....	2
1.2	STRUKTURA RAZISKOVALNEGA DELA	2
2	METODA KONČNIH ELEMENTOV	3
2.1	OSNOVNI KORAKI ANALIZ PO MKE	3
2.2	TIPI ANALIZ	5
2.3	PROGRAMSKI PAKETI.....	7
2.3.1	SolidWorks.....	7
2.3.2	Creo.....	8
2.3.3	Ansys.....	8
2.3.4	Abaqus	9
3	STATIČNA ANALIZA L-KOTNIKA.....	10
3.1	PRIPRAVA MODELA	10
3.2	MODELIRANJE L-KOTNIKA	10
3.3	PRIPRAVA ANALIZE L-KOTNIKA	11
3.4	ROBNI POGOJI IN LASTNOSTI MATERIALA	12
3.4.1	Analitična analiza L-kotnika	12
3.5	SOLIDWORKS	13
3.5.1	Uvoz modela.....	13
3.5.2	Nastavitev enot	14
3.5.3	Definicija nove statične analize.....	14
3.5.4	Določitev materialnih lastnosti.....	14
3.5.5	Določitev vpetja.....	15
3.5.6	Določitev obremenitve.....	15
3.5.7	Mreženje.....	16
3.5.8	Zgoščevanje mreže	17
3.5.9	Analiza rezultatov	18

3.5.10	Ponovno mreženje	20
3.5.11	Analiza rezultatov ponovnega mreženja	20
3.5.12	Primerjava in analiza rezultatov v programu Solidworks	23
3.6	ABAQUS	23
3.6.1	Uvoz modela.....	23
3.6.2	Določitev materialnih lastnosti.....	24
3.6.3	Povezovanje delov	25
3.6.4	Določitev vrste analize.....	25
3.6.5	Mreženje.....	26
3.6.6	Zgoščevanje mreže	28
3.6.7	Določitev vpetja.....	29
3.6.8	Določitev sile.....	30
3.6.9	Priprava za analizo.....	32
3.6.10	Analiza rezultatov nestrukturirane mreže	33
3.6.11	Generiranje strukturirane mreže	35
3.6.12	Analiza rezultatov strukturirane mreže	37
3.6.13	Primerjava in analiza rezultatov v programu Abaqus.....	40
3.7	ANSYS.....	41
3.7.1	Določitev materiala.....	41
3.7.2	Uvoz modela.....	41
3.7.3	Določitev vpetja.....	42
3.7.4	Določitev obremenitve.....	42
3.7.5	Mreženje.....	43
3.7.6	Zgoščevanje mreže	45
3.7.7	Analiza rezultatov nestrukturiranih mrež.....	46
3.7.8	Generiranje strukturirane mreže	49
3.7.9	Analiza rezultatov strukturiranih mrež	51
3.7.10	Analiza rezultatov v programu Ansys	53

3.8	CREO	54
3.8.1	Določitev materiala.....	54
3.8.2	Določitev vpetja.....	55
3.8.3	Določitev obremenitve.....	56
3.8.4	Mreženje.....	57
3.8.5	Analiza rezultatov prve mreže.....	58
3.8.6	Ponovno mreženje	58
3.8.7	Analiza rezultatov zgoščenih mrež.....	59
3.8.8	Primerjava in analiza rezultatov v programu Creo	60
3.9	PRIMERJAVA REZULTATOV L-KOTNIKA	61
4	TERMIČNA ANALIZA POSODE ZA KUHANJE KAVE.....	62
4.1	PRIPRAVA MODELA	62
4.2	MODELIRANJE POSODE ZA KUHANJE KAVE.....	62
4.3	PRIPRAVA ANALIZE.....	65
4.4	ROBNI POGOJI IN LASTNOSTI MATERIALA	65
4.5	SOLIDWORKS	65
4.5.1	Uvoz modela.....	65
4.5.2	Definicija nove termične analize	66
4.5.3	Določitev materiala posode.....	66
4.5.4	Določitev toplotne obremenitve	67
4.5.5	Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice	67
4.5.6	Mreženje.....	68
4.5.7	Analiza rezultatov prve mreže.....	69
4.5.8	Ponovno mreženje	69
4.5.9	Analiza rezultatov zgoščenih mrež.....	70
4.5.10	Primerjava in analiza rezultatov v programu Solidworks	72
4.6	ABAQUS	72
4.6.1	Uvoz modela.....	72

4.6.2	Določitev materialnih lastnosti.....	72
4.6.3	Vnos robnih pogojev.....	73
4.6.4	Povezovanje delov	74
4.6.5	Določitev vrste analize.....	74
4.6.6	Mreženje.....	75
4.6.7	Določitev toplotne obremenitve	76
4.6.8	Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice	77
4.6.9	Priprava za analizo.....	77
4.6.10	Analiza rezultatov prve mreže.....	77
4.6.11	Ponovno mreženje	78
4.6.12	Analiza rezultatov zgoščenih mrež.....	79
4.6.13	Primerjava in analiza rezultatov v programu Abaqus.....	80
4.7	ANSYS.....	81
4.7.1	Določitev materiala.....	81
4.7.2	Uvoz modela.....	81
4.7.3	Določitev toplotne obremenitve	81
4.7.4	Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice	82
4.7.5	Mreženje.....	82
4.7.6	Analiza rezultatov	83
4.7.7	Analiza rezultatov v programu Ansys	84
4.8	CREO	84
4.8.1	Določitev materiala.....	84
4.8.2	Določitev toplotne obremenitve	85
4.8.3	Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice	85
4.8.4	Mreženje.....	86
4.8.5	Analiza rezultatov prve mreže.....	87
4.8.6	Ponovno mreženje	87
4.8.7	Analiza rezultatov zgoščenih mrež.....	88

4.8.8	Primerjava in analiza rezultatov v programu Creo	89
4.9	POSODA ZA KUHANJE KAVE	90
5	PREDSTAVITEV REZULTATOV RAZISKOVALNE NALOGE.....	91
6	ZAKLJUČEK.....	92
7	VIRI IN LITERATURA	93

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovni koraki analiz po MKE	4
Slika 2: Stranski ris L-kotnika	10
Slika 3: Izvlek v prostor in radij zaokrožitve	11
Slika 4: Obremenitev in vpetje na L-kotniku	12
Slika 5: Nastavitev enot	14
Slika 6: Tip analize	14
Slika 7: Izpis materiala v drevesni strukturi.....	15
Slika 8: Določitev vpetja	15
Slika 9: Določitev obremenitve	16
Slika 10: Mreženje modela.....	17
Slika 11: Različne zgostitve mrež.....	18
Slika 12: Mreža 1 (napetost).....	18
Slika 13: Mreža 2 (napetost).....	19
Slika 14: Mreža 3 (napetost).....	19
Slika 15: Mreža 4 (napetost).....	20
Slika 16: Mreža 1 (Draft napetost)	21
Slika 17: Mreža 2 (Draft napetost)	21
Slika 18: Mreža 3 (Draft napetost)	22
Slika 19: Mreža 4 (Draft napetost)	22
Slika 20: Določitev materialnih lastnosti	24
Slika 21: Dodajanje lastnosti L-kotniku.....	24
Slika 22: Povezovanje delov	25
Slika 23: Določitev statične analize.....	26
Slika 24: Globalna vrednost mreže.....	27
Slika 25: Mreža, aplicirana na L-kotniku.....	27

Slika 26: Zgoščevanje mreže na robovih zaokrožitve	28
Slika 27: Zgoščevanje mreže na robu s funkcijo Bias	29
Slika 28: Različne zgostitve mrež.....	29
Slika 29: Določitev vpetja	30
Slika 30: Določitev tipa obremenitve	31
Slika 31: Določitev obremenjene ploskve.....	31
Slika 32: Način zapisa obremenitve.....	32
Slika 33: Kreiranje in urejanje Job-a	32
Slika 34: Delno strukturirana mreža 1 (napetost).....	33
Slika 35: Delno strukturirana mreža 2 (napetost).....	33
Slika 36: Delno strukturirana mreža 3 (napetost).....	34
Slika 37: Delno strukturirana mreža 4 (napetost).....	34
Slika 38: Delno strukturirana mreža 5 (napetost).....	34
Slika 39: Razdelitev L-kotnika na enostavnejše elemente	35
Slika 40: Strukturiran model	36
Slika 41: Strukturirana mreža.....	36
Slika 42: Zgoščene in strukturirane mreže.....	37
Slika 43: Strukturirana mreža 1 (napetost).....	37
Slika 44: Strukturirana mreža 2 (napetost).....	38
Slika 45: Strukturirana mreža 3 (napetost).....	38
Slika 46: Strukturirana mreža 4 (napetost).....	39
Slika 47: Strukturirana mreža 5 (napetost).....	39
Slika 48: Mreža, zgoščena v prečni in v vzdolžni smeri.....	39
Slika 49: Strukturirana mreža 5 (napetost).....	40
Slika 50: Uvoz modela.....	41
Slika 51: Določitev vpetja	42

Slika 52: Določitev obremenitve	43
Slika 53: Določitev globalne velikosti mreže.....	44
Slika 54: Mreža, aplicirana na L-kotniku.....	44
Slika 55: Mehak prehod zgoščanja s funkcijo Bias	45
Slika 56: Različne zgostitve mrež.....	45
Slika 57: Delno strukturirana mreža 1 (napetost)	46
Slika 58: Delno strukturirana mreža 2 (napetost)	47
Slika 59: Delno strukturirana mreža 3 (napetost)	47
Slika 60: Delno strukturirana mreža 4 (napetost)	48
Slika 61: Delno strukturirana mreža 5 (napetost)	48
Slika 62: Razdelitev ploskev L-kotnika na enostavnejše elemente	49
Slika 63: Strukturirana mreža, aplicirana na L-kotniku.....	50
Slika 64: Zgoščene in strukturirane mreže.....	50
Slika 65: Strukturirana mreža 1 (napetost).....	51
Slika 66: Strukturirana mreža 2 (napetost).....	51
Slika 67: Strukturirana mreža 3 (napetost).....	52
Slika 68: Strukturirana mreža 4 (napetost).....	52
Slika 69: Določitev materialnih lastnosti	54
Slika 70: Dodajanje materiala k L-kotniku	55
Slika 71: Določitev vpetja	56
Slika 72: Določitev obremenitve	56
Slika 73: Določitev mreže in apliciranje na L-kotnik	57
Slika 74: Nestrukturirana mreža 1 (napetost).....	58
Slika 75: Različne zgostitve mrež v predelu radija.....	58
Slika 76: Nestrukturirana mreža 2 (napetost).....	59
Slika 77: Nestrukturirana mreža 3 (napetost).....	59

Slika 78: Nestrukturirana mreža 4 (napetost).....	60
Slika 79: Stranski ris posode brez ročaja	62
Slika 80: Uporaba funkcije Revolve in črta, po kateri je bil speljan ročaj.....	63
Slika 81: Risanje ročaja.....	63
Slika 82: Končni model posode.....	64
Slika 83: Model prvotne posode	64
Slika 84: Definicija termične analize	66
Slika 85: Določitev materiala	66
Slika 86: Določitev toplotne obremenitve.....	67
Slika 87: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice.....	68
Slika 88: Mreža – 7 mm.....	68
Slika 89: Mreža – 7 mm (temperatura)	69
Slika 90: Mreža – 5 mm.....	70
Slika 91: Mreža – 3 mm.....	70
Slika 92: Mreža – 5 mm (temperatura)	71
Slika 93: Mreža – 3 mm (temperatura)	71
Slika 94: Določitev materialnih lastnosti	73
Slika 95: Dodajanje sekcije	73
Slika 96: Vnos robnih pogojev	74
Slika 97: Povezovanje delov	74
Slika 98: Definicija nove termične analize	75
Slika 99: Razdeljevanje posode na več površin.....	75
Slika 100: Mreža – 7 mm.....	76
Slika 101: Določitev toplotne obremenitve.....	76
Slika 102: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice.....	77
Slika 103: Priprava na analizo	77

Slika 104: Mreža – 7 mm (temperatura)	78
Slika 105: Mreža – 5 mm	78
Slika 106: Mreža – 3 mm	79
Slika 107: Mreža – 5 mm (temperatura)	79
Slika 108: Mreža – 3 mm (temperatura)	80
Slika 109: Določitev toplotne obremenitve	81
Slika 110: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice	82
Slika 111: Mreža – 7 mm	83
Slika 112: Mreža – 7 mm (temperatura)	83
Slika 113: Dodajanje materiala modelu	85
Slika 114: Določanje toplotne obremenitve	85
Slika 115: Določanje emisijskega koeficienta in temperature okolice	86
Slika 116: Mreža – 7 mm	86
Slika 117: Mreža – 7 mm (temperatura)	87
Slika 118: Mreža – 5 mm	87
Slika 119: Mreža – 3 mm	88
Slika 120: Mreža – 5 mm (temperatura)	88
Slika 121: Mreža – 3 mm (temperatura)	89

KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Solidworksu	23
Tabela 2: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Abaqusu	40
Tabela 3: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Ansysu	53
Tabela 4: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Creu	60
Tabela 5: Primerjava rezultatov med programskimi paketi	61
Tabela 6: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Solidworksu	72
Tabela 7: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Abaqusu	80
Tabela 8: Rezultati temperaturne analize v Ansysu.....	84
Tabela 9: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Creo	89
Tabela 10: Primerjava rezultatov med programskimi paketi	90

UPORABLJENE KRATICE

MKE – metoda končnih elementov

RAM – Random Access Memory (bralno-pisalni pomnilnik)

3D – tridimenzionalno

CAD – Computer Aided Design (računalniško podprto konstruiranje)

1 UVOD

Numerične analize predstavljajo v sodobnem inženirskem svetu nezamenljivo orodje, s katerim najhitreje in najceneje pridemo do zaključkov, kako se preizkušavec odziva v simuliranem okolju. Zato je od programa odvisno, kakšne rezultate nam bo posredoval in ali bodo ti točni ali ne, pa lahko le ugibamo. Zanimalo nas je torej, kakšne so razlike oziroma ali sploh so v rezultatih numeričnih analiz med različnimi programskimi paketi. Za primerjavo smo uporabili štiri najbolj zastopane in široko uporabne programske pakete, in sicer Solidworks, Creo, Abaqus in Ansys.

Geometrijska oblika končnih elementov ima pomemben vpliv na rezultate numerične simulacije. Zaželeno je, da so elementi pravilnih geometrijskih oblik (enakostraničen trikotnik, kvadrat, kocka). V praksi se pogosto pojavljajo zapletene geometrije, na katerih želimo izdelati mrežo. Pri takih primerih moramo po navadi uporabiti tudi elemente, ki imajo nepravilno obliko. Bolj kot je oblika elementov nepravilna, slabše rezultate dobimo. Velikokrat programski paketi pred izvedbo simulacije preverijo kakovost mreže in nas na elemente slabše kakovosti opozorijo. V ekstremnih primerih, ko so elementi tako slabe kakovosti, da s pomočjo njih ne moremo priti do uporabnih rezultatov, programski paketi javijo napako. Za ugotavljanje kakovosti mreže lahko uporabimo različne kriterije.

Na rezultat simulacije bistveno vpliva tudi velikost končnih elementov. Manjši kot so elementi, natančneje je opisana geometrija strojnega dela in potek spremenljivk znotraj računskega območja. Idealno bi bilo, če bi lahko območje razdelili s pomočjo izredno majhnih končnih elementov. Vendar smo omejeni z zmogljivostjo računalnika: število končnih elementov je omejeno s kapaciteto pomnilnika RAM (ob prevelikem številu končnih elementov se bo simulacija sicer izvajala, vendar se bo čas njene izvedbe občutno podaljšal), hitrost simulacije pa je odvisna od hitrosti procesorja ter števila jeder v njem. Uporabimo lahko le določeno število končnih elementov, zato se moramo zavedati, da simulacija ni povsem natančna. Inženir na podlagi svojega znanja in izkušenj oceni kakovost rezultatov simulacije.

1.1 HIPOTEZE

Cilj raziskovalne naloge je bil primerjati rezultate analiz med različnimi programskimi paketi ob predpostavki, da so vsi modeli in robni pogoji enaki.

V raziskovalni nalogi smo si postavili naslednje hipoteze:

- Med programskimi paketi bo prišlo do razlike pri rezultatih analiz.
- Vpliv gostote mreže bo na končni rezultat imel velik vpliv.
- Stopnja interpolacijske funkcije bo imela velik vpliv.
- Pri temperaturni analizi bo med programskimi paketi prišlo do večje razlike med rezultati kot pri statični analizi.

1.2 STRUKTURA RAZISKOVALNEGA DELA

V raziskovalni nalogi smo sprva predstavili temo in si zadali hipoteze. V drugem poglavju smo opisali metodo končnih elementov, različne tipe analiz in vse programe, v katerih smo izvajali simulacije. V tretjem poglavju smo izvedli statično analizo L-kotnika v vseh programskih paketih in rezultate najvišjih napetosti, ki se pojavijo, navedli v tabelah. V četrtem poglavju smo izvedli termično analizo posode za kuhanje kave, pri kateri nas je zanimala temperatura, ki se pojavi na ročaju. V petem poglavju smo rezultate iz analize L-kotnika in posode, ki smo jih izvedli v različnih programskih paketih, primerjali med seboj in jih komentirali. Na koncu smo še pojasnili in opisali, kakšno se nam je zdelo delo v posameznem programu.

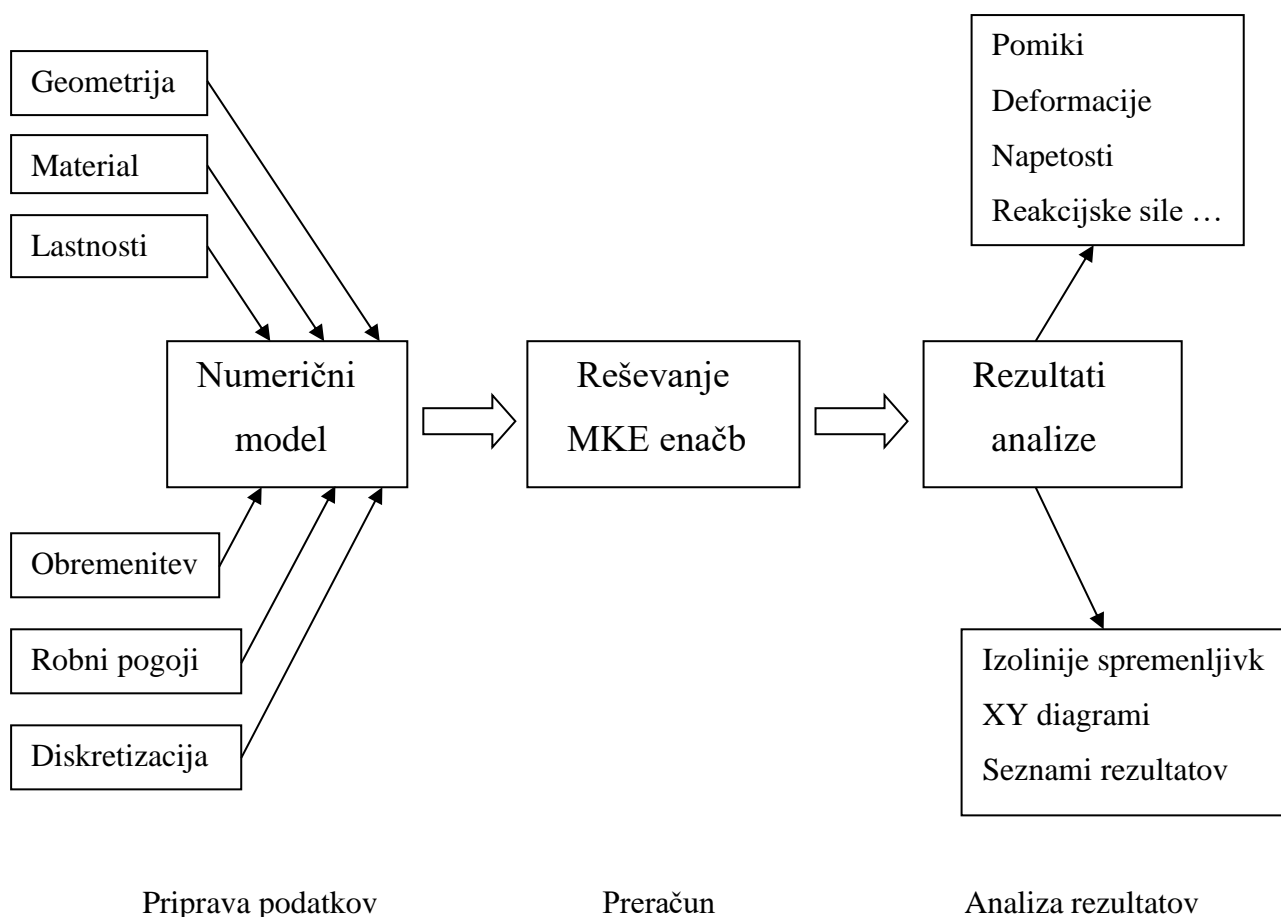
2 METODA KONČNIH ELEMENTOV

Metoda končnih elementov (MKE) je numerična metoda, ki temelji na razdelitvi (mreženju, diskretizaciji) obravnavane zvezne domene na določeno število medsebojno povezanih enostavnih geometrijskih oblik, ki jih imenujemo končni elementi. Mreža končnih elementov je medsebojno povezana v karakterističnih točkah oziroma vozliščih, v katerih vrednotimo končno število računsko določljivih neznanih osnovnih spremenljivk. S pomočjo interpolacijskih funkcij predpostavimo variacijo osnovnih spremenljivk znotraj končnih elementov v odvisnosti od njihovih vozliščnih vrednosti. Interpolacijske funkcije morajo zadovoljevati določene pogoje vzdolž robov elementov, da se diskretizirani računski model pri določenih robnih in začetnih pogojih obnaša čim bolj podobno odzivu zvezne domene. Natančnost numerične rešitve je tem večja, čim podrobnejša je diskretizacija oziroma čim večje je število končnih elementov ali stopnja interpolacijskih funkcij. [1]

2.1 OSNOVNI KORAKI ANALIZ PO MKE

V splošnem lahko potek celovite analize strukture po metodi končnih elementov razdelimo na naslednje korake: [1]

- geometrijsko modeliranje problema,
- vnos materialnih lastnosti,
- izbira primernih končnih elementov in vnos fizikalnih lastnosti posameznih delov strukture,
- mreženje (diskretizacija) strukture s končnimi elementi,
- vnos robnih pogojev vpetja (podpor) strukture,
- vnos robnih pogojev obremenitve strukture,
- preverjanje ustreznosti numeričnega modela,
- analiza po metodi končnih elementov,
- prikaz in analiza rezultatov.



Slika 1: Osnovni koraki analiz po MKE

(Vir: prevzeto od [1])

Kot je razvidno iz zgornjega diagrama (Slika 1), je potek numerične analize razdeljen na tri sklope:

- Priprava podatkov oziroma izdelava numeričnega modela.
- Preračun po metodi končnih elementov oziroma analiza modela.
- Predstavitev ter analiza rezultatov.

Tem trem korakom so prirejena tudi programska orodja. Najpomembnejša so programska orodja, ki so namenjena dejanskemu preračunu numeričnega modela. Ta programska orodja so običajno brez uporabniškega vmesnika in ob zagonu le preberejo vhodno datoteko s podatki o numeričnem modelu, po opravljeni analizi pa zapišejo rezultate v izhodno datoteko. Najbolj znani in razširjeni programi za analizo numeričnih modelov po metodi končnih elementov so MCS NASTRAN, ABAQUS in ANSYS. Poleg teh je na voljo še veliko manj znanih tržnih in znanstvenih programov, ki so dostopni tudi na svetovnem spletu.

Vhodno datoteko za preračun po MKE lahko pripravimo tudi ročno v urejevalniku besedil, vendar je to zelo zamudno, še posebej v primeru prostorskih analiz. Zato običajno vhodne

datoteke s podatki o numeričnem modelu izdelujemo z ustreznimi programi za pripravo numeričnega modela. Takšne programe v splošnem imenujemo predprocesorji, saj z njimi pripravimo vse potrebne podatke za preračun: geometrijo modela, mrežo končnih elementov, materialne podatke, fizikalne lastnosti, robne pogoje vpetja in obremenitve.

Rezultat preračuna po MKE je izhodna datoteka z rezultati, ki je običajno v takšni obliki, da lahko rezultate pregledujemo z urejevalniki besedil ali jih natisnemo. Pri veliki količini rezultatov je to zelo naporno, zato običajno za analizo uporabimo programe, ki jih imenujemo postprocesorji. S temi programi jih lahko nazorno prikažemo v grafični obliki, npr. deformiran model z barvnim prikazom izolinij ali izopovršin rezultatov, tabele in diagrame potekov posameznih rezultatov itd.

Načeloma lahko za vse tri faze uporabimo različne programe. Ker pred- in postprocesiranje zahteva zmogljivo obdelavo računalniške grafike in kakovosten uporabniški vmesnik, običajno uporabljamo programe, ki omogočajo oboje. Med komercialnimi programi, namenjenim izdelavi numeričnega modela in analiz rezultatov, velja omeniti PATRAN, SDRC I-DEAS, FEMAP (Nastran for Windows) in MEDINA. V zadnjem času pa so pred- in postprocesorji že del CAD sistemov z integrirano možnostjo inženirskih analiz po MKE (CREO Simulate, CATIA, UNIGRAPHICS, COSMOS/Works). [1]

2.2 TIPI ANALIZ

Ker je šel razvoj programskih paketov v zadnjih desetletjih zelo hitro naprej, ti danes omogočajo veliko različnih tipov analiz, ki so naslednji: [2]

Analiza oblikovne ocene (Design Assessment Analysis) – omogoča izbiro in kombinacijo tokovnih rezultatov ter možnost za nadaljnje ocenjevanje rezultatov z možnostjo prilagajanja.

Električna analiza (Electric Analysis) – uporablja se predvsem za analizo oziroma ugotavljanje električnega potenciala v prevodnem telesu, ki nastane zaradi zunanje izpostavljenosti napetostim ali električnemu naboju. Kot rezultat pa lahko dobimo tudi prevajanje električnega toka, električno polje ter Joulovo toploto.

Dinamična analiza (Explicit Dynamics Analysis) – uporablja se za ugotavljanje dinamičnega odziva neke strukture na širjenje napetostnih valov, na udarec ali na hitro spreminjajoča se časovno odvisna bremena.

Linearna dinamična analiza (Linear Dynamic Analysis) – izračunavajo se odzivi konstrukcije na različne dinamične (hitro spreminjajoče) sile ob predpostavki, da je struktura linearna.

Magnetno-statična analiza (Magnetostatic Analysis) – opravimo lahko 3D analizo statičnega magnetnega polja, nastavimo pa lahko tudi različna območja telesa, vključno z železom, zrakom, trajnim magnetom in prevodnikom.

Toga dinamična analiza (Rigid Dynamics Analysis) – uporablja se za določanje dinamičnih odzivov sklopa togih teles, povezanih s sklepi in vzmetmi.

Toplotno-električna analiza (Thermal-Electric Analysis) – omogoča hkratno reševanje toplotnih in električnih polj. To omogoča modeliranje Joulovega ogrevanja odpornih materialov in kontaktov električne prevodnosti kot tudi za elektro-termične Seebeck, Peltier in Thompson učinke.

Tranzitna konstrukcijska analiza (Transient Structural Analysis) – uporablja se za določitev dinamičnega odziva konstrukcije, ki je pod vplivom časovno odvisnih obremenitev.

Tranzitna termična analiza (Transient Thermal Analysis) – s to analizo določamo oziroma ugotavljamo temperature in druge toplotne količine, ki se sčasoma spreminjajo. Zelo uporabna analiza, ko opazujemo porazdelitev temperature v daljšem časovnem obdobju, ohlajanje ali pa porazdelitev toplotnih obremenitev, ki lahko povzročijo okvaro.

Analizi, ki smo jih uporabili v raziskovalni nalogi in ki ju bomo v nadaljevanju podrobneje predstavili, sta statična analiza konstrukcij in statična toplotna analiza.

Statična analiza konstrukcij (Static Structural Analysis) – z njo določamo pomike, napetosti, obremenitve in sile v konstrukcijah (modelih) ali posameznih delih le-teh, ki jih povzročijo bremena, ki ne sprožijo pomembnih notranjih in podajnih učinkov. Predpostavljena sta enakomerna obremenitev in odzivnost strukture. To pomeni, da se bremena in odzivi strukture spreminjajo počasi, v odvisnosti od časa. Vrste obremenitev, ki jih lahko uporabimo pri tej analizi, so:

- zunanja sila in pritisk,
- ravnotežne vztrajnostne sile (gravitacija ali vrtilna hitrost),
- določeni pomiki,
- temperature (za toplotne deformacije).

Statična analiza je lahko tako linearna kot nelinearna. Vsi nelinearni tipi so mogoči – velike deformacije, plastičnost, nelinearna elastičnost itd.

Stacionarna termična analiza (Steady-State Thermal Analysis) – se uporablja za določanje temperature, toplotnih razlik, pretokov toplote in za toplotne tokove v objektih, ki jih povzroča termično breme oziroma so toplotno obremenjeni neodvisno od časa. Analiza izračunava učinke stalnih toplotnih obremenitev v celotnem sestavu ali pa v posameznih delih. Pogosto se ta analiza uporablja za vzpostavitev začetnih pogojev za termično analizo.

Stacionarna termična analiza je lahko linearna, kjer lastnosti materialov ne spreminjamo, ali nelinearna, kjer se lastnosti materialov spreminjajo s temperaturo. Ker se pri večini materialov lastnosti s spremembo temperature spreminjajo, je običajno analiza večkrat nelinearna kot linearna. Na linearnost vpliva tudi učinek sevanja in temperaturno odvisen konvekcijski koeficient (koeficient toplotne prestopnosti). [2]

2.3 PROGRAMSKI PAKETI

2.3.1 SolidWorks

SolidWorks je programski paket za računalniško podprto konstruiranje in inženirske analize. Uporablja se tudi pri enostavnejših simulacijah in inženirskih analizah. V osnovi zajema 3D modelirnik, modul za sestavljanje in modul za izdelavo tehniške dokumentacije. Z mnogimi dodatki je uporaben na različnih tehniških področjih: strojništvo, elektrotehnika, lesarstvo itd.

SolidWorks je zmogljiv in enostaven programski paket. Čeprav ga po zmogljivosti pogosto prekašajo programski paketi, kot so Catia, Unigraphics in Pro/ENGINEER, je zaradi relativno enostavne uporabe zelo priljubljen.

SolidWorks razvija podjetje SolidWorks Corporation, teče pa na operacijskem sistemu Microsoft Windows. Program je bil eden izmed prvih CAD programov, ki je bil zasnovan za ta operacijski sistem. Prva različica je bila predstavljena leta 1993. Podjetje je od leta 1997 v lasti podjetja Dassault Systemes. [9]

SolidWorks temelji na modelirnem jedru Parasolid, ki je v lasti podjetja Siemens PLM Software. Za izdelavo modelov in sestavov uporablja parametrični pristop na osnovi funkcij. Parametri modela so vezani na omejitvene pogoje, katerih vrednosti določajo obliko geometrije modela. Parametri so lahko številski, na primer dolžina črte in premer kroga, ali pa so geometrijski, kot so vzporednost, koncentričnost, vodoravnost, navpičnost itd. Parametri so lahko tudi v relaciji med seboj in na ta način opisujejo želeni dizajn. Preprosteje povedano, če oblikujemo model pločevinke za pijačo, lahko določimo, da bo odprtina vedno na zgornji ploskvi ne glede na višino modela. Tudi če kasneje spremenimo parameter, ki določa višino,

bo še vedno veljalo omenjeno pravilo. Končno podobo 3D modela določa množica funkcij. Med njimi so lahko razne oblike in operacije, ki z uporabo ene za drugo vodijo do želenega rezultata. Načrtovanje se po navadi začne z 2D ali 3D skico, ki vsebuje geometrijske elemente, kot so točke, črte, loki, stožnice in zlepki. Skici nato dodamo novo prostorsko dimenzijo, da določimo velikost in položaj geometrije. Zatem lahko uporabimo tudi že prej omenjene relacije med parametri, če želimo na primer doseči vzporednost dveh ploskev. Parametrična narava SolidWorksa pomeni, da dimenzije in relacije določajo geometrijo in ne obratno. Dimenzije na skici lahko nadzorujemo neodvisno ali pa v relaciji z drugimi parametri znotraj ali izven skice. [8]

2.3.2 Creo

Creo je družina ali komplet programov za računalniško podprto oblikovanje (CAD), ki podpirajo oblikovanje izdelkov za diskretne proizvajalce, razvil pa jih je PTC. Paket je sestavljen iz aplikacij, od katerih vsaka ponuja različne možnosti za uporabniško vlogo v razvoju izdelka.

Creo deluje v operacijskem sistemu Microsoft Windows in ponuja aplikacije za 3D CAD parametrično modeliranje, 3D direktno modeliranje, 2D ortografske poglede, analizo in simulacije končnih elementov, shematično oblikovanje, tehnične ilustracije ter ogled in vizualizacijo. [7]

2.3.3 Ansys

Ansys Inc. je ameriško javno podjetje s sedežem v Canonsburgu v Pensilvaniji. Razvija in trži programsko opremo za simulacijo inženiringa. Programska oprema Ansys se uporablja za načrtovanje izdelkov in polprevodnikov ter za ustvarjanje simulacij, ki preizkušajo trajnost izdelka, porazdelitev temperature, gibanje tekočine in elektromagnetne lastnosti.

Ansys je leta 1970 ustanovil John Swanson, ki je svoje zanimanje za podjetje prodal tveganim kapitalistom leta 1993. Ansys je javno objavil NASDAQ leta 1996. V 21. stoletju je Ansys opravil številne pridobitve drugih podjetij za oblikovanje inženirjev, nabavil dodatno tehnologijo za dinamiko tekočin, oblikovanje elektronike in druge fizikalne analize.

Ansys razvija in trži programsko opremo za analizo končnih elementov, ki se uporablja za simulacijo inženirskih težav. Programska oprema ustvarja simulirane računalniške modele struktur, elektronike ali strojnih komponent, da simulirajo moč, žilavost, elastičnost, porazdelitev temperature, elektromagnetizem, pretok tekočine in druge lastnosti. Ansys se

uporablja za določitev, kako bo izdelek deloval z različnimi specifikacijami, ne da bi pri tem gradil poskusne izdelke ali izvajal trke. Na primer programska oprema Ansys lahko simulira, kako bo most zdržal po letih prometa, kako najbolje obdelati lososa v konzervi za zmanjšanje odpadkov ali kako oblikovati tobogan, ki uporablja manj materiala, ne da bi pri tem žrtvoval varnost.

Večina simulacij Ansys se izvaja s programsko opremo Ansys Workbench, ki je eden glavnih izdelkov podjetja. Uporabniki podjetja Ansys običajno razdelijo večje strukture na majhne sestavne dele, ki se modelirajo in preizkušajo posebej. Uporabnik lahko začne z določitvijo dimenzij predmeta in nato doda težo, tlak, temperaturo in druge fizične lastnosti. Nazadnje program Ansys sčasoma simulira in analizira gibanje, utrujenost, zlome, pretok tekočine, porazdelitev temperature, elektromagnetno učinkovitost in druge učinke.

Ansys razvija tudi programsko opremo za upravljanje in varnostno kopiranje podatkov, akademske raziskave in poučevanje. [6]

2.3.4 Abaqus

Abaqus je programska oprema za analizo končnih elementov in računalniško podprto inženirstvo, ki je bila ustanovljena leta 1978. Ustanovitelji podjetja Abaqus so bili David Hibbitt, Bengt Karlsson in Paul Sorensen s prvotno imenovanim podjetjem Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. Pred prevzemom podjetja s strani podjetja Dassault Systemes je bil leta 2005 preimenovan v sedanji Abaqus.

Abaqus se uporablja v avtomobilski, letalski in vesoljski industriji. Zelo je priljubljen v akademskih in raziskovalnih institucijah, prav zaradi njegovega širokega spektra uporabe materialov in zmožnosti prilagoditve programa.

Abaqus /CAE je zmožen predprocesiranja, postprocesiranja in vizualizacije rezultatov, čeprav je prvi sklop lahko narejen tudi v drugem CAD programu. [3]

3 STATIČNA ANALIZA L-KOTNIKA

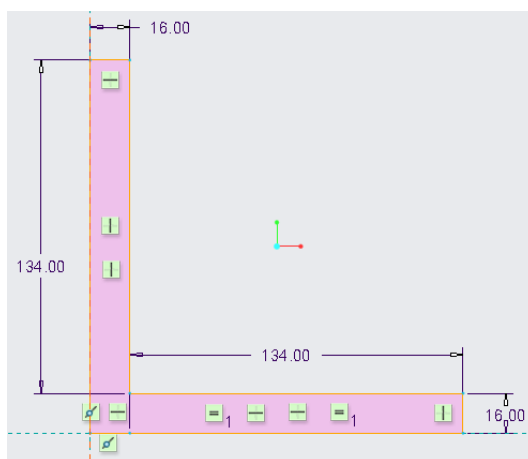
3.1 PRIPRAVA MODELA

Za modeliranje smo uporabljali programski paket Creo 5.0. Modelirali pa smo že obstoječ model standardnega L-kotnika.

L-kotnik smo zmodelirali po realnih merah, izbranih iz Krautovega strojniškega priročnika. Mere $b*b*d$ izbranega standardnega L-kotnika so znašale $150*150*14(16)$. V sledečih primerjavah smo se odločili, da bomo narisali L-kotnik z 8 mm radijem zaokrožitve. Tako smo se izognili ostremu robu, ki bi lahko pokvaril stvarno sliko simulacij. V CAD programih lahko namreč narišemo geometrijsko pravilen oster rob, takšnega, ki v naravi ne obstaja. Ko bi tak L-kotnik obremenili na upogib, bi se v tem robu koncentrirale neskončne napetosti in bi z zgoščanjem mreže napetosti vse bolj rasle. Takšen rezultat ni realen in ga tudi ne bi bilo relevantno primerjati med programskimi paketi, zato smo ga izključili. L-kotnik smo narisali v programskem oknu Part, kjer smo tudi kasneje modelirali posamezne dele.

3.2 MODELIRANJE L-KOTNIKA

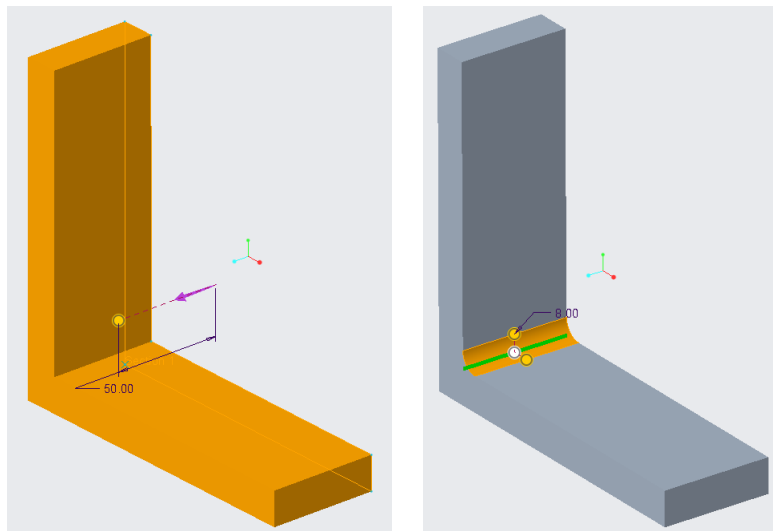
Ko smo izbrali programsko okno Part, smo najprej v okolju Sketch L-kotnik narisali v stranskem risu 2D projekcije (Slika 2).



Slika 2: Stranski ris L-kotnika

Z dvema pravokotnikoma smo naredili zunanjo konturo ustreznih dimenzij, nato pa odvečne črte pobrisali z ukazom Delete segment tako, da se nam je skica obarvala roza. To je pomenilo,

da je skica homogena in jo lahko oblikujemo dalje. Ker smo želeli 3D model, smo ga s funkcijo Extrude izvlekli v prostor. Pri tem smo izbrali dolžino 50 mm (Slika 3 – levo).



Slika 3: Izvlek v prostor in radij zaokrožitve

Nato smo še samo s funkcijo Round naredili ustrezen radij zaokrožitve (Slika 3 – desno), v tem primeru 8 mm. Ukaz v oknu Round smo potrdili in dobili zmodeliran L-kotnik. Zaradi lažjega manipuliranja z modeli med programskimi paketi smo model shranili v splošno obliko Step, ki jo prepoznajo vsi programi. Ko smo model shranili, nam je na koncu imena modela dodalo kratico .stp, kar je pomenilo, da je shranjen v obliki Step.

3.3 PRIPRAVA ANALIZE L-KOTNIKA

Pri L-kotniku so nas zanimala upogibne napetosti, zato smo preizkuse na modelu v vseh programskih paketih opravljali v okolju za splošne oziroma statične simulacije.

Za primerjavo in preračun oziroma analizo po metodi končnih elementov smo izbrali programske pakete Solidworks 2019, Ansys 2019 R2, Abaqus 2017 in Creo 5.0. Vsak program je sestavljen iz modulov, v katerih modelu predpišemo določene značilnosti, ki jih nato uporabi v preračunu.

Za material L-kotnika smo izbrali material AISI 304 ali po evropskem standardu X5CrNi18-10 oziroma po številski označbi materiala 1.4301. Gre za najbolj razširjeno nerjaveče jeklo, ki ima dobro kombinacijo trdnosti in korozijske obstojnosti. [4] Glavni lastnosti materiala, ki smo jih pri preračunih potrebovali, sta bili modul elastičnosti E (Youngs Modulus E) in Poissonovo število ν (Poisson's Ratio ν). Da je primerjava čim bolj relevantna, smo določili enotno velikost

osnovnih končnih elementov, ki je znašala 8 mm. Prav tako smo določili tudi enotno zgoščevanje, in sicer za faktor 2, torej so bila zgoščevanja 4 mm, 2 mm in 1 mm velikosti končnih elementov.

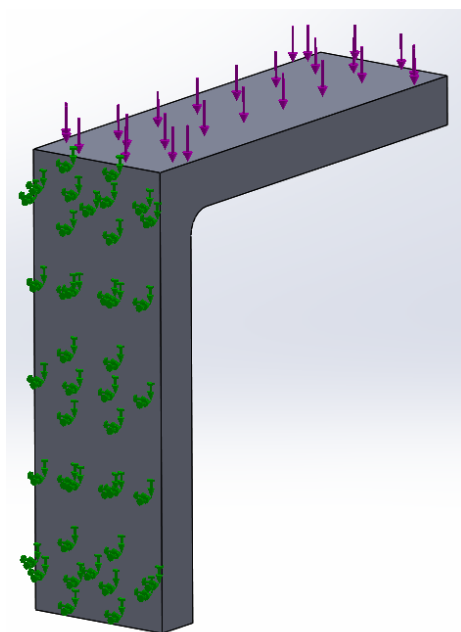
3.4 ROBNI POGOJI IN LASTNOSTI MATERIALA

Lastnosti materiala

- Poissonovo število: 0,29
- Modul elastičnosti: 190000 MPa

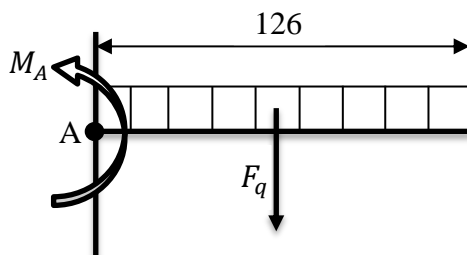
Robni pogoji

- Sila na zgornjo ploskev L-kotnika: 1000 N
- Stranska ploskev L-kotnika fiksno vpeta, onemogočene rotacije ali pomiki



Slika 4: Obremenitev in vpetje na L-kotniku

3.4.1 Analitična analiza L-kotnika



$$\sum M_A = 0$$

$$M_A - F_q \cdot \frac{126}{2} = 0$$

$$M_A = \frac{F_q \cdot 126}{2} = \frac{1000 \cdot 126}{2} = 63000 \text{ Nmm}$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{min}}$$

$$W_{min} = \frac{I}{e}$$

$$I = \frac{a \cdot b^3}{12} = \frac{50 \cdot 16^3}{12} = 17066,67 \text{ mm}^4$$

$$W_{min} = \frac{I}{e} = \frac{17066,67}{8} = 2133,33 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{min}} = \frac{63000}{2133,33} = 29,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pred numeričnimi analizami smo najprej naredili analitični preračun, da smo videli, kakšne rezultate pričakovati in koliko se bo razlikoval od računalniškega preračuna. Preračun smo si poenostavili, in sicer s konzolnim nosilcem z dolžino, ki ustreza kraku L-kotnika, ki mu odštejemo dolžino zaokrožitve ($134 - 8 = 126$). Z F_q pri tem nadomestimo kontinuirano obremenitev na zgornjo ploskev, M_A pa predstavlja vpetostni moment. Napetost, ki pri tem nastane v materialu, je 29,53 MPa.

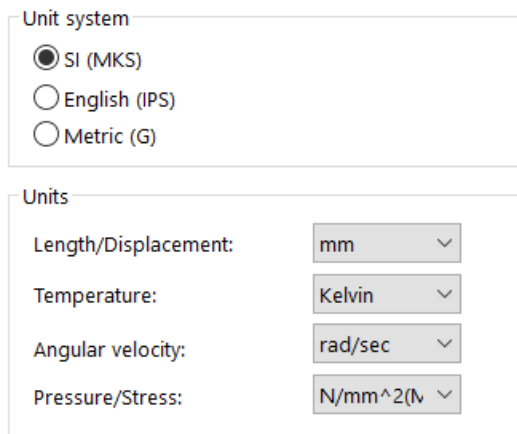
3.5 SOLIDWORKS

3.5.1 Uvoz modela

Ker je bil za modeliranje uporabljen drug program kot Solidworks, smo ga najprej uvozili. To smo naredili tako, da smo v začetnem oknu izbrali Open, v naslednjem pa smo izbrali vrsto datoteke Step in nato poiskali model L-kotnika na mestu, kjer smo ga shranili v računalniku. S potrditvijo smo model uvozili.

3.5.2 Nastavitev enot

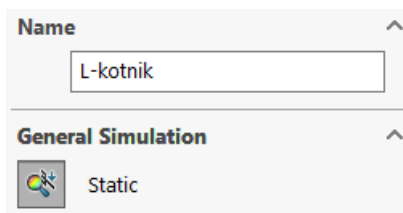
Ko smo model uvozili, smo lahko najprej v programu zagnali diagnostiko, če so se kakšni detajli izgubili med uvozom. Ko smo to naredili, smo najprej nastavili enote tako, da smo v pravilni vrstici zavihkov izbrali *Simulation/Options/Default Options/Units* in jih nastavili (Slika 5).



Slika 5: Nastavitev enot

3.5.3 Definicija nove statične analize

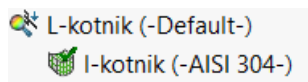
Definirali smo novo analizo. Pod tip analize smo izbrali Static in jo poimenovali L-kotnik (Slika 6).



Slika 6: Tip analize

3.5.4 Določitev materialnih lastnosti

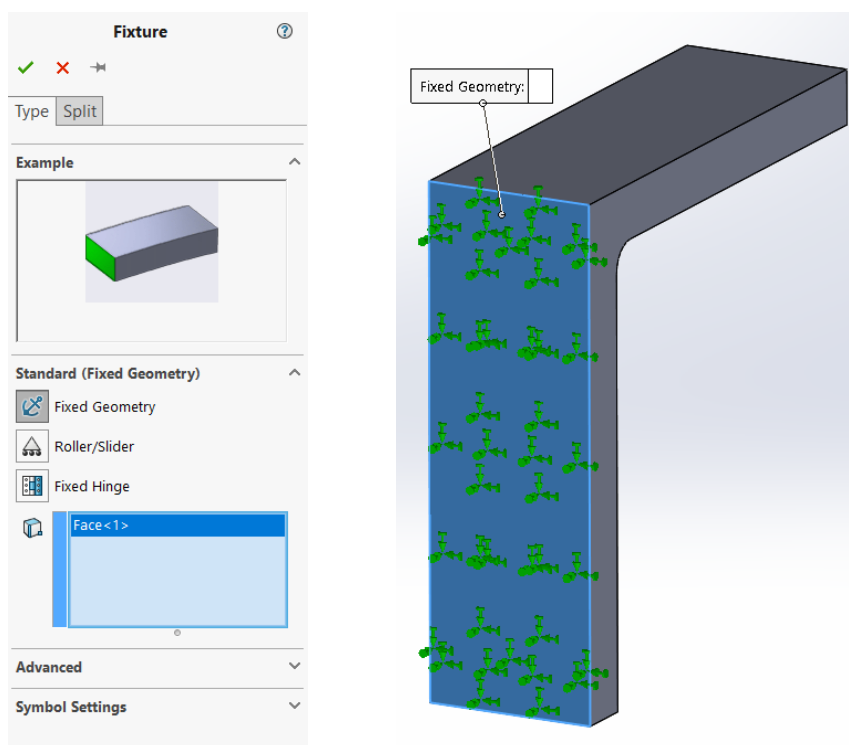
V simulacijskem drevesu smo pod L-kotnik, v knjižnici, kjer so bili zbrani vsi materiali, izbrali nerjaveče jeklo AISI 304 in ga potrdili. V simulacijskem drevesu se je poleg imena L-kotnik izpisal tudi material (Slika 7).



Slika 7: Izpis materiala v drevesni strukturi

3.5.5 Določitev vpetja

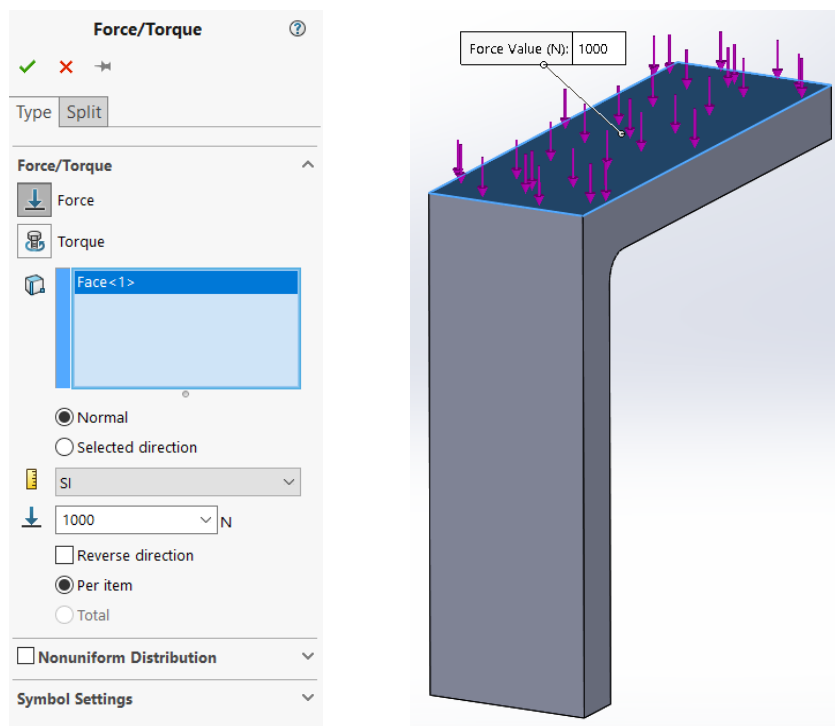
Na simulacijskem drevesu smo izbrali modul Fixtures in nato fiksno geometrijo. Na modelu smo označili celo zadnjo stran L-kotnika (Slika 8).



Slika 8: Določitev vpetja

3.5.6 Določitev obremenitve

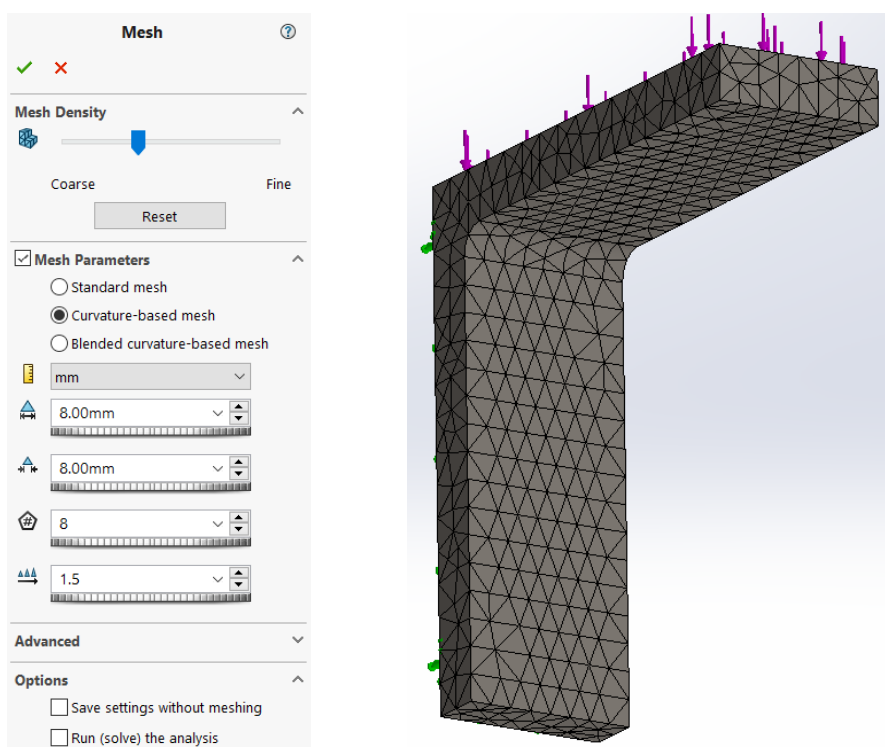
V simulacijskem drevesu smo izbrali modul External Loads in nato Force. Na modelu smo označili celo zgornjo stran in za vrednost sile vpisali 1000 N (Slika 9).



Slika 9: Določitev obremenitve

3.5.7 Mreženje

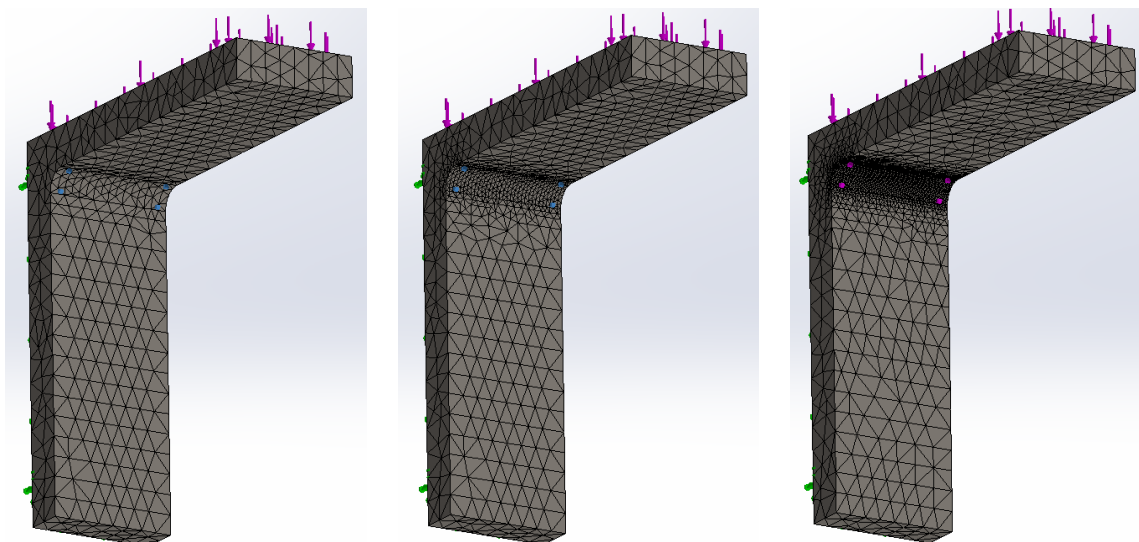
Za mreženje smo v simulacijskem drevesu izbrali modul Mesh in nato Create Mesh. Za elemente smo izbrali tetraedre in tip mreže Curvature Mesh, kar je pomenilo, da bo računalnik okrog radija prilagodil gostoto mreže. Globalno vrednost elementov smo nastavili na velikost 8 mm, prav tako tudi minimalno vrednost elementov (Slika 10).



Slika 10: Mreženje modela

3.5.8 Zgoščevanje mreže

Da smo se končnemu rezultatu čim bolj približali, smo v predelu, kjer se je pojavila koncentracija napetosti, mrežo zgoščili z uporabo funkcije Mesh Control. Funkcija je zelo uporabna, ko želimo natančnejši rezultat v predelu, kjer predpostavimo, da bo napetost največja, medtem ko na preostalem delu modela pustimo večjo mrežo, da izračun ni prezahteven za računalnik. Prvo študijo smo trikrat kopirali in v predelu zaokrožitve velikost elementov spremenili na vrednost 4 mm, nato 2 mm in nazadnje na 1 mm. Razmerje nismo spreminjali (Slika 11).

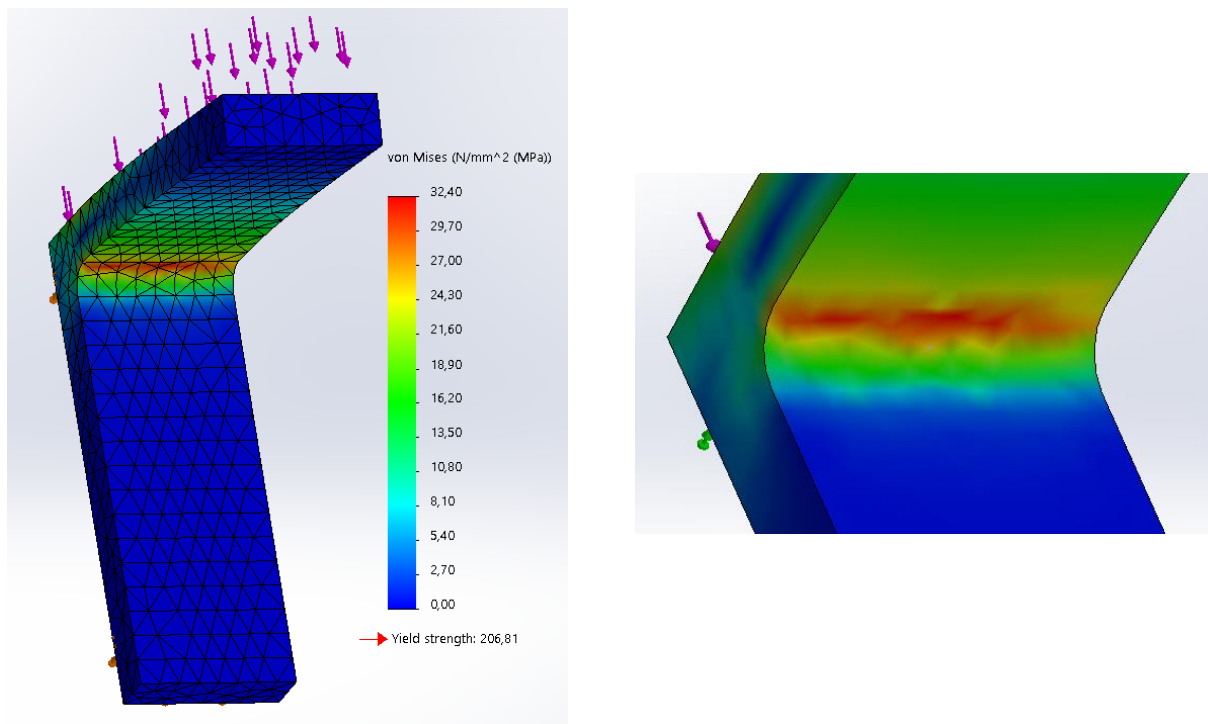


Slika 11: Različne zgostitve mrež

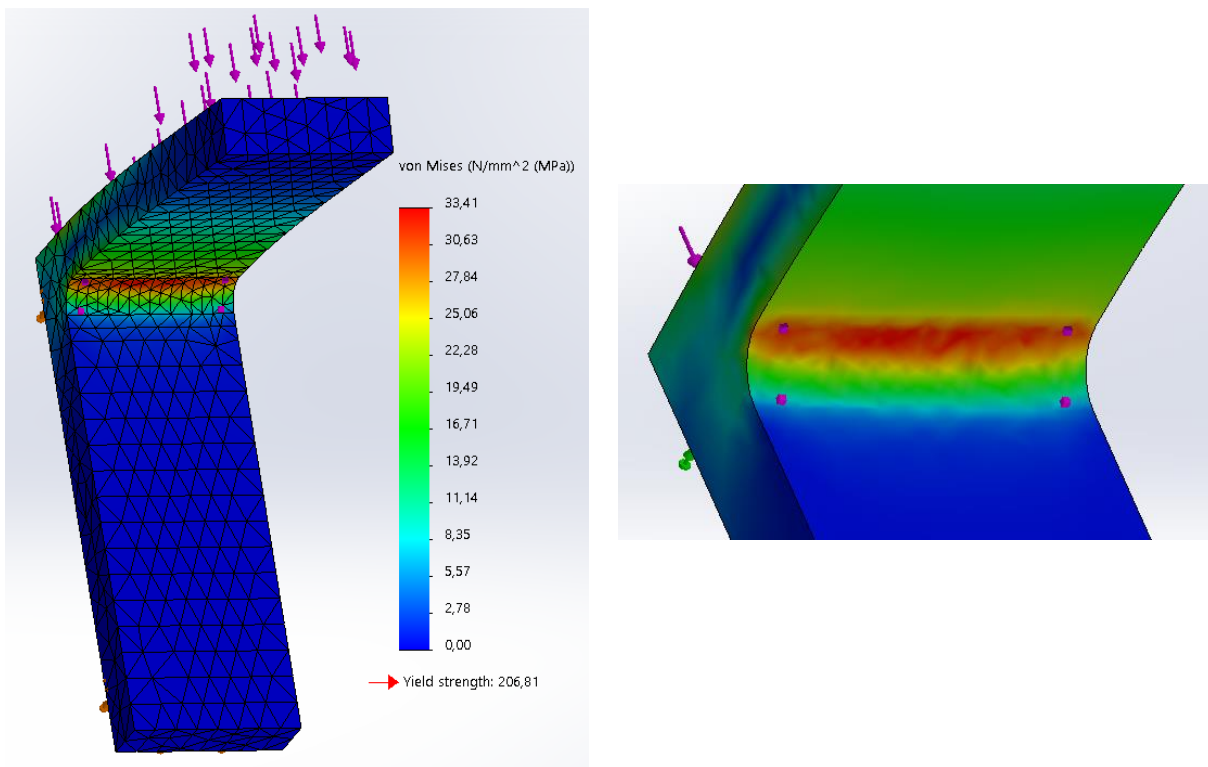
Ko smo imeli modele v vseh študijah zamrežene, smo v zgornji vrstici izbrali Run This Study in iz menija nato Run All Studies, da smo zagnali vse študije naenkrat.

3.5.9 Analiza rezultatov

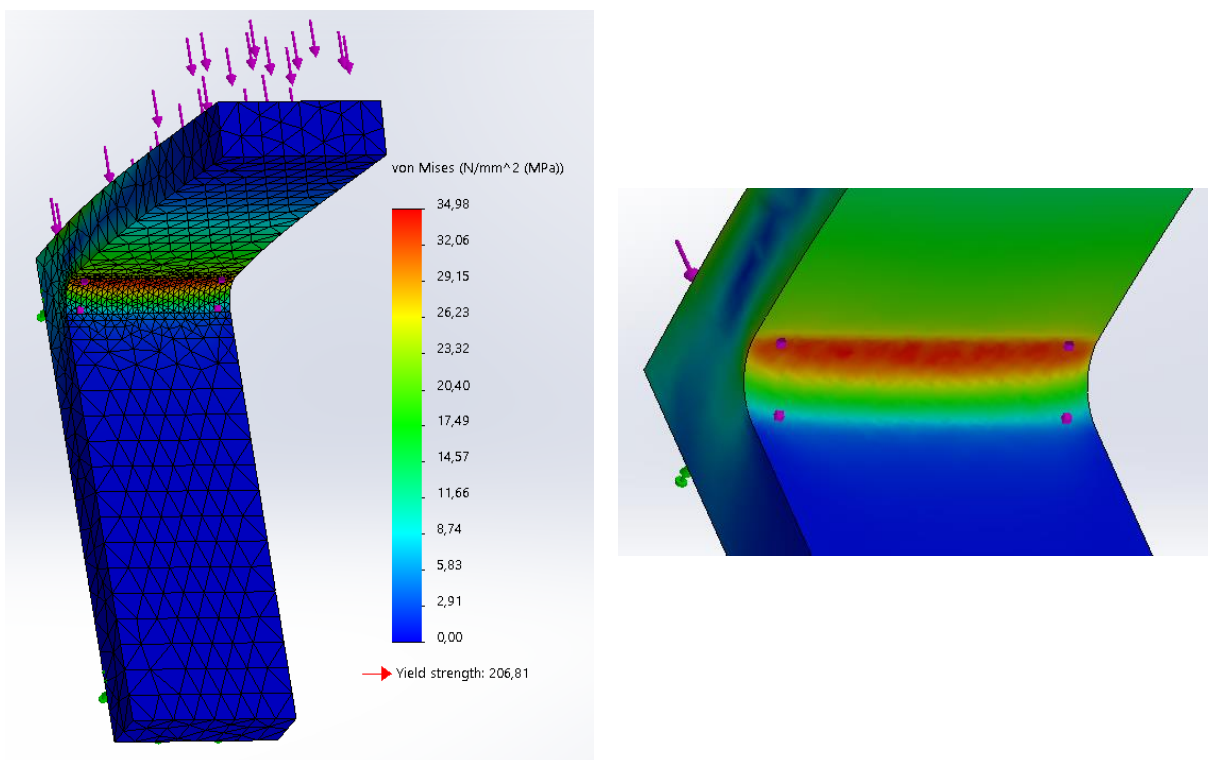
Ker so nas zanimalo samo, kakšne napetosti se pojavijo v modelu, smo primerjali le von Misesove napetosti. V nadaljevanju je grafični prikaz teh napetosti.



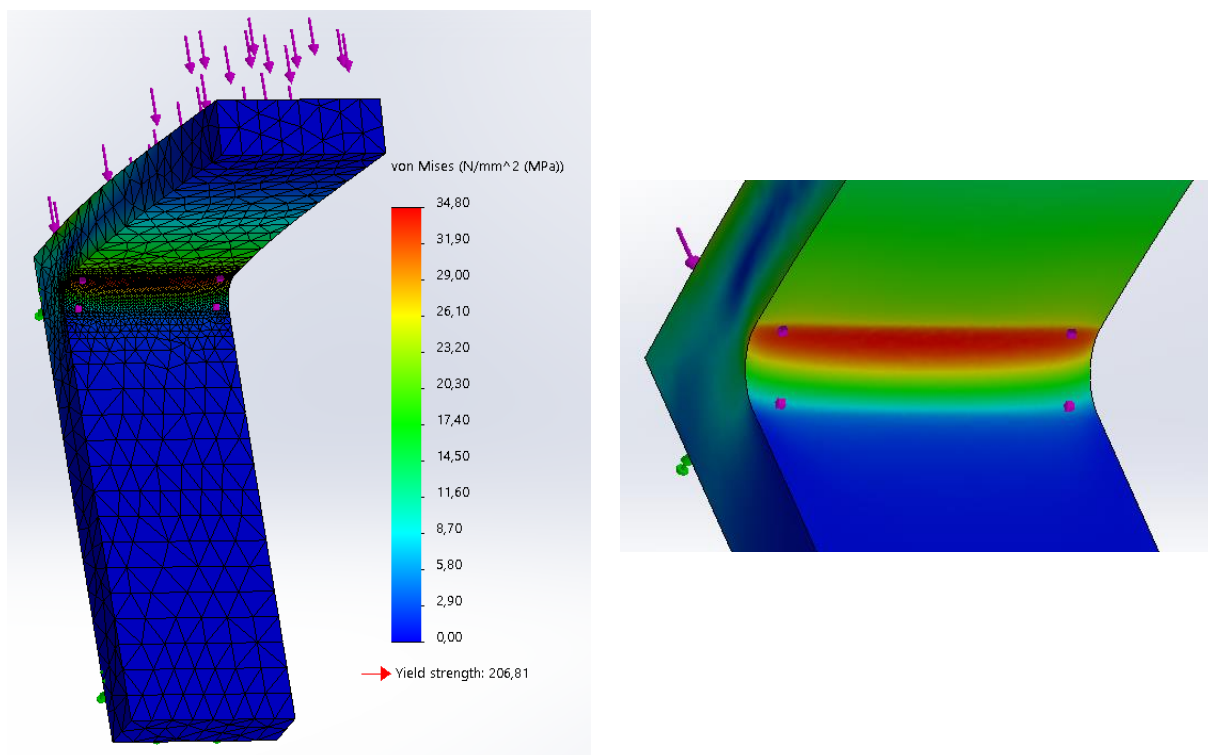
Slika 12: Mreža 1 (napetost)



Slika 13: Mreža 2 (napetost)



Slika 14: Mreža 3 (napetost)



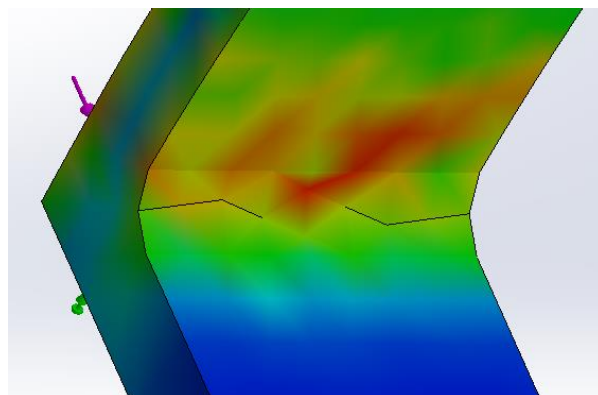
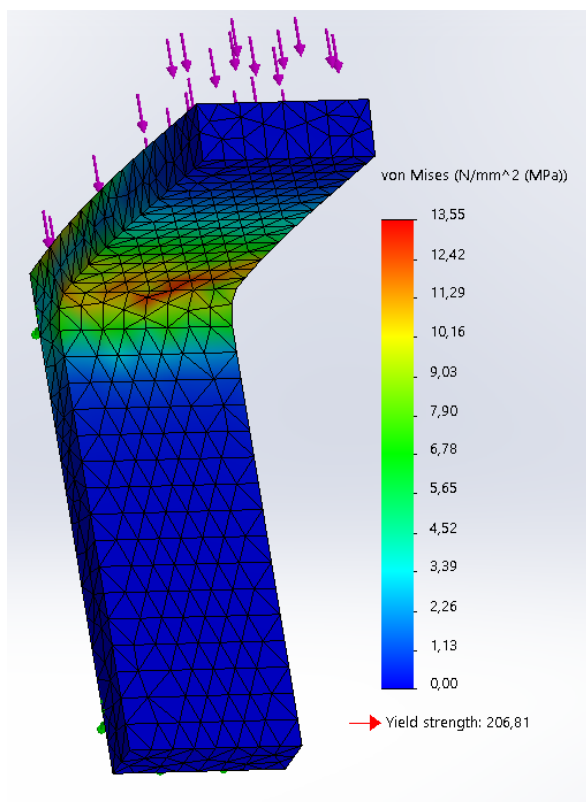
Slika 15: Mreža 4 (napetost)

3.5.10 Ponovno mreženje

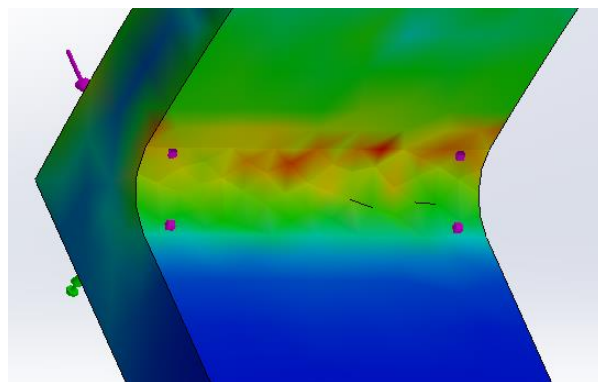
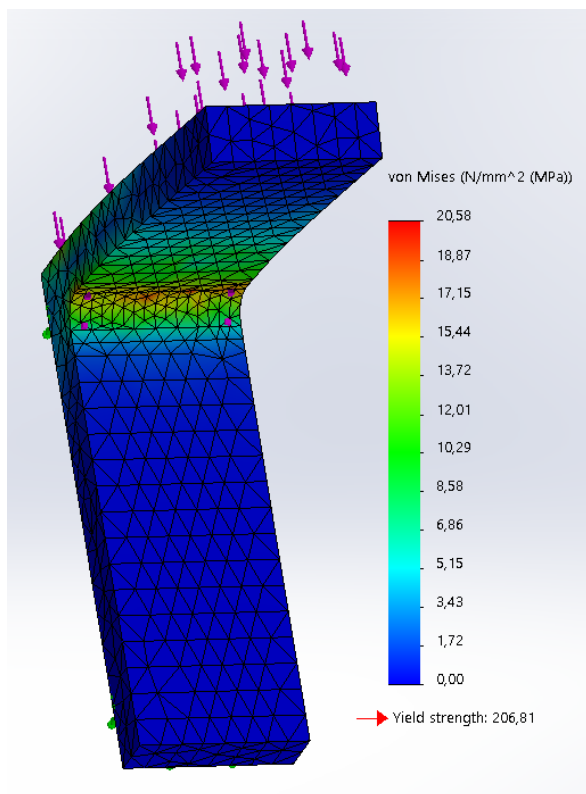
Modele vseh konfiguracij smo ponovno zamrežili, ker nas je zanimalo, kakšen vpliv na končen rezultat ima stopnja reda interpolacijskih funkcij. Tokrat smo v modulu Mesh, Draft Quality Mesh obkljukali, kar je pomenilo, da so bile pri izračunih uporabljene linearne interpolacijske funkcije. Natančnost analize slabša je bila slabša, vendar se je večala z gostoto mreže. Nato smo ponovno zagnali vse študije v meniju Run All Studies.

3.5.11 Analiza rezultatov ponovnega mreženja

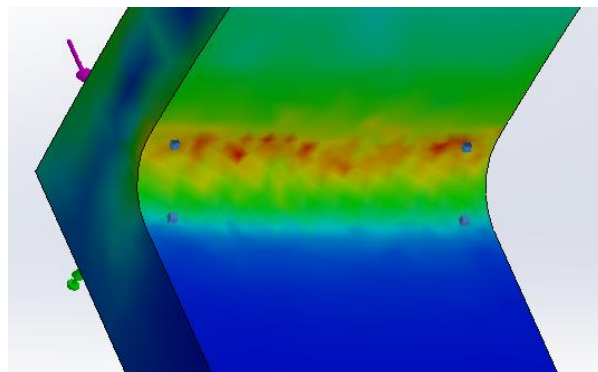
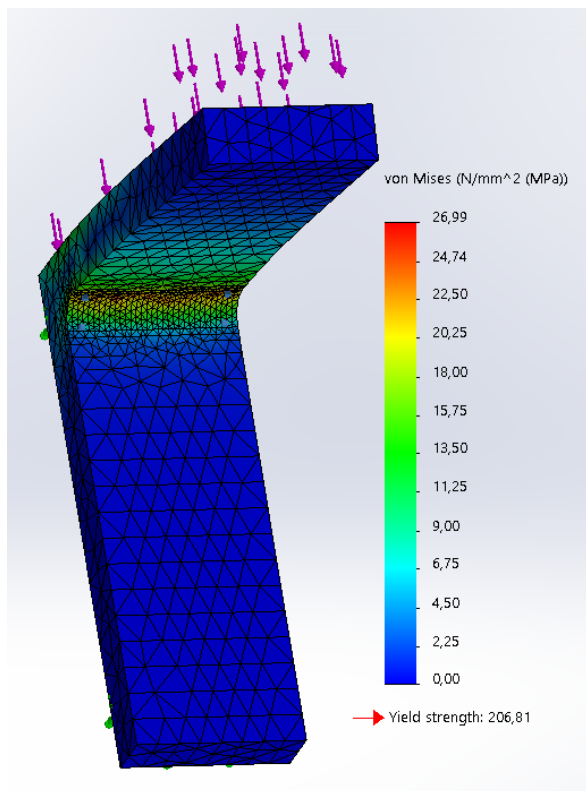
Naslednje slike grafično prikazujejo von Missove napetosti vseh štirih primerov s funkcijo Draft Quality Mesh.



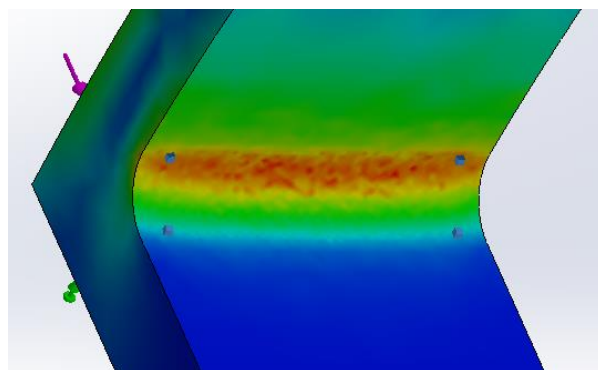
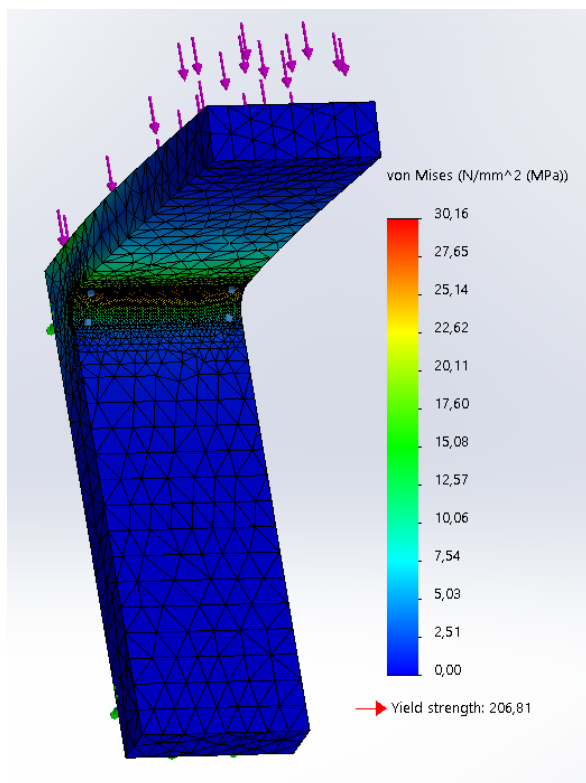
Slika 16: Mreža 1 (Draft napetost)



Slika 17: Mreža 2 (Draft napetost)



Slika 18: Mreža 3 (Draft napetost)



Slika 19: Mreža 4 (Draft napetost)

3.5.12 Primerjava in analiza rezultatov v programu Solidworks

Tabela 1: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Solidworksu

Mreža	Napetost [MPa] (kvadratna interpolacija)	Razlika [%]	Napetost [MPa] (linearna interpolacija – Draft)	Razlika [%]
Mreža 1 (8 mm)	32,40	/	13,55	/
Mreža 2 (4 mm)	33,41	3,12	20,58	51,88
Mreža 3 (2 mm)	34,98	7,96	26,99	99,19
Mreža 4 (1 mm)	34,80	7,41	30,16	122,58

V Solidworksu je bila priprava simulacije zelo enostavna in logična. V štirih korakih smo izpolnili vse potrebne podatke, da je računalnik lahko nato študijo numerično preračunal. Povprečno je za mreženje in preračune, tudi pri najgostejši mreži, potreboval približno sekundo, kar je bilo zelo hitro. Najgostejša mreža je imela 11079 elementov in 17972 vozlišč, največjo napetost, 34,98 MPa, pa je pokazala mreža s 7959 elementi in 12876 vozlišči. Največja razlika pri kvadratni interpolacijski funkciji je znašala 7,96 %, kar je zelo malo, pri linearni interpolacijski funkciji pa 122,58 %, kar je že precej veliko. Razlika med najmanjšo in največjo napetostjo je znašala 158,5 % oziroma 21,43 MPa (Tabela 1). Z analizo smo ugotovili tudi, da linearni elementi v mreži dajejo slabe rezultate, če le-ti niso dovolj majhni oziroma ni mreža dovolj gosta.

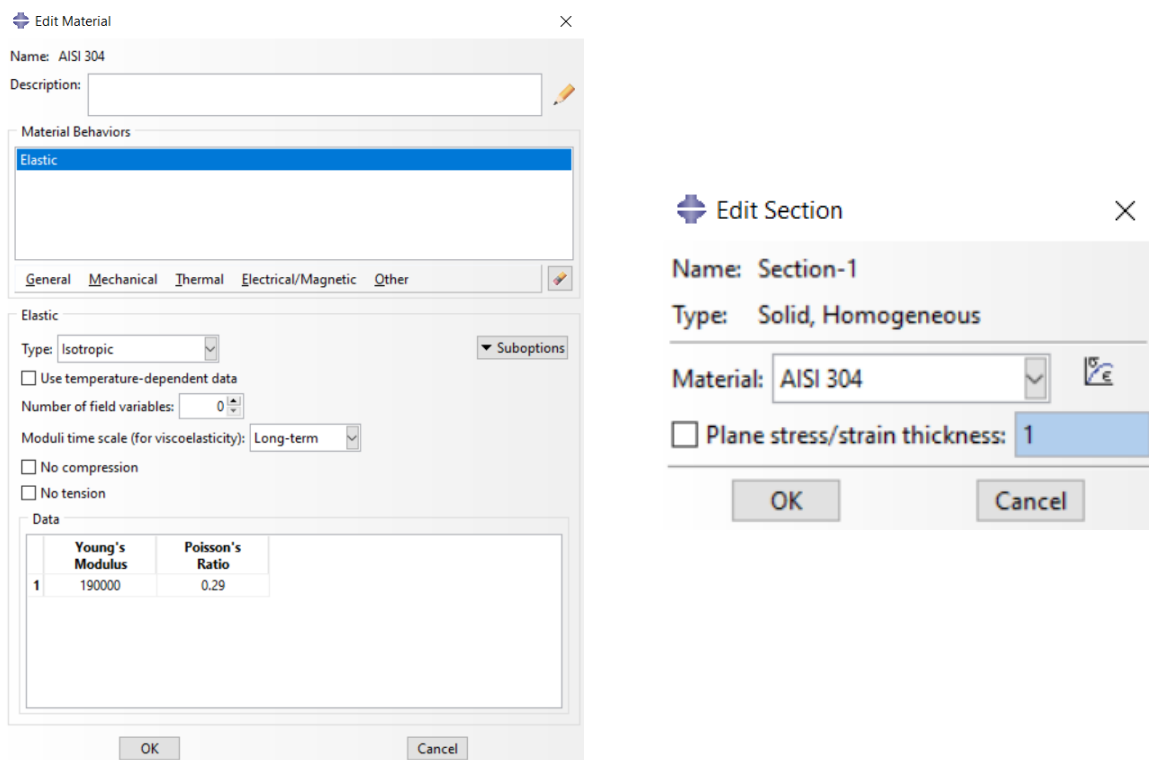
3.6 ABAQUS

3.6.1 Uvoz modela

Po odprtju programa smo morali model najprej uvoziti v program Abaqus. To smo naredili tako, da smo v zavihku File izbrali Import ter nato Part. V oknu, ki se je odprlo, smo izbrali vrsto datoteke STEP in poiskali datoteko L-kotnik, ki smo jo shranili v programu Creo. S potrditvijo smo uvozili model.

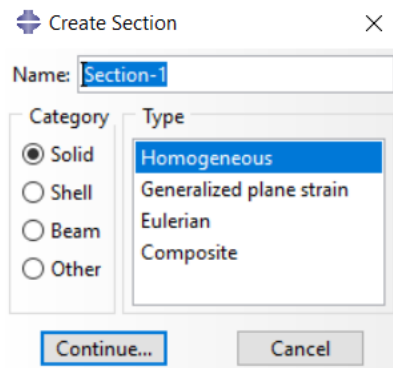
3.6.2 Določitev materialnih lastnosti

Z znanimi podatki smo modulu Property z ukazom Create Material dodali material in ga poimenovala AISI 304. V zavihku Mechanical smo izbrali Elasticity in nato Elastic, kar je pomenilo, da se je model elastično deformiral. V spodnja okenca smo nato vpisali zgoraj navedena parametra, s katerima smo določili karakteristiko materiala (Slika 20).



Slika 20: Določitev materialnih lastnosti

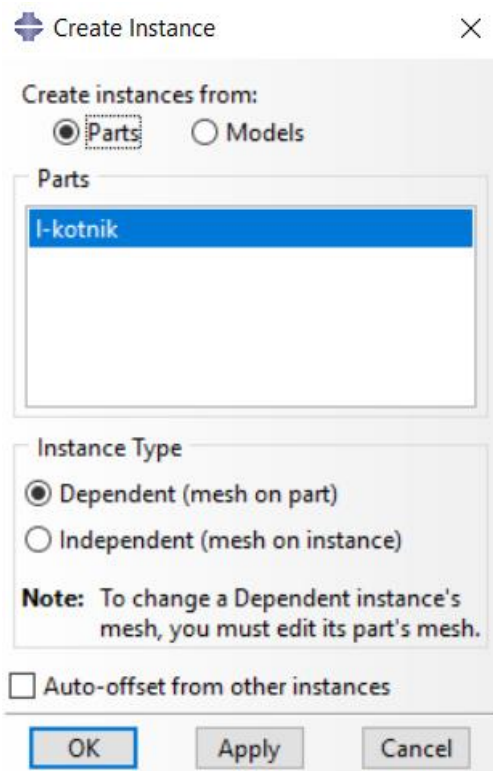
S potrditvijo smo materialu določili potrebne lastnosti. Nato smo ga s pomočjo kreiranja in dodajanja sekcije predpisali tudi L-kotniku (Slika 21).



Slika 21: Dodajanje lastnosti L-kotniku

3.6.3 Povezovanje delov

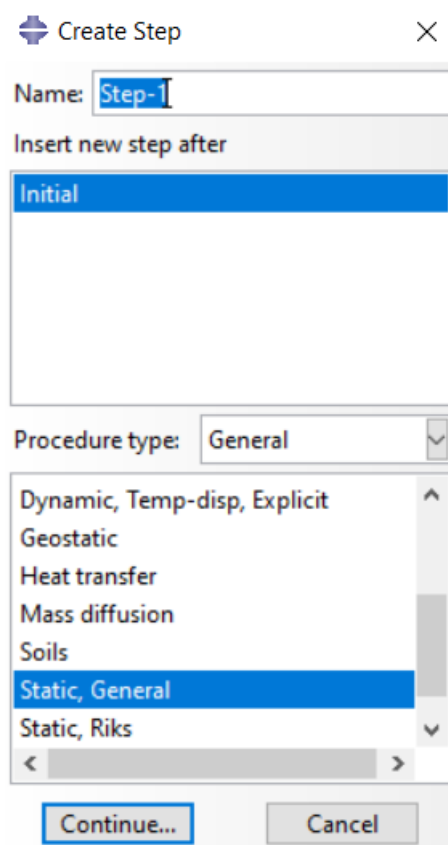
V modulu Assembly z ukazom Create Instance dodamo dele in njihove korelacije, če jih model vsebuje. V našem primeru smo označili cel L-kotnik in potrdili ukaz (Slika 22).



Slika 22: Povezovanje delov

3.6.4 Določitev vrste analize

Ključni korak je tudi določitev analize. Izbiramo lahko med več vrstami: statično, termalno, geostatično itd. Tokrat smo izbrali statično analizo. Izbrali smo jo tako, da smo v modulu Step z ukazom Create Step ustvarili nov korak. Nato pa smo v okencu Procedure type izbrali General in spodaj v seznamu Static, General (Slika 23).



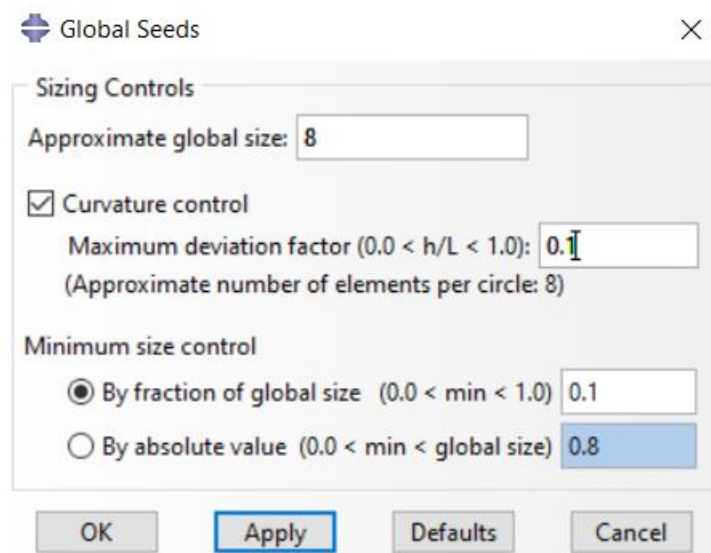
Slika 23: Določitev statične analize

3.6.5 Mreženje

V modulu Mesh določimo lastnosti mreže in nato model tudi zamrežimo. Uporabili smo predpisane mreže in tudi zgoščevanja. Tokrat smo najprej model zamrežili z globalno vrednostjo elementov 8 mm, nato pa zgoščevali mrežo v predelu radija za faktor 2, enako kot v prejšnjih programskih paketih.

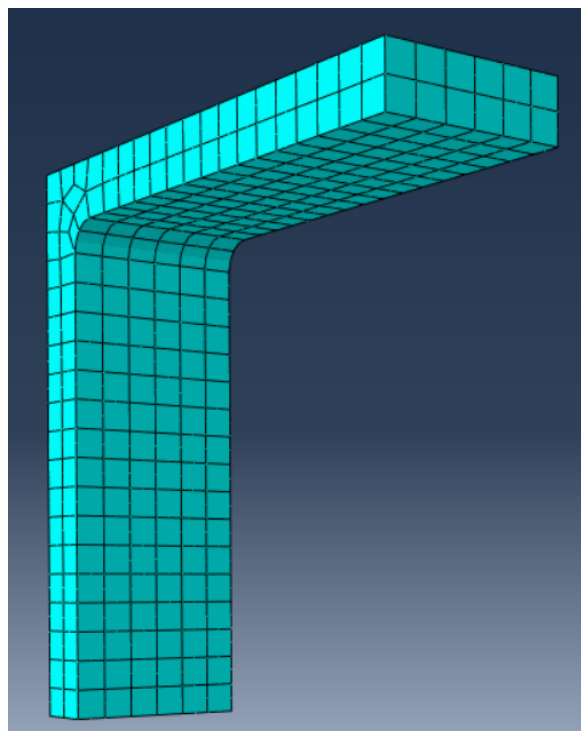
Pri vseh primerih, kjer smo uporabili navadno in ne strukturirano mrežo, smo za elemente uporabili 8-vozlíščne heksaedre in linearno interpolacijsko funkcijo. Razen pri zadnjem primeru (mreža v predelu radija je bila zgoščena na 1 mm), kjer bi moral hipotetično priti najbolj točen rezultat, smo uporabili kvadratno interpolacijsko funkcijo z 20-vozlíščnimi heksaedri in tako iz te mreže »potegnili« maksimalno »pravilen« rezultat.

Globalno mrežo na modelu smo predpisali tako, da smo izbrali ukaz Seed Part Instance in nato v okence Approximate global size vpisali velikost delcev 8 (Slika 24).



Slika 24: Globalna vrednost mreže

Nato smo z ukazom Mesh Part Instance zamrežili model, ki je z globalno mrežo velikosti 8 izgledal, kot prikazuje naslednja slika (Slika 25).

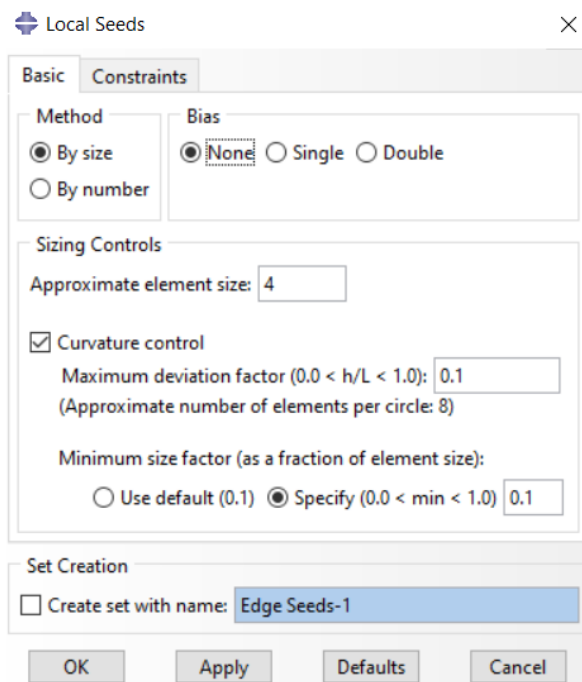


Slika 25: Mreža, aplicirana na L-kotniku

3.6.6 Zgoščevanje mreže

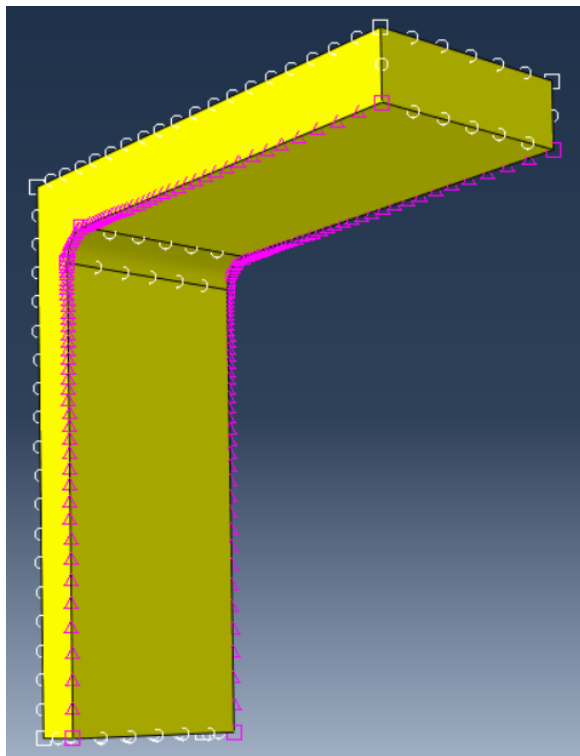
Da smo se z rezultatom čim bolj približali, smo v predelu radija zgoščevali mrežo za faktor 2. Na prvem primeru je velikost delcev 4 mm, na drugem 2 mm in na zadnjem 1 mm.

Po kliku na ukaz Seed Edges smo izbrali robova ob zaokrožitvi, kjer je bila zgostitev mreže, in v okence Approximate element size vpisali vrednosti 4, nato 2 in nazadnje 1 (Slika 26).



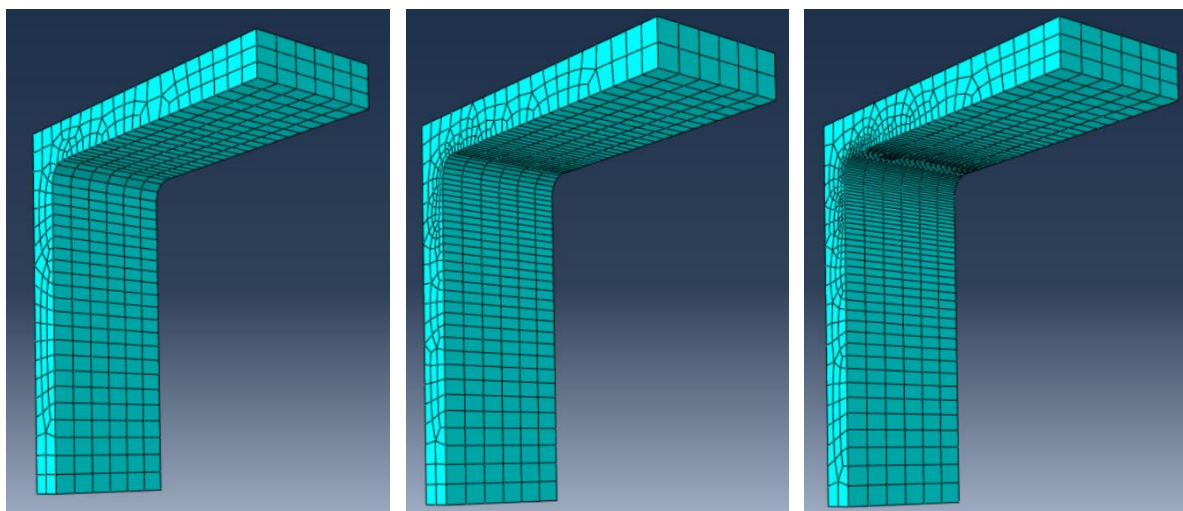
Slika 26: Zgoščevanje mreže na robovih zaokrožitve

Na vzdolžnih robovih, ki potekajo od zaokrožitve do vsakega konca, smo v mreži naredili prehod od vrednosti zgostitve v zaokrožitvi do konca roba, kjer je velikost končnega elementa znašala 8. Tukaj smo se izognili trdemu prehodu iz velikosti zgostitve, na primer 1 na ostalo globalno velikost 8, s funkcijo Bias. Prehod je viden na spodnji sliki kot vijolični trikotniki (Slika 27).



Slika 27: Zgoščevanje mreže na robu s funkcijo Bias

Po generiranju mreže je na modelu izgledalo, kot prikazuje naslednja slika (Slika 28).

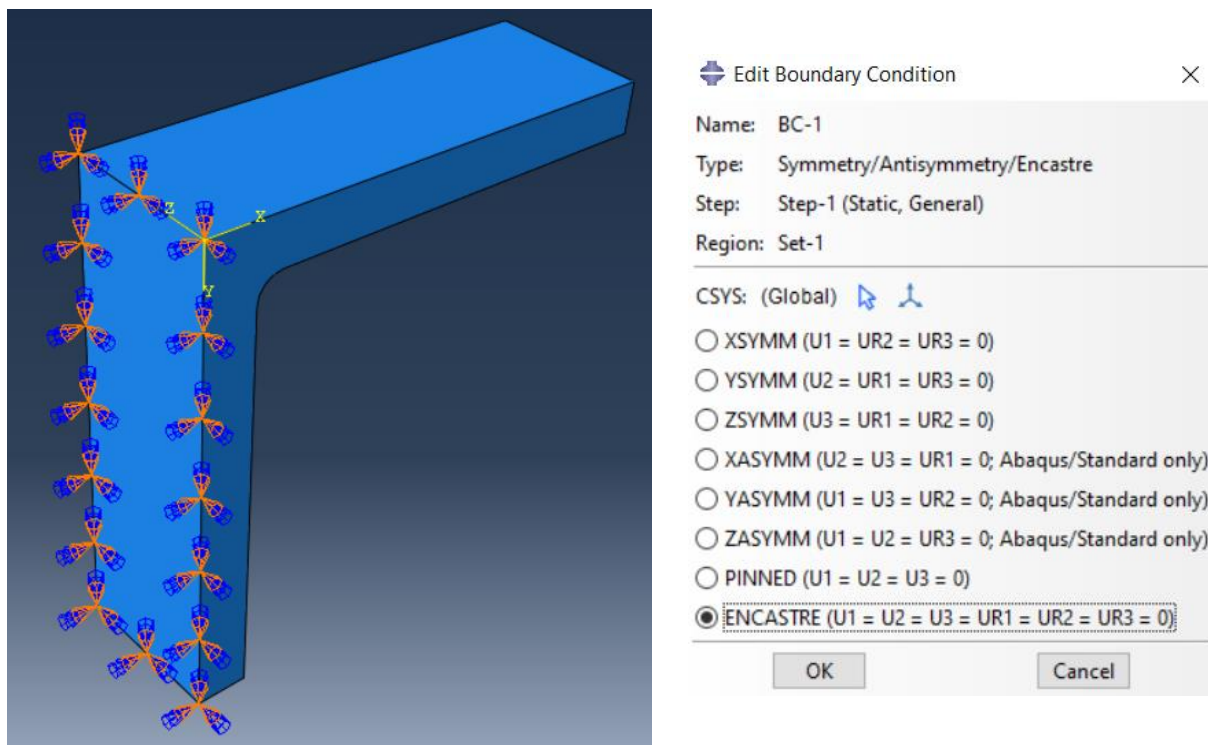


Slika 28: Različne zgostitve mrež

3.6.7 Določitev vpetja

Mesto vpetja na modelu smo določili z ukazom Create Boundary Condition in nato v okencu Types for selected Step izbrali Symmetry/Antisymmetry/Encastre. Po potrditvi smo izbrali celo

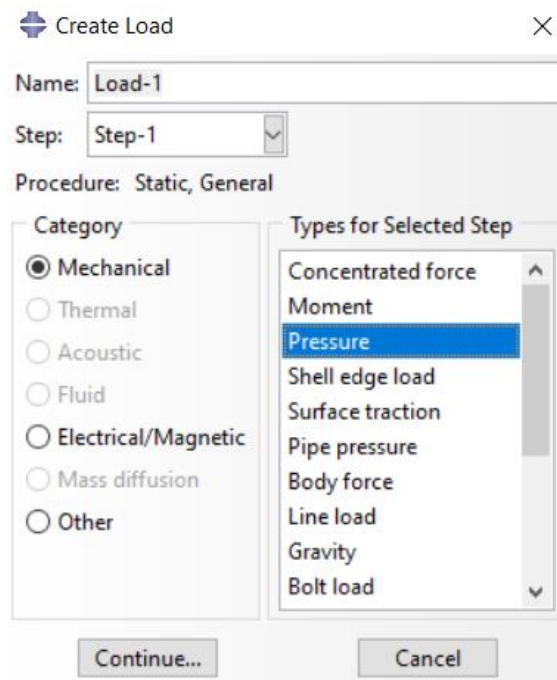
zadnjo stran kot mesto vpetja in izbrali v oknu Edit Boundary Condition možnost ENCASTRE, kar je pomenilo, da so bili vsi pomiki ali rotacije omejeni (Slika 29).



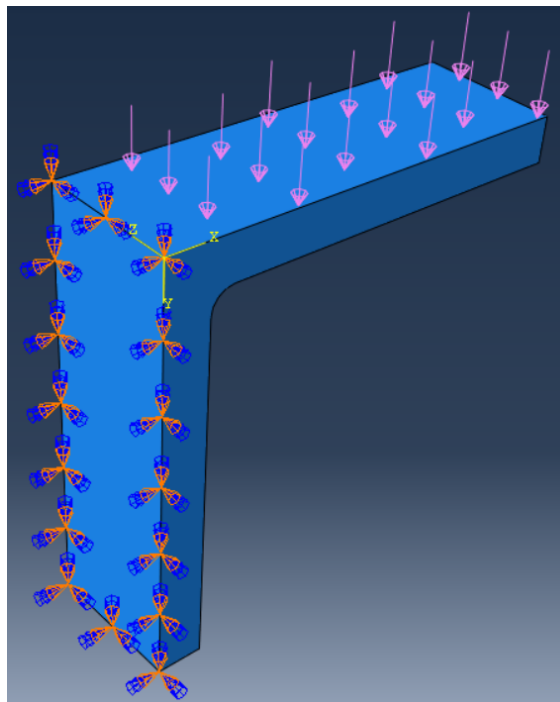
Slika 29: Določitev vpetja

3.6.8 Določitev sile

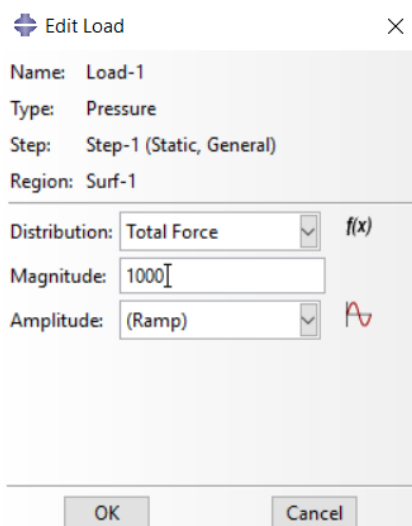
Obremenitev smo določili tako, da smo v modulu Load izbrali ukaz Create Load. V okvirju, ki se nam je prikazal, smo pod Category izbrali Mechanical, kar je pomenilo, da bo nastopila mehanična sila, v okencu Type For Selected Step pa Pressure (Slika 30). Izbrali smo tudi tlak, ker sila deluje na celotno zgornjo površino, nato pa še površino, ki je bila obremenjena (Slika 31). Po potrditvi smo v okencu Distribution izbrali Total Force, da smo lahko zapisali, kako velika sila deluje na površino v enoti newton (Slika 32).



Slika 30: Določitev tipa obremenitve



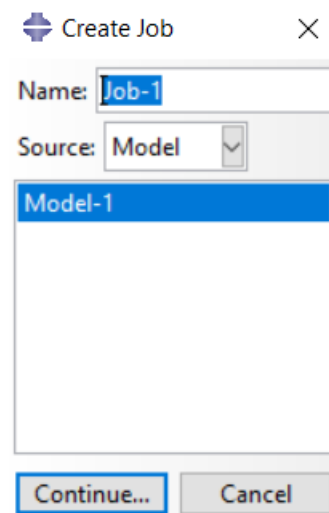
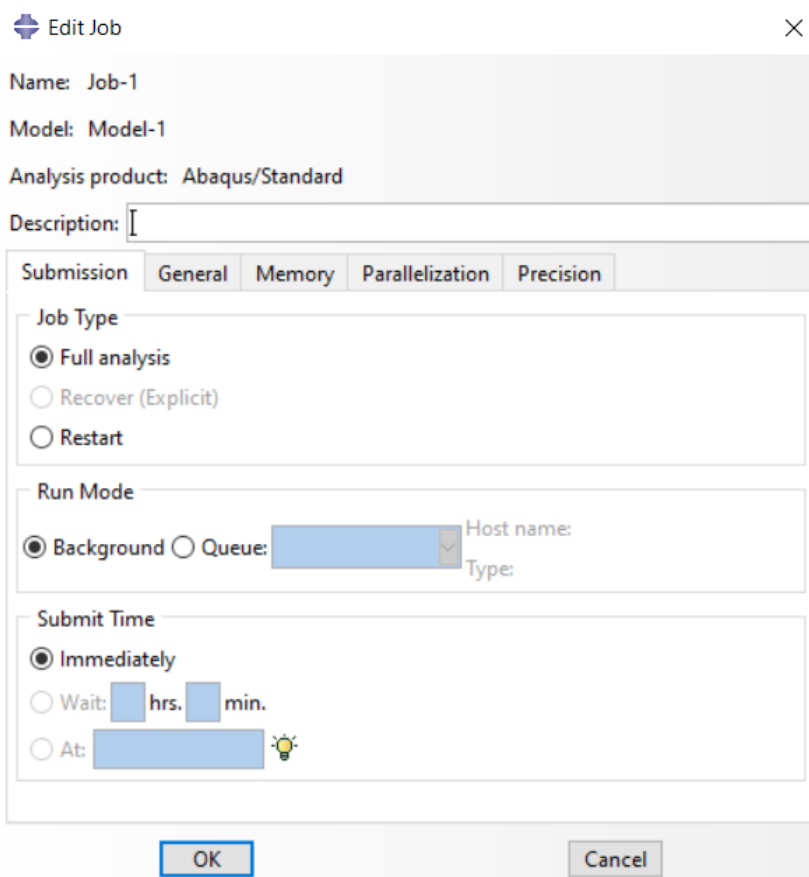
Slika 31: Določitev obremenjene ploskve



Slika 32: Način zapisa obremenitve

3.6.9 Priprava za analizo

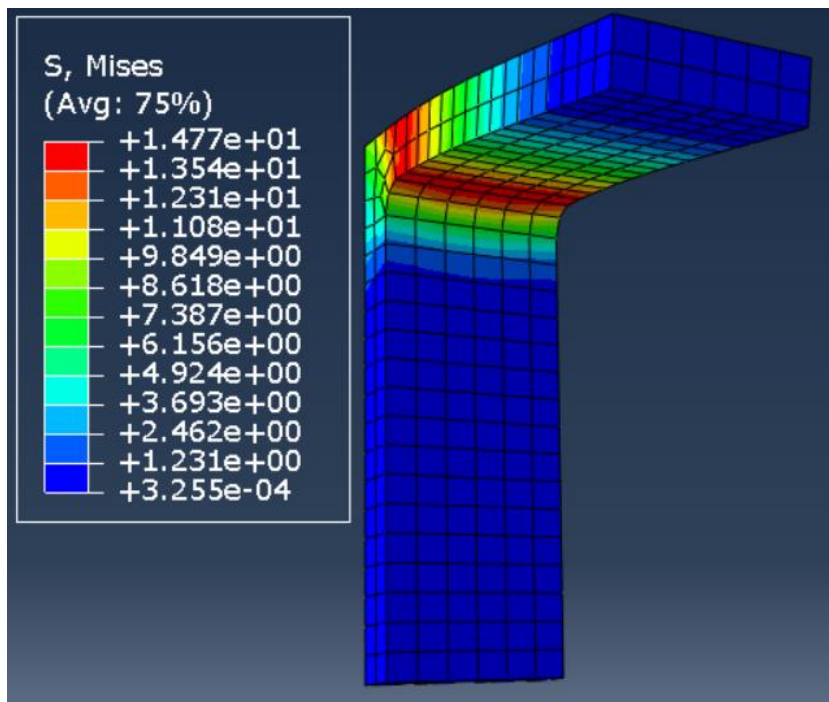
V modulu Job smo izbrali ukaz Create Job, kar prikazuje desna stran slike, in ga z ukazom Job Manager zagnali, kar prikazuje leva stran slike (Slika 33).



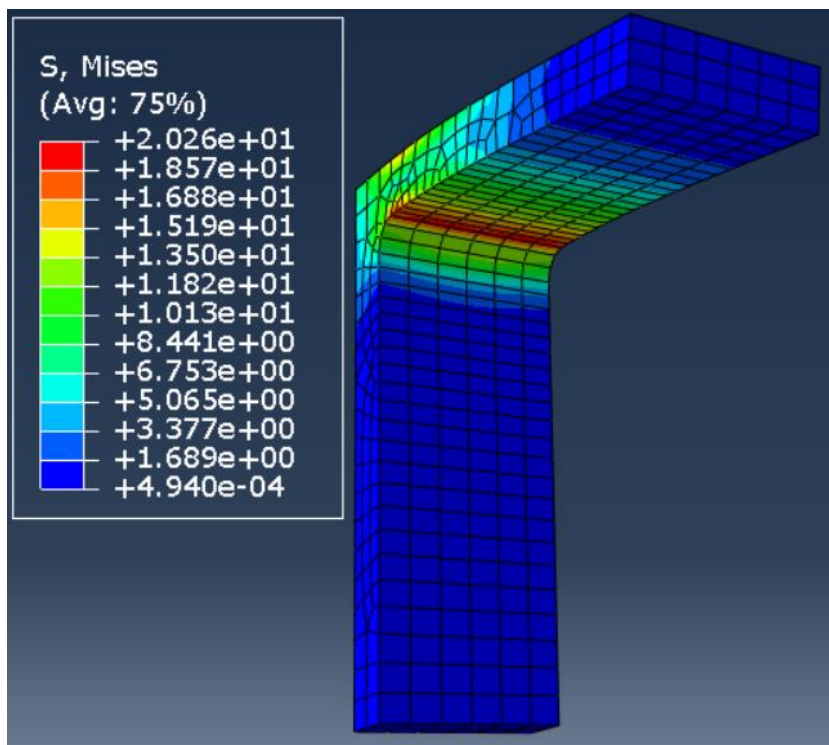
Slika 33: Kreiranje in urejanje Job-a

3.6.10 Analiza rezultatov nestructurirane mreže

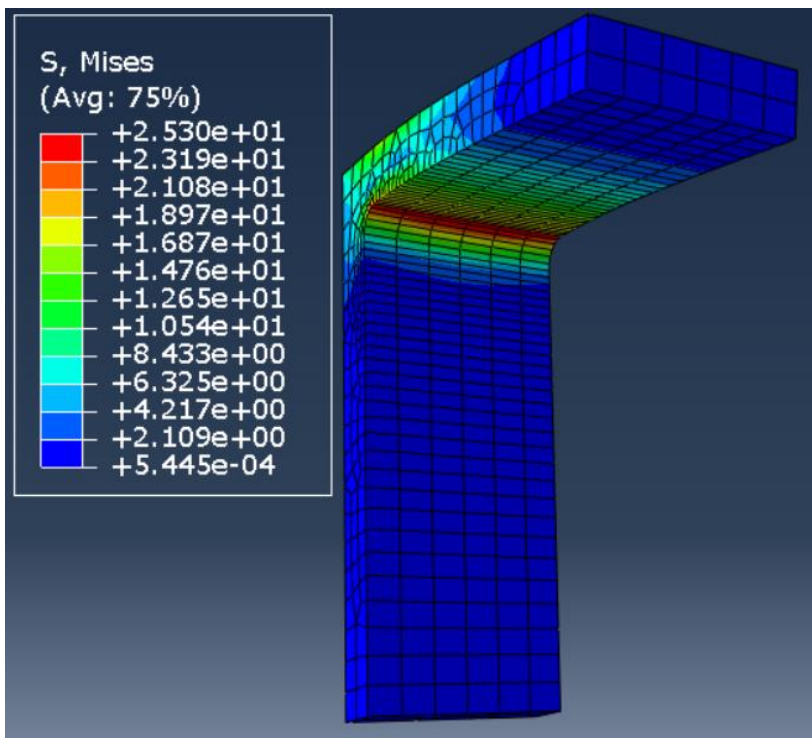
Na spodnjih slikah je grafični prikaz von Missovih napetosti za L-kotnik.



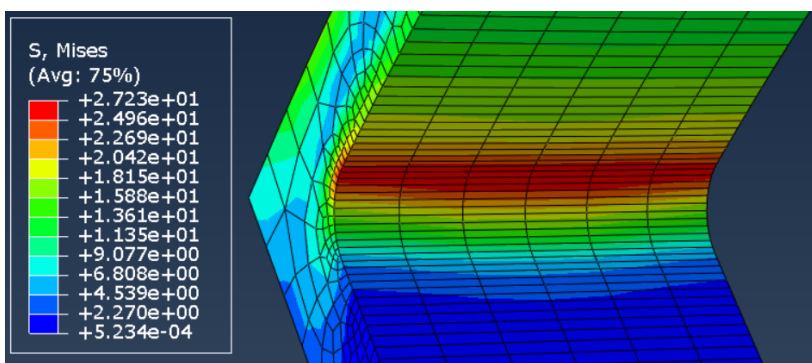
Slika 34: Delno strukturirana mreža 1 (napetost)



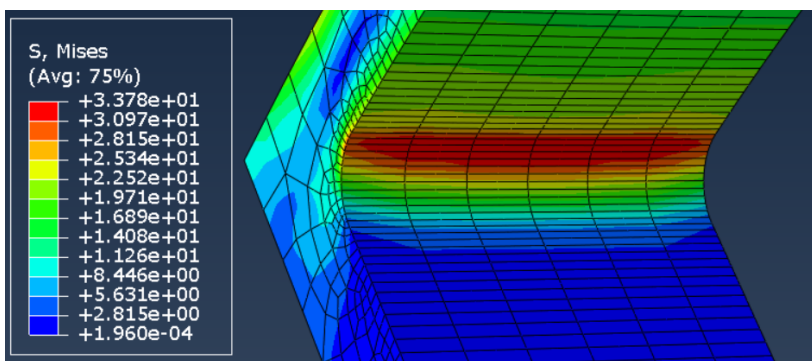
Slika 35: Delno strukturirana mreža 2 (napetost)



Slika 36: Delno strukturirana mreža 3 (napetost)



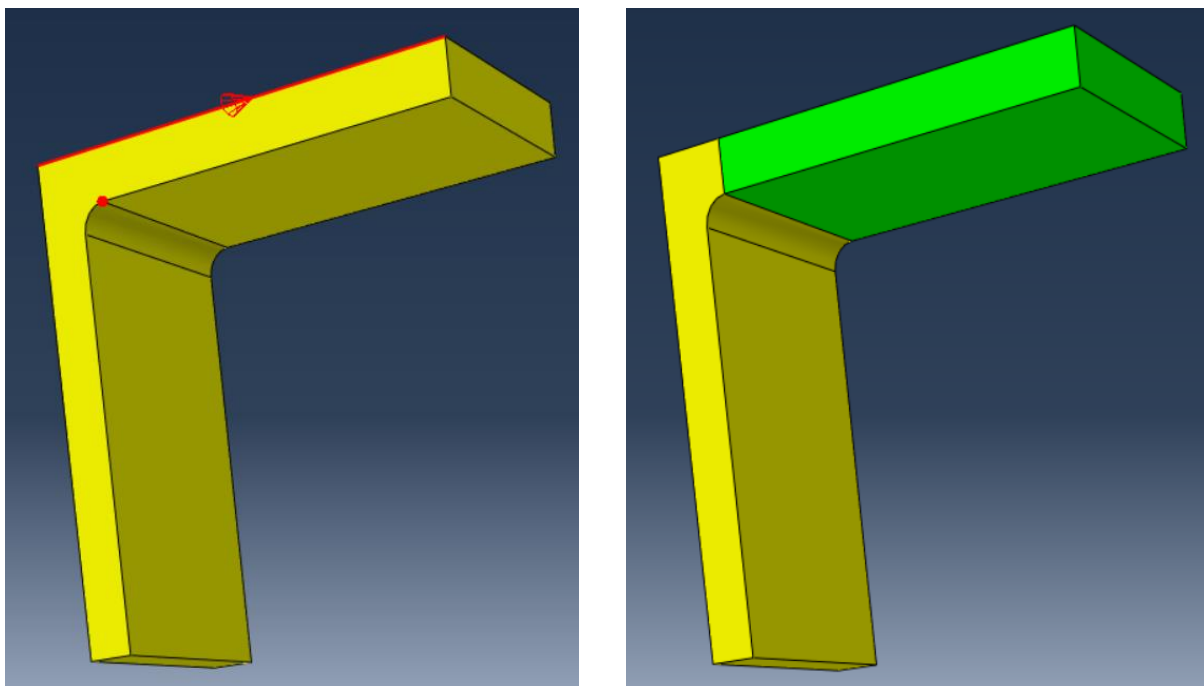
Slika 37: Delno strukturirana mreža 4 (napetost)



Slika 38: Delno strukturirana mreža 5 (napetost)

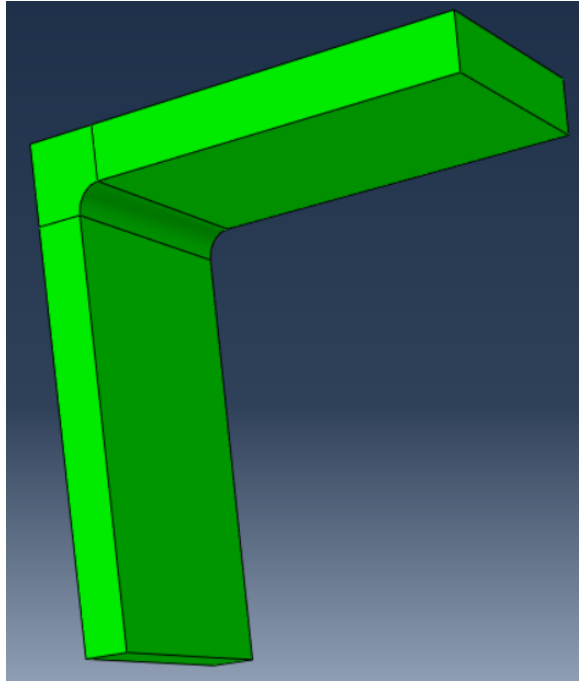
3.6.11 Generiranje strukturirane mreže

Ker nam je program to omogočal, smo poskusili, kakšen bi bil vpliv mreže na končen rezultat. V prvem primeru smo L-kotnik zamrežili z navadno mrežo z elementi nepravilnih oblik v predelu radija, ki so popačili rezultat. Tokrat pa smo model razdelili na enostavnejše dele in dosegli strukturirano mrežo. To smo naredili tako, da smo v modulu Mesh izbrali ukaz Partition Cell, označili del, ki smo ga razdelili, in nato izbrali ukaz Point & Normal ter izbrali točko, od katere je potekala meja do nasprotnega roba (Slika 39). Ko smo potrdili, smo imeli en del strukturiran.



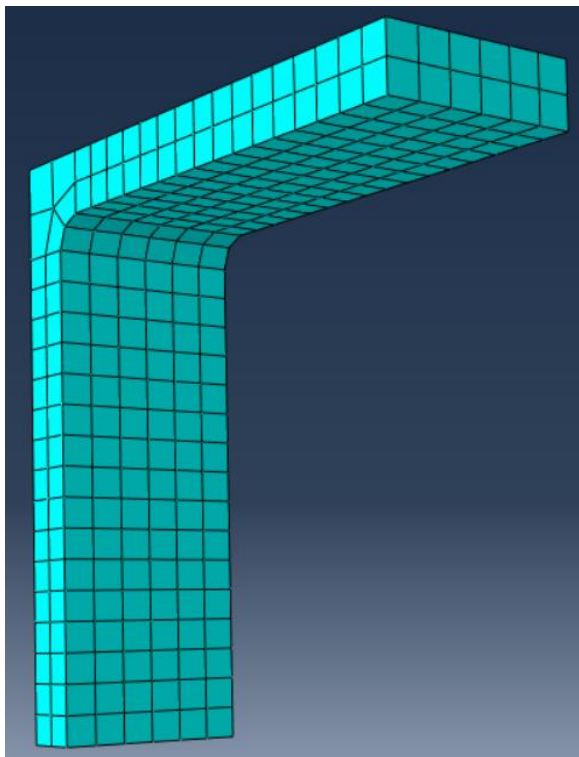
Slika 39: Razdelitev L-kotnika na enostavnejše elemente

Enako smo naredili še za spodnji del, le da smo tokrat še prej izbrali celico, ki smo jo želeli deliti (v tem primer spodnjo, ker smo imeli že dve). Prav tako smo izbrali ukaz Point & Normal in razdelili spodnjo celico še na dva dela. Tako smo dobili tri celice in strukturiran model, L-kotnik se je obarval zeleno (Slika 40).

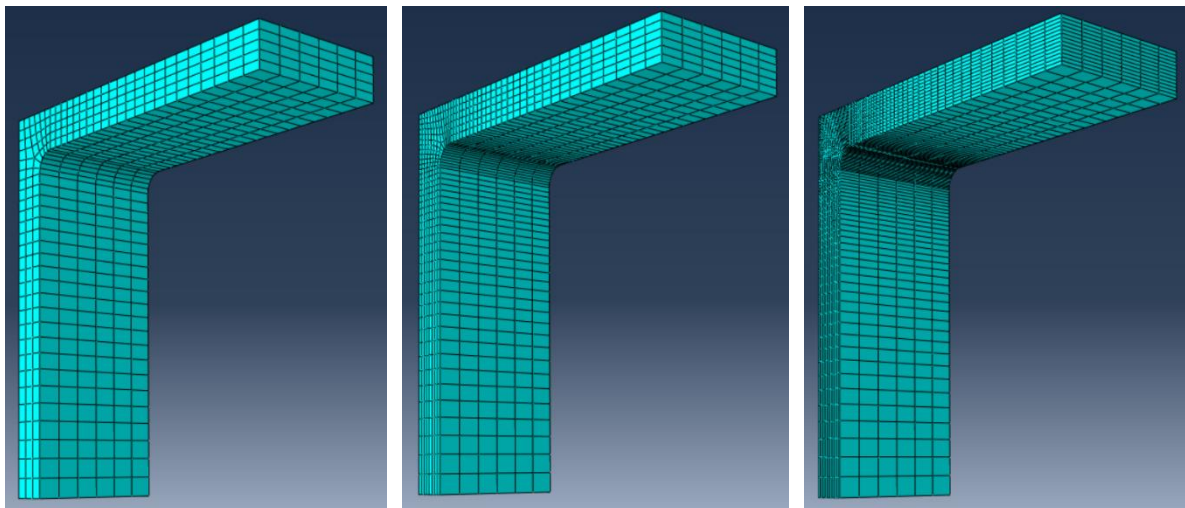


Slika 40: Strukturiran model

Po strukturiranju smo ponovno zamrežili vse primere, kot je prikazano spodaj (Slika 41, 42).



Slika 41: Strukturirana mreža

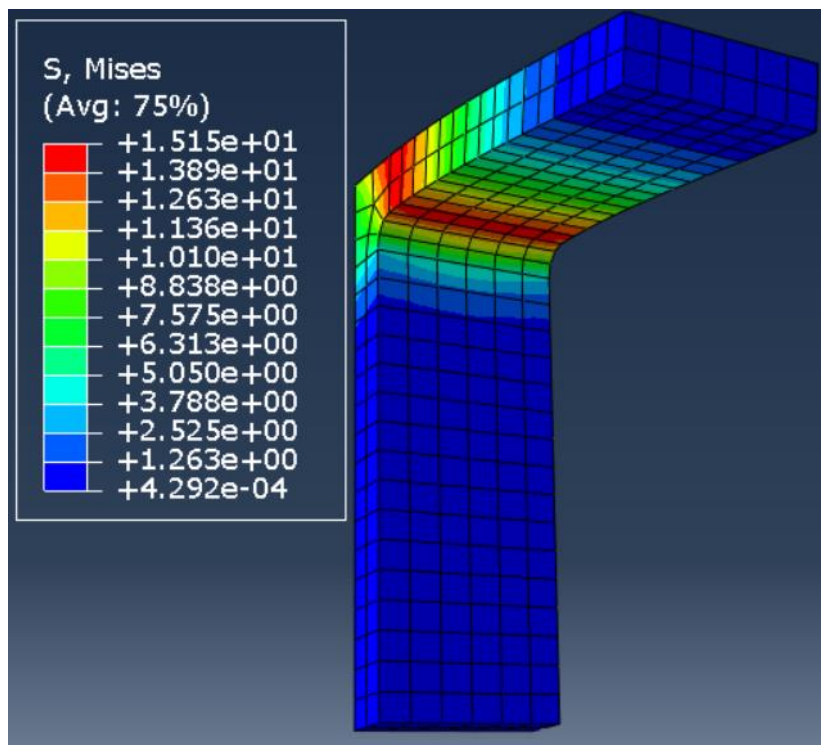


Slika 42: Zgoščene in strukturirane mreže

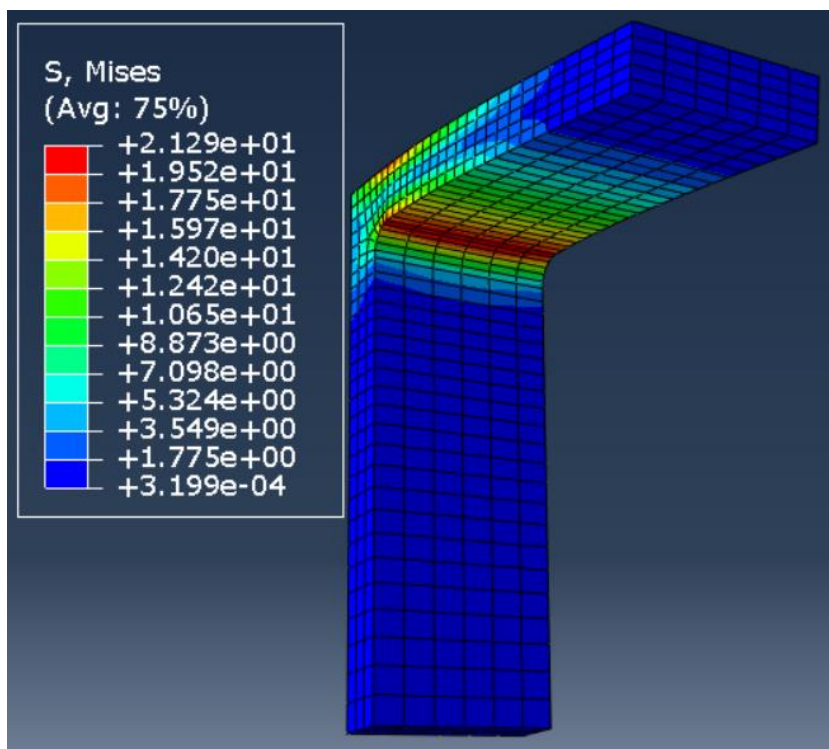
Pri najbolj zgoščeni mreži smo uporabili še kvadratno interpolacijsko funkcijo in 20-voziščne heksaedre za elemente.

3.6.12 Analiza rezultatov strukturirane mreže

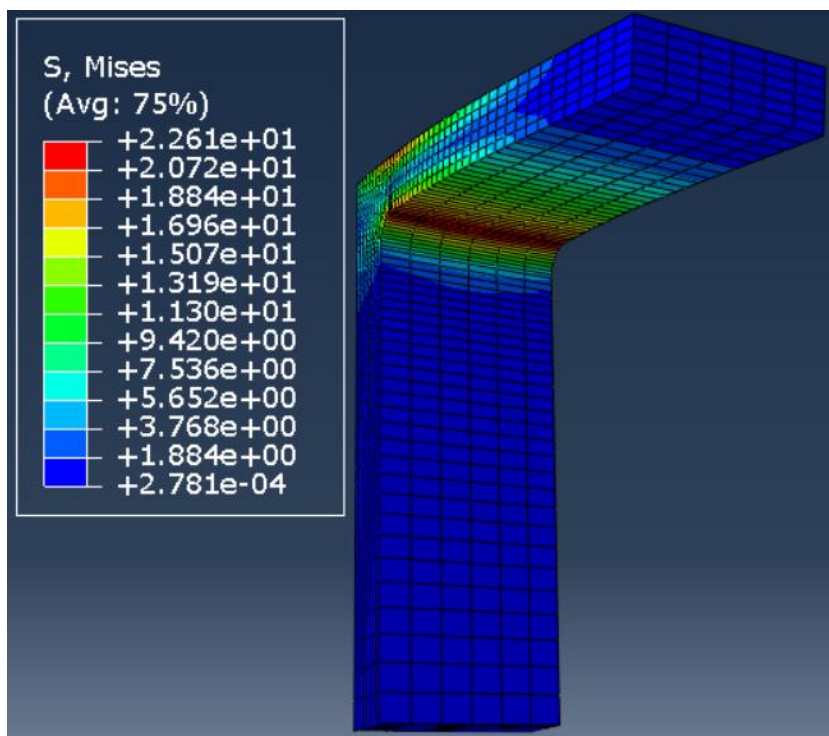
Grafični prikaz von Missovih napetosti strukturirane mreže prikazujejo spodnje slike.



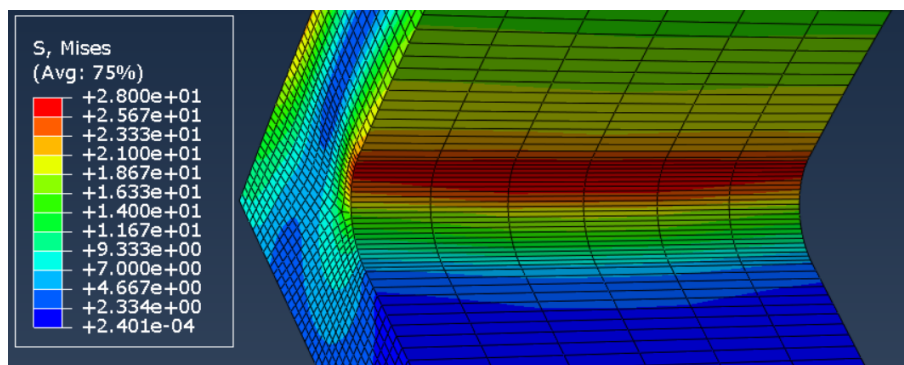
Slika 43: Strukturirana mreža 1 (napetost)



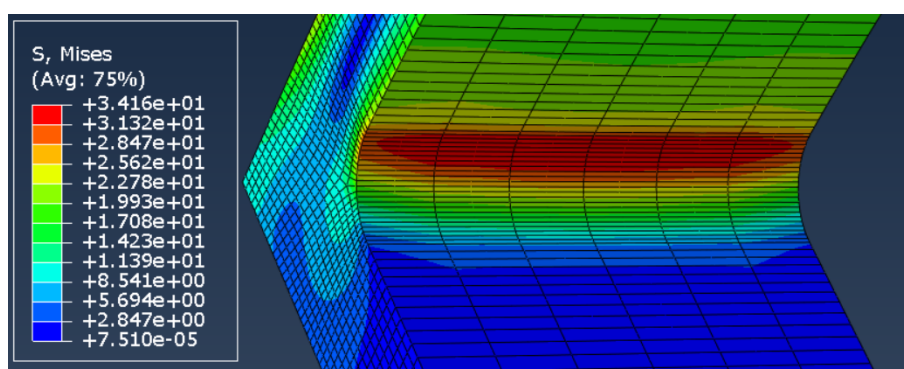
Slika 44: Strukturirana mreža 2 (napetost)



Slika 45: Strukturirana mreža 3 (napetost)

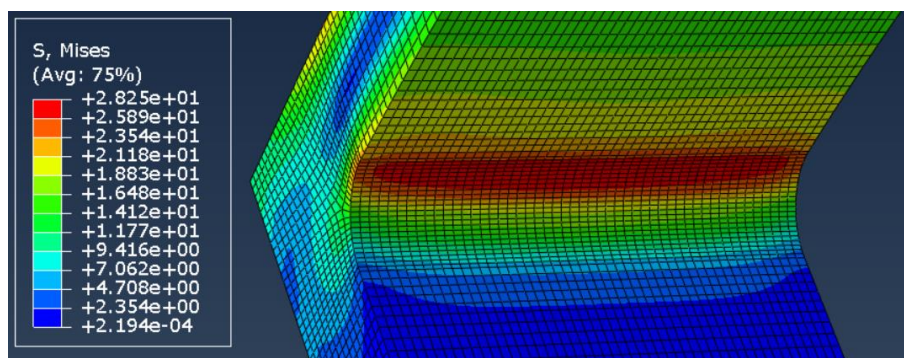


Slika 46: Strukturirana mreža 4 (napetost)

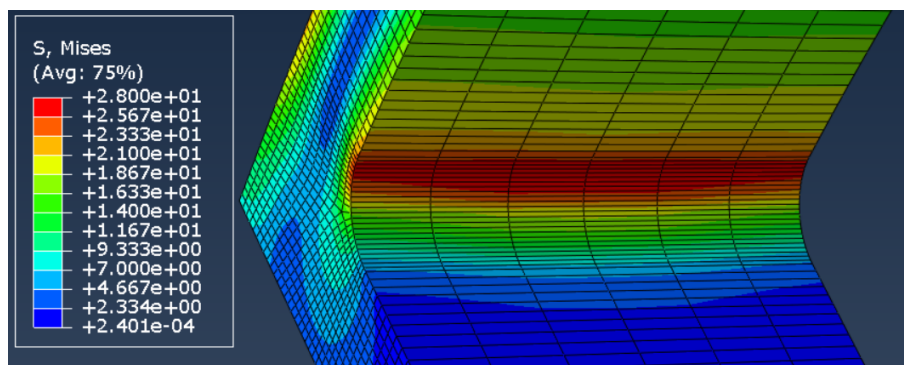


Slika 47: Strukturirana mreža 5 (napetost)

Elemente smo zmanjševali po prečnem prerezu, ne pa tudi v vzdolžnem, kar pa v tem primeru ni vplivalo na končni rezultat (Slika 48). Po drugi strani smo se izognili veliko večjemu številu elementov.



Slika 48: Mreža, zgoščena v prečni in v vzdolžni smeri



Slika 49: Strukturirana mreža 5 (napetost)

3.6.13 Primerjava in analiza rezultatov v programu Abaqus

Tabela 2: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Abaqusu

Mreža (Stopnja interpolacije)	Napetost [MPa] (Delno strukturirana)	Razlika [%]	Napetost [MPa] (Strukturirana)	Razlika [%]
Mreža 1 (8 mm) (Linearna)	14,77	/	15,15	/
Mreža 2 (4 mm) (Linearna)	20,26	37,17	21,29	40,53
Mreža 3 (2 mm) (Linearna)	25,30	71,29	22,61	49,24
Mreža 4 (1 mm) (Linearna)	27,23	84,36	28,00	84,81
Mreža 5 (1 mm) (Kvadratna)	33,78	128,71	34,16	125,48

V Abaqusu je bilo pripraviti simulacijo težje opravilo kot v Solidworksu. Ker je naprednejši program za delanje numeričnih analiz, je bilo več tudi modulov, ki smo jih morali izpolniti. Omogočal pa je tudi več nastavitev, za katere smo morali pokazati več znanja in ki so nam vzele tudi več časa. Ena od prednosti, ki smo jih uporabili, je bila strukturirana mreža. Največja razlika med mrežami je pri strukturirani znašala 125,48 %, pri delno strukturirani pa 128,71 %.

Pri vseh primerih je strukturirana mreža pokazala večjo napetost, izjema je le mreža 3. S čimer lahko potrdimo, da strukturirana mreža oziroma elementi pravilnejših oblik dajejo natančnejše rezultate pri isti velikosti le-teh. Najgostejša in hkrati najnatančnejša mreža je imela 8508 elementov in 40759 vozlišč. Napetost, ki jo je pokazala, je bila 34,16 MPa, čas, ki ga je računalnik potreboval za preračun, pa je bil 66 sekund. Razlika med najmanjšo in največjo napetostjo je znašala 131,28 % oziroma 19,39 MPa (Tabela 2).

3.7 ANSYS

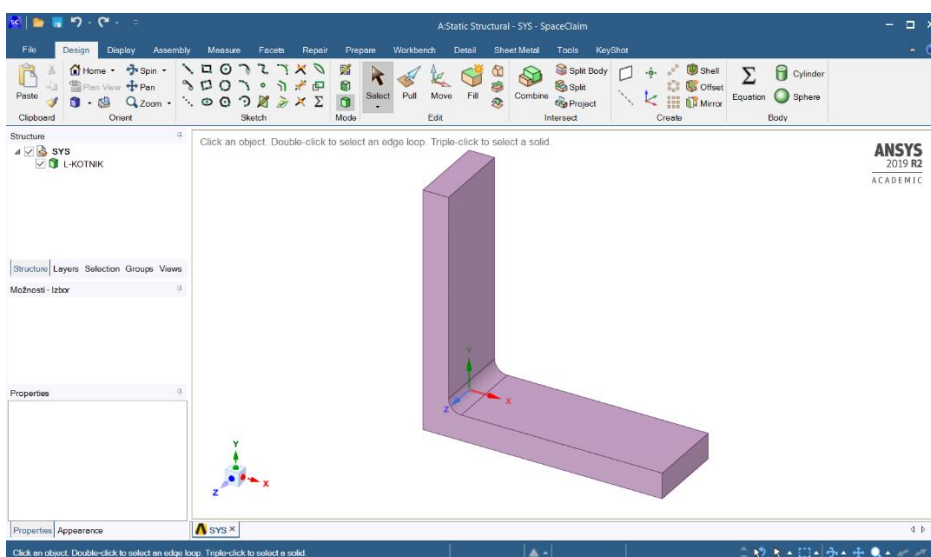
3.7.1 Določitev materiala

Najprej smo odprli program Workbench. Na levi strani, kjer je stolpec z orodji, smo izbrali modul Static structural, kar je pomenilo, da smo izvajali trdnostne analize. Pojavilo se nam je manjše okno, v katerem smo morali izpolniti vsa področja, ki so bila zahtevana.

Najprej smo pod drugim poglavjem izbrali Engineering Data, kjer smo definirali material. Ker v knjižnici ni bilo materiala z enakimi karakteristikami, kot je naš, smo navadno nerjaveče jeklo duplirali, ga poimenovali AISI 304 in mu pripisali enake lastnosti, kot smo jih uporabili v prejšnjih programih.

3.7.2 Uvoz modela

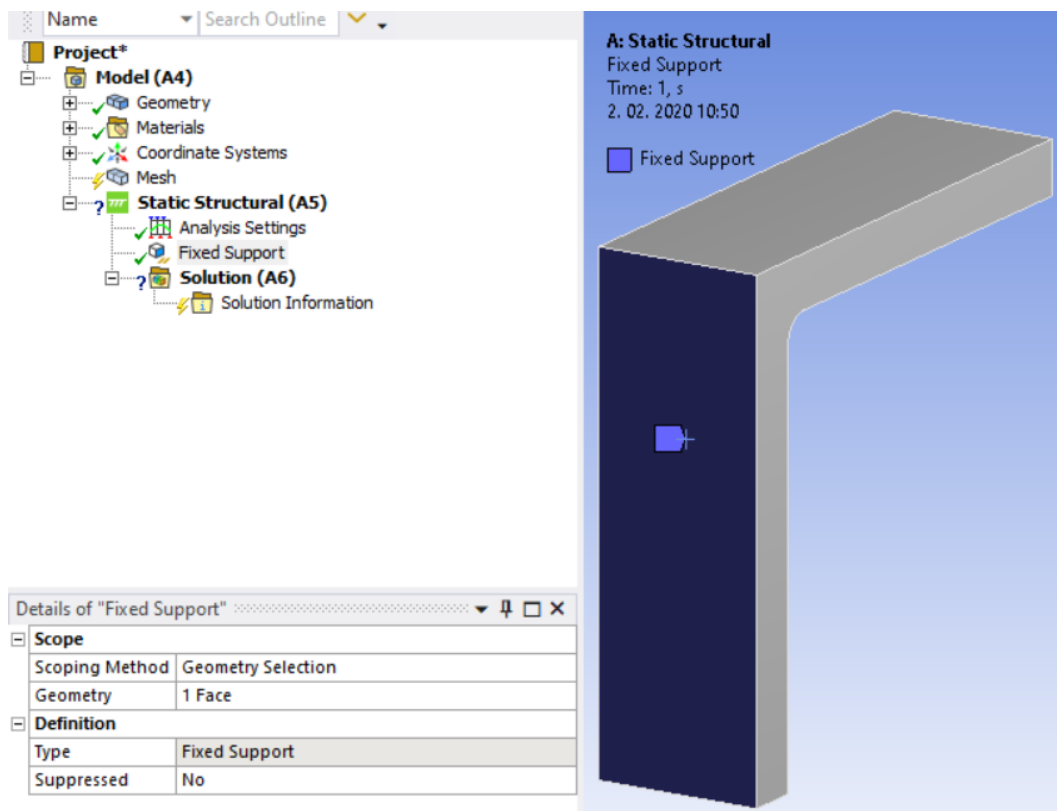
Pod tretjim poglavjem smo izbrali Geometry, kjer smo pripravili model. Pod zavihkom File smo izbrali Open in odprli L-kotnik (Slika 50).



Slika 50: Uvoz modela

3.7.3 Določitev vpetja

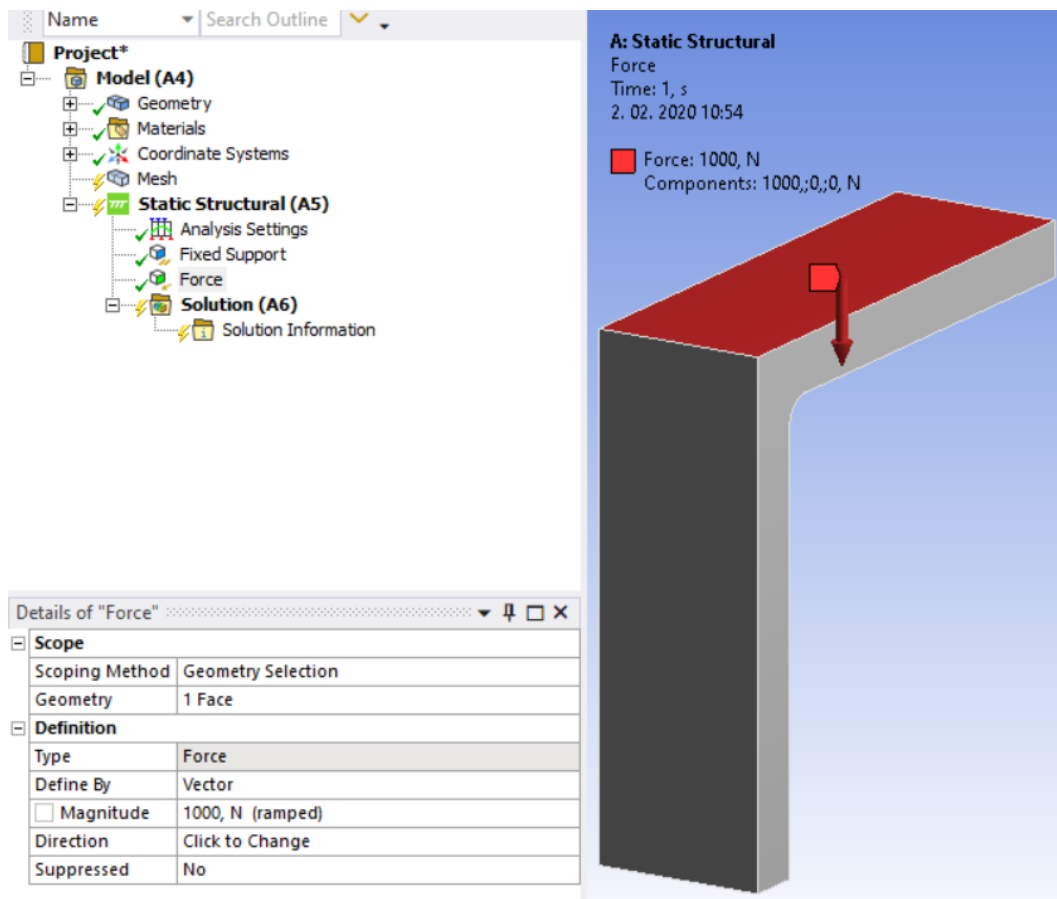
Ko smo zaključili s tretjim poglavjem, smo prešli na naslednjega, kjer smo določili še vse ostale parametre za simulacijo. Najprej smo L-kotniku predpisali vpetje. V modulu Static Structural smo izbrali funkcijo Fixed Support. Nato smo izbrali celo zadnjo stran L-kotnika in v urejevalniku izbrali Apply. Zadnjo stran L-kotnika smo tako fiksno vpeli (Slika 51).



Slika 51: Določitev vpetja

3.7.4 Določitev obremenitve

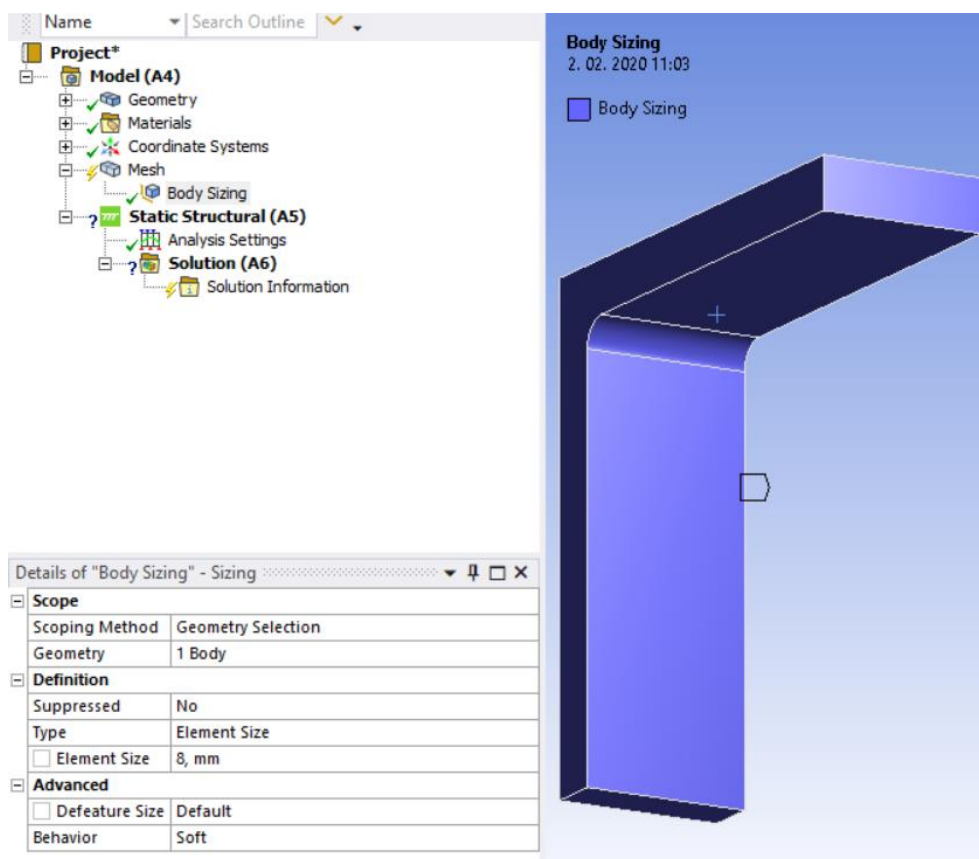
V istem modulu kakor prej, torej v Static Structural, smo potrdili funkcijo Force. Nato smo izbrali celotno zgornjo stran L-kotnika in v urejevalniku izbrali Apply. Za velikost sile smo izbrali 1000 N in jo usmerili navzdol (Slika 52).



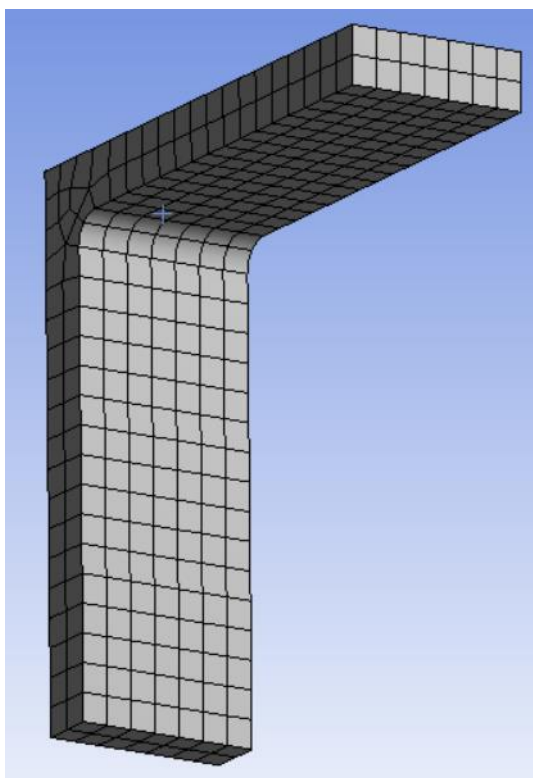
Slika 52: Določitev obremenitve

3.7.5 Mreženje

V modulu Mesh smo izbrali funkcijo Sizing, s katero smo lahko prilagodili velikost elementov. Označili smo celoten model in v urejevalniku izbrali Apply. Velikost elementov smo definirali v vrstici Element Size, kjer smo za globalno velikost izbrali 8 mm (Slika 53). Po mreženju je L-kotnik izgledal, kot prikazuje naslednja slika (Slika 54).



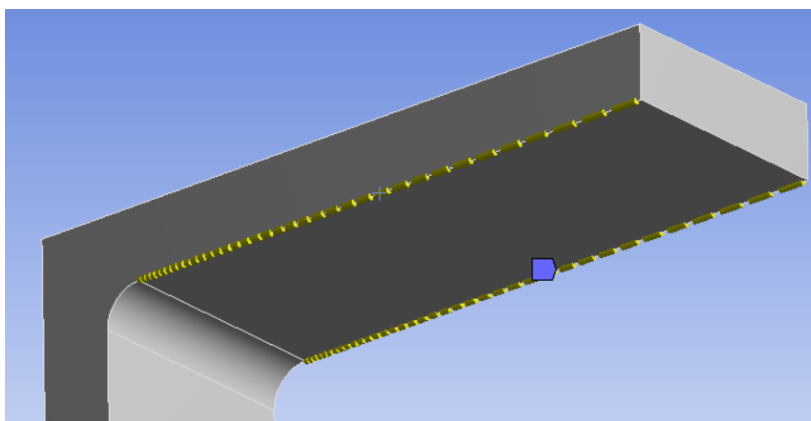
Slika 53: Določitev globalne velikosti mreže



Slika 54: Mreža, aplicirana na L-kotniku

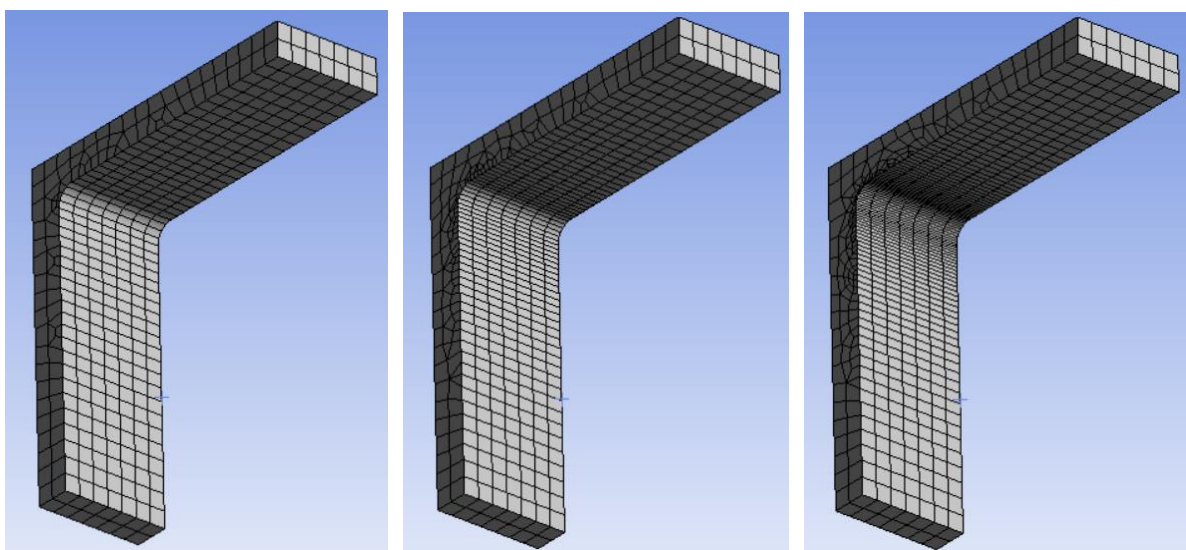
3.7.6 Zgoščevanje mreže

V drevesni strukturi smo v modulu Mesh izbrali funkcijo Sizing. S to funkcijo smo na štirih daljših notranjih robovih zgostili prehod tako, da je imel zadnji element na koncu velikost 8 mm. V predelu radija pa je imel imensko velikost, podobno kot smo že to preizkusili v drugih programih. Izbrali smo roba in ju potrdili. Pod tip zamrežitve smo izbrali Number of Division, kar je pomenilo, da smo predpisali, koliko elementov smo želeli imeti na robu. Število se razlikuje, ko elemente zmanjšujemo in povečujemo, ko jih večamo. Ker smo želeli prehod iz ene v drugo velikost elementov, smo izbrali Bias Type, ki se je večal iz leve proti desni (Slika 55). Pod Bias Factor smo vpisali število, ki je podalo razmerje med najmanjšim in največjim elementom, v našem primeru 2, 4 in 8.



Slika 55: Mehak prehod zgoščanja s funkcijo Bias

Po generiranju mreže so modeli izgledali, kot prikazuje naslednja slika (Slika 56).

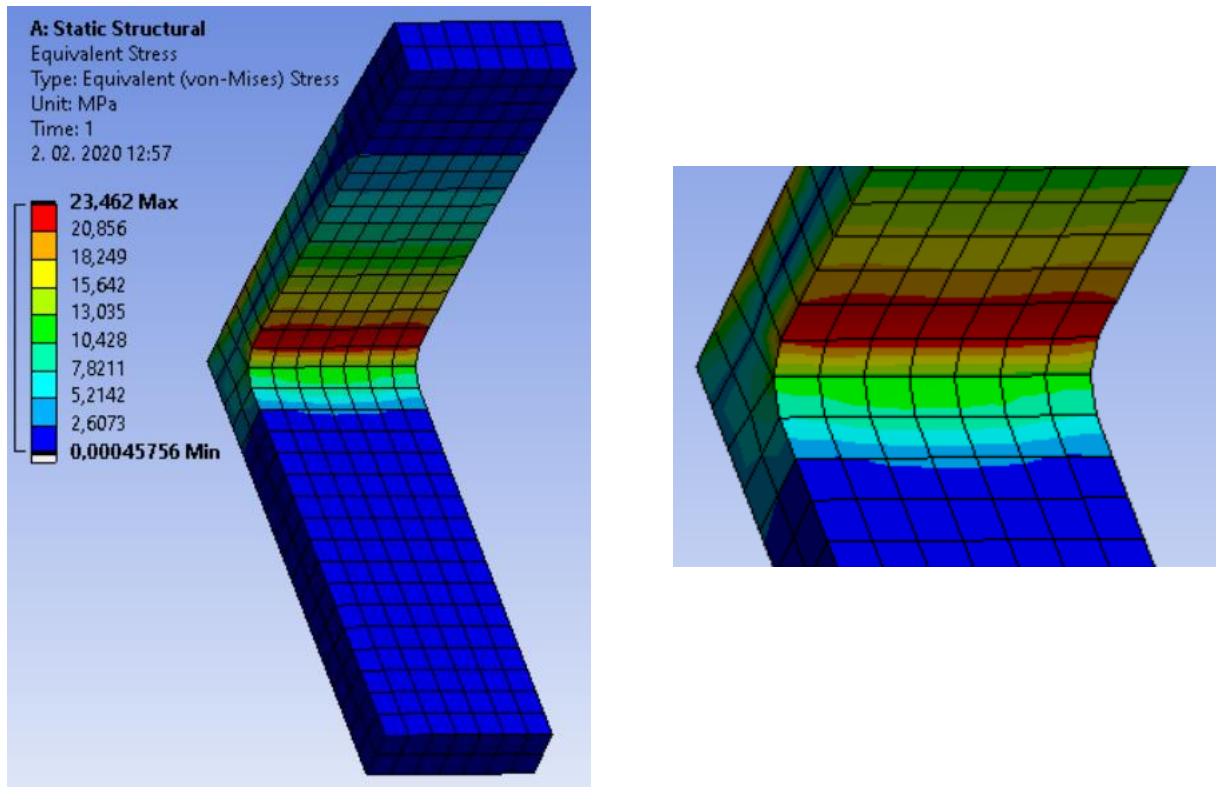


Slika 56: Različne zgostitve mrež

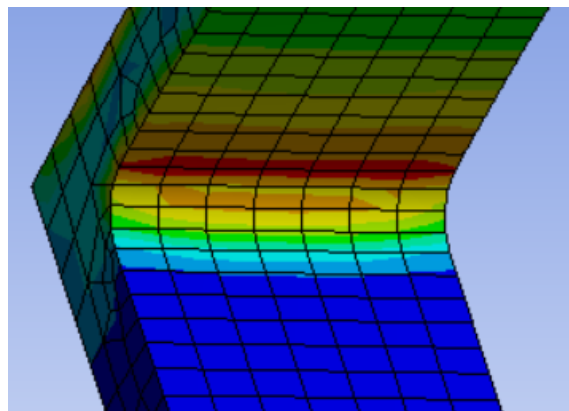
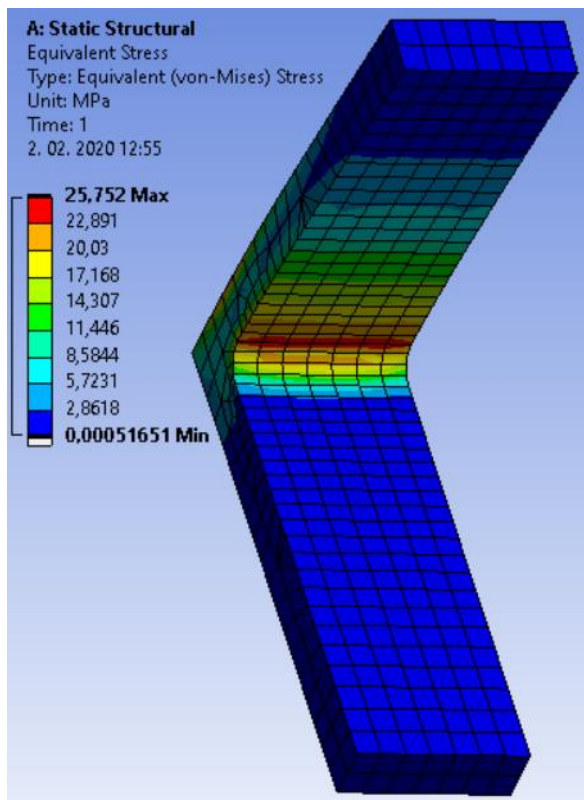
Pri vseh mrežah smo uporabili linearno, le pri najbolj zgoščeni kvadratno interpolacijsko funkcijo.

3.7.7 Analiza rezultatov nestrukturiranih mrež

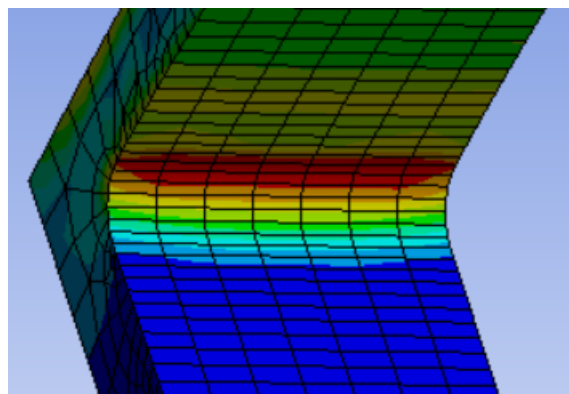
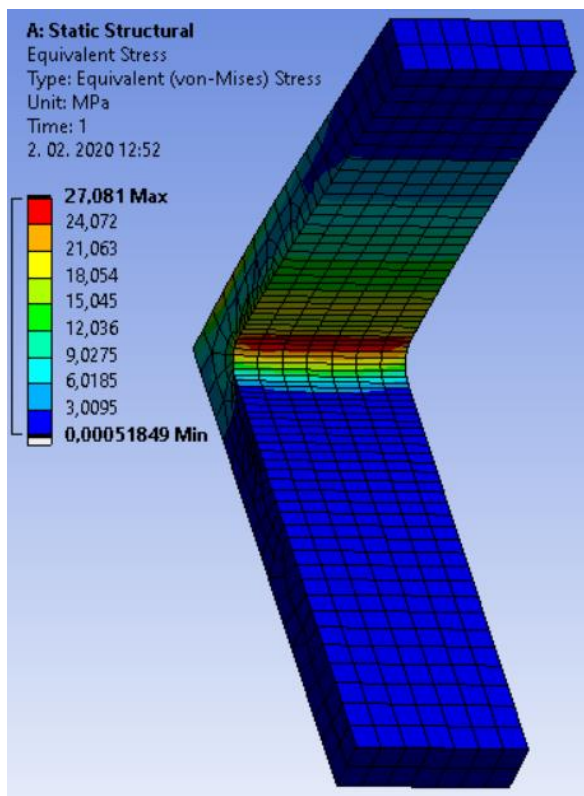
Grafični prikaz von Missovih napetosti nestrukturirane mreže prikazujejo spodnje slike.



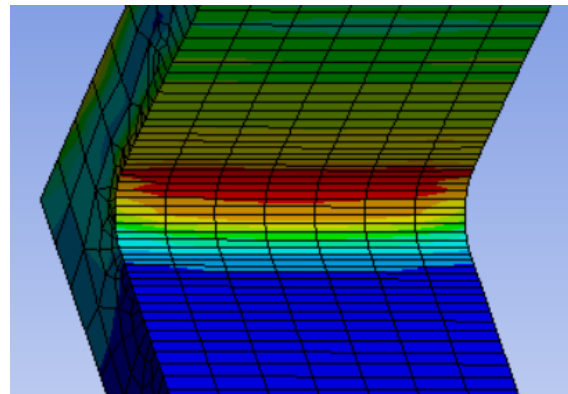
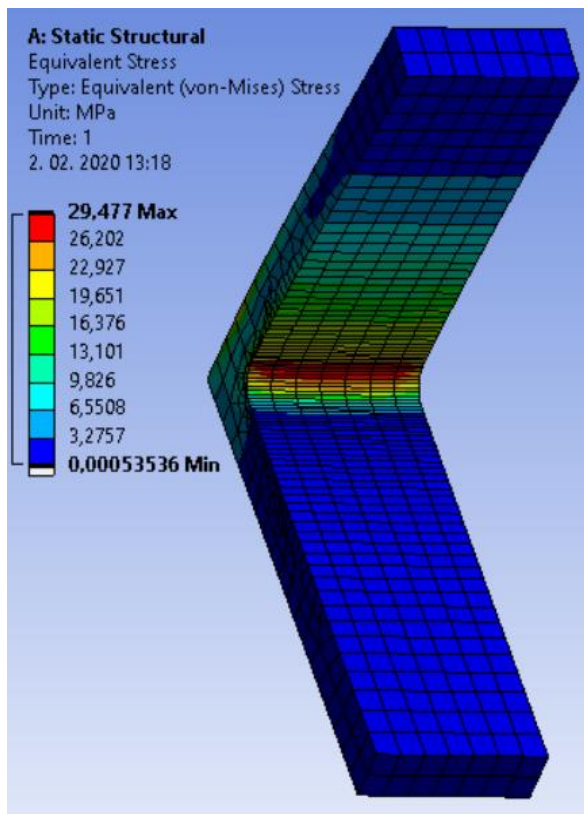
Slika 57: Delno strukturirana mreža 1 (napetost)



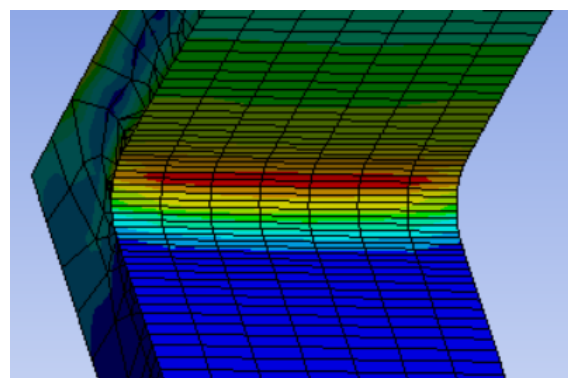
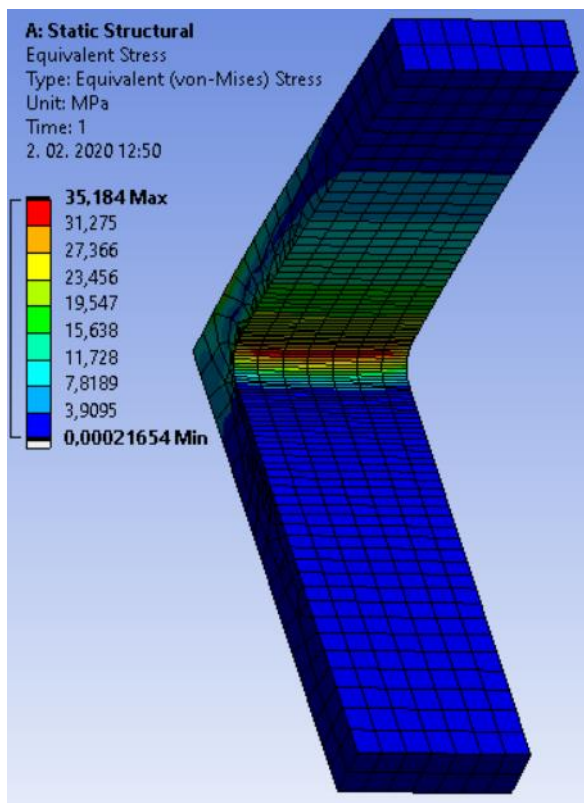
Slika 58: Delno strukturirana mreža 2 (napetost)



Slika 59: Delno strukturirana mreža 3 (napetost)



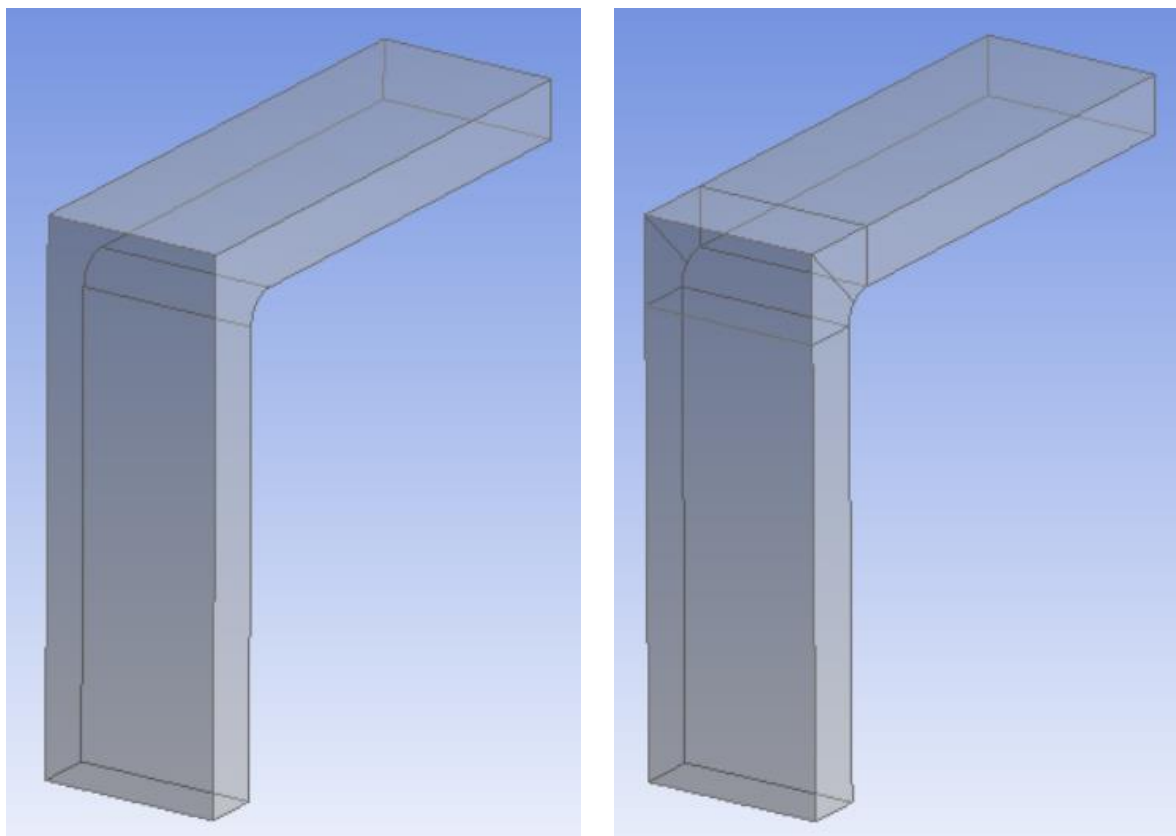
Slika 60: Delno strukturirana mreža 4 (napetost)



Slika 61: Delno strukturirana mreža 5 (napetost)

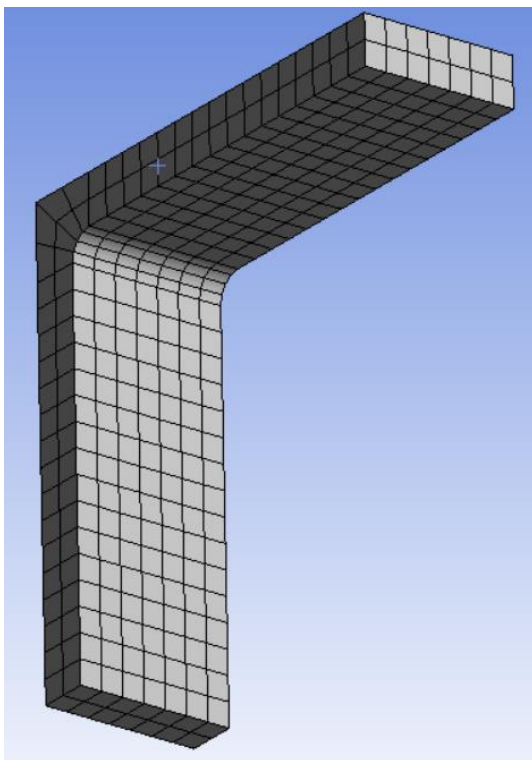
3.7.8 Generiranje strukturirane mreže

Ker smo z modelom želeli doseči natančnejše rezultate, smo optimizirali mrežo tako, da smo jo strukturirali. Ploskve modela smo v podprogramu Geometry razdelili na enostavnejše dele in tako generirali elemente pravilnejših oblik. Izbrali smo funkcijo New Sketch in nato ploskev, na katero smo želeli risati. Narisali smo črte in v orodni vrstici pod modulom Concept izbrali funkcijo Lines From Sketches ter označili te črte. Nazadnje smo v modulu Tools izbrali funkcijo Face Split, s katero smo razdelili ploskve L-kotnika (Slika 62). S tem smo delo v podprogramu Geometry zaključili.

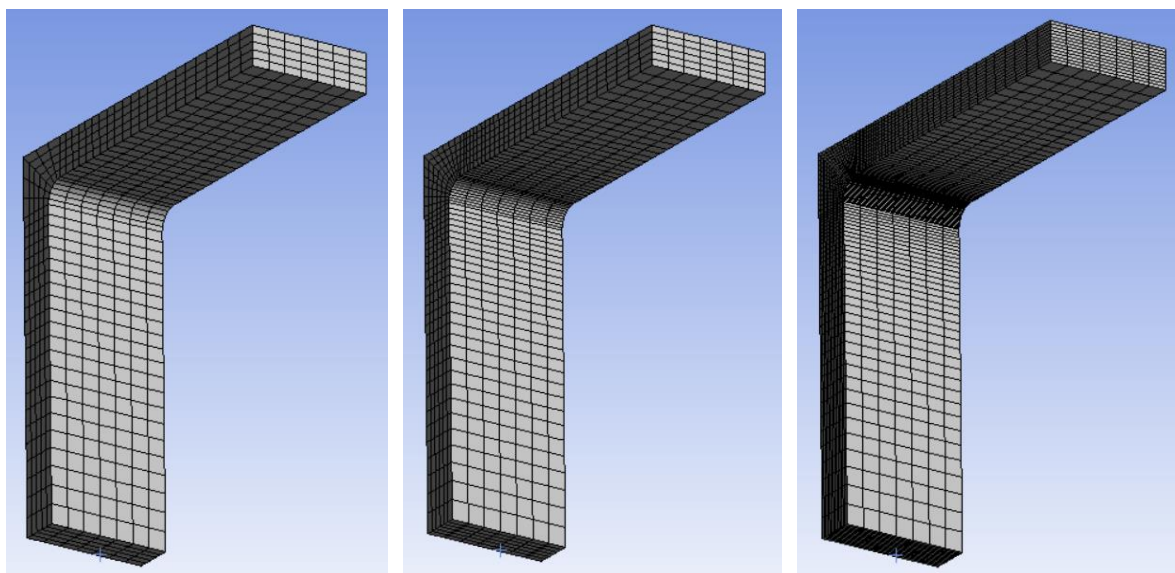


Slika 62: Razdelitev ploskev L-kotnika na enostavnejše elemente

Po strukturiranju smo modele ponovno zamrežili, kot prikazujejo spodnje slike.



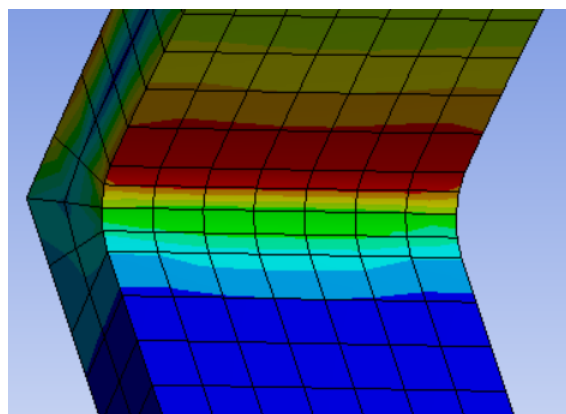
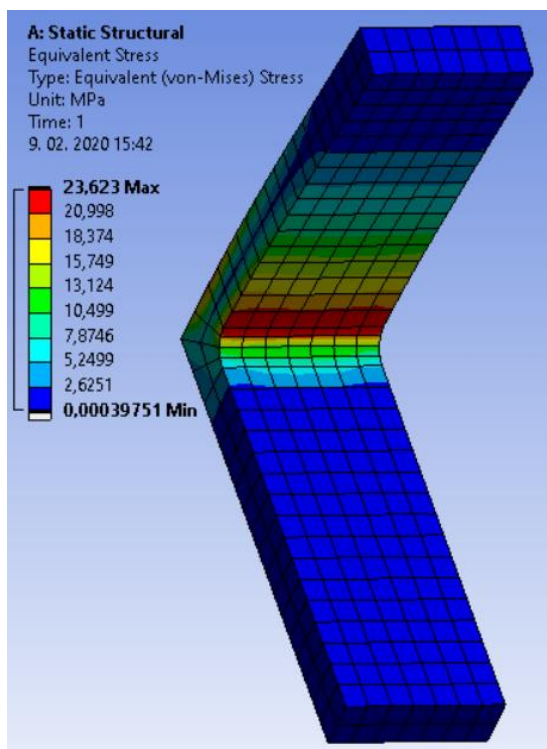
Slika 63: Strukturirana mreža, aplicirana na L-kotniku



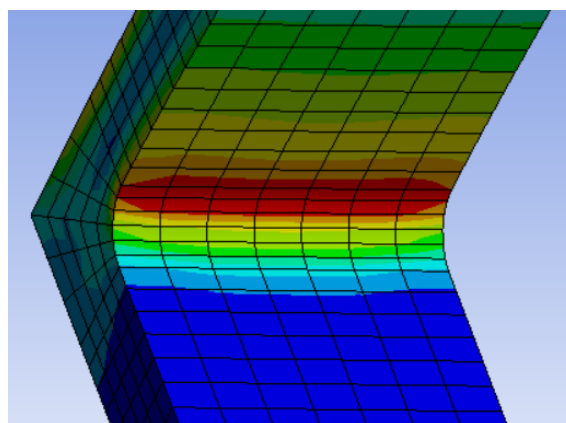
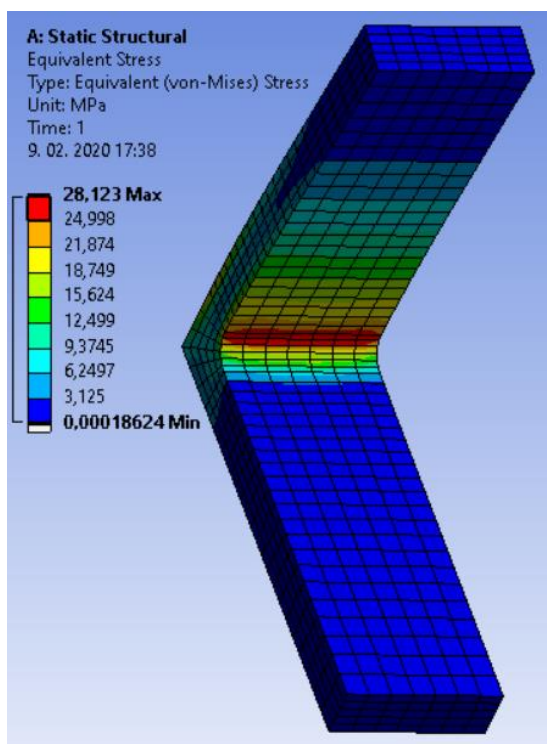
Slika 64: Zgoščene in strukturirane mreže

3.7.9 Analiza rezultatov strukturiranih mrež

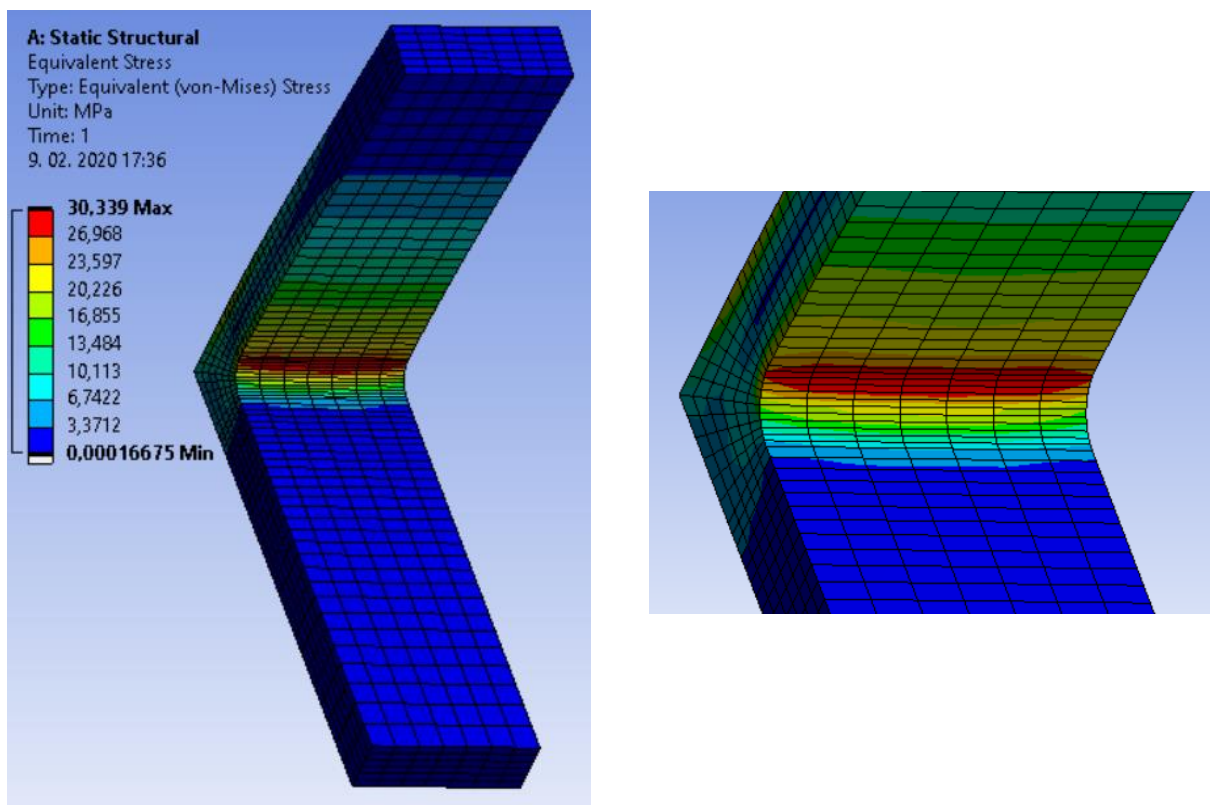
Grafični prikaz von Missovih napetosti strukturirane mreže prikazujejo spodnje slike.



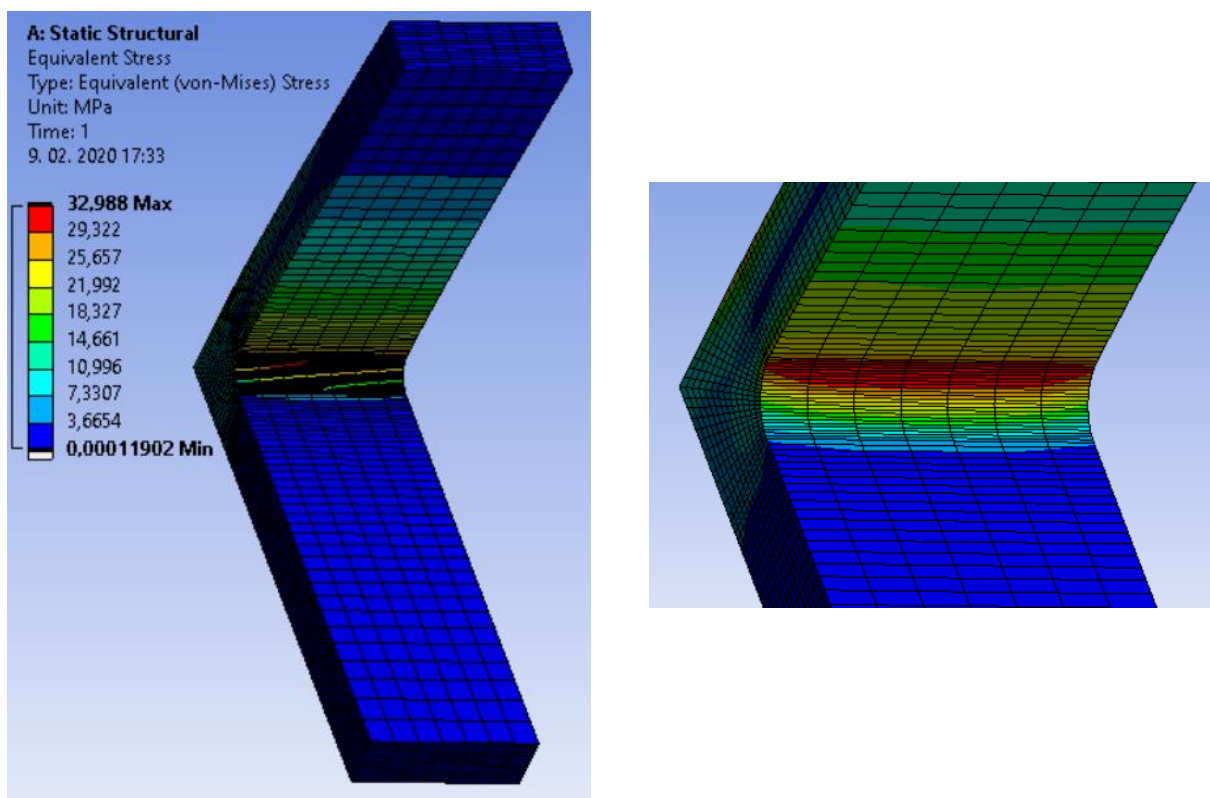
Slika 65: Strukturirana mreža 1 (napetost)



Slika 66: Strukturirana mreža 2 (napetost)



Slika 67: Strukturirana mreža 3 (napetost)



Slika 68: Strukturirana mreža 4 (napetost)

3.7.10 Analiza rezultatov v programu Ansys

Tabela 3: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Ansysu

Mreža (Stopnja interpolacije)	Napetost [MPa] (Delno strukturirana)	Razlika [%]	Napetost [MPa] (Strukturirana)	Razlika [%]
Mreža 1 (8 mm) (Linearna)	23,462	/	23,623	/
Mreža 2 (4 mm) (Linearna)	25,752	9,76	28,123	19,05
Mreža 3 (2 mm) (Linearna)	27,081	15,42	30,339	28,43
Mreža 4 (1 mm) (Linearna)	29,477	25,64	32,988	39,64
Mreža 5 (1 mm) (Kvadratna)	35,184	49,96	/	/

Ansys tako kot Abaqus spada med naprednejše programe za numerične analize, vendar nam je bilo rokovanje z njim lažje v primerjavi z Abaqusom. Prav tako kot v Abaqusu smo, ker je program to omogočal, naredili strukturirano mrežo. Pri najgostejši strukturirani mreži funkcijo Quadratic nismo mogli uporabiti, ker je število elementov oziroma vozlišč preseglo mejo, ki jo študentska verzija omogoča. Največja razlika med nestrukturirano mrežo je znašala 49,96 %, kar ni bilo tako veliko. Razlika med strukturirano mrežo pa je znašala, če izključimo mrežo s kvadratno interpolacijo, 39,64 %. V primerjavi z nestrukturirano je bila na tej stopnji 25,64 %, kar je za 14 % manj, vendar bi verjetno pri obeh mrežah pričakovali zelo podoben rezultat. Najgostejša mreža je vsebovala 8918 elementov, medtem ko je najbolj točna mreža imela 1253 elementov. Čas, ki ga je porabil računalnik za preračun, pa je bil 2 sekundi. Razlika med najmanjšo in največjo napetostjo je tako znašala 49,96 % oziroma 11,722 MPa (Tabela 3).

3.8 CREO

Ko smo zagnali program Creo, smo najprej odprli model L-kotnik. Nato smo v orodni vrstici izbrali podprogram Applications in zagnali še modul za simulacije, Simulate.

3.8.1 Določitev materiala

Ker v knjižnici materialov ni bilo istega materiala, smo naredili novega. V zgornjem levem kotu smo izbrali Create new material. Odprlo se nam je okno, ki smo ga izpolnili z enotnimi parametri kot v prejšnjih programih (Slika 69), torej gostoto, Poissonovo število in modul elastičnosti.

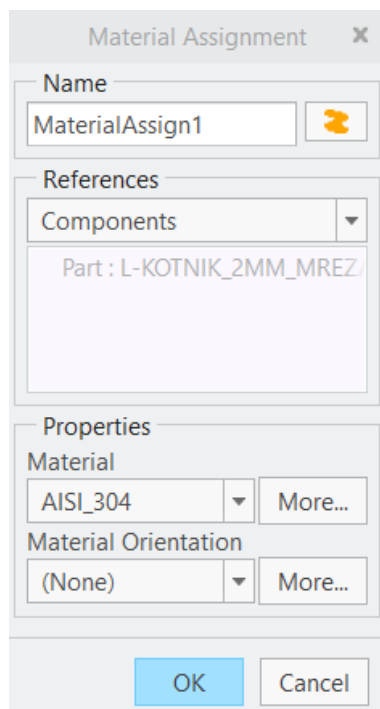
The image shows a 'Material Definition' dialog box with the following fields and values:

- Name: AISI 304
- Description: (empty)
- Density: 8000 kg/m³
- Symmetry: Isotropic
- Stress-Strain Response: Linear
- Poisson's Ratio: 0.29
- Young's Modulus: 190000 MPa
- Coeff. of Thermal Expansion: /C
- Mechanisms Damping: sec/mm
- Material Limits:
 - Tensile Yield Stress: (empty) kPa
 - Tensile Ultimate Stress: (empty) kPa
 - Compressive Ultimate Stress: (empty) kPa
- Failure Criterion: None
- Fatigue: None

Buttons at the bottom: Save to Library..., Save to Model, Cancel.

Slika 69: Določitev materialnih lastnosti

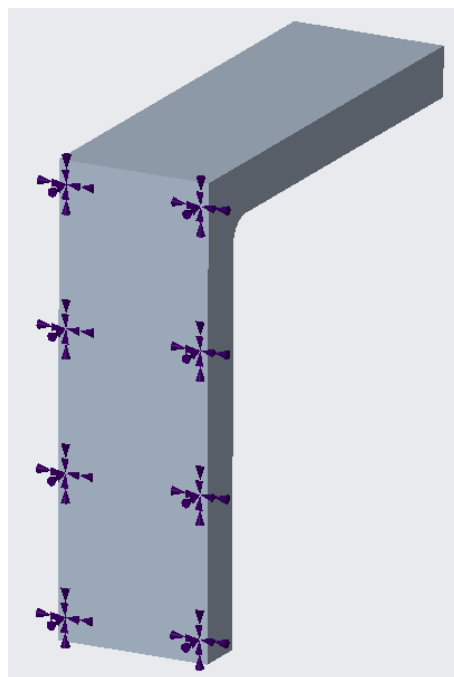
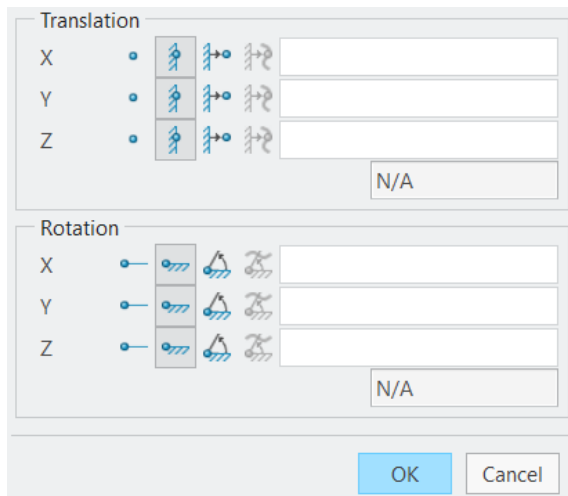
Ko smo material definirali, smo ga še morali dodati na naš model. To smo storili s funkcijo Material Assignment. Material smo poiskali na mestu, kjer smo ga shranili v računalnik, nato pa ukaz potrdili (Slika 70).



Slika 70: Dodajanje materiala k L-kotniku

3.8.2 Določitev vpetja

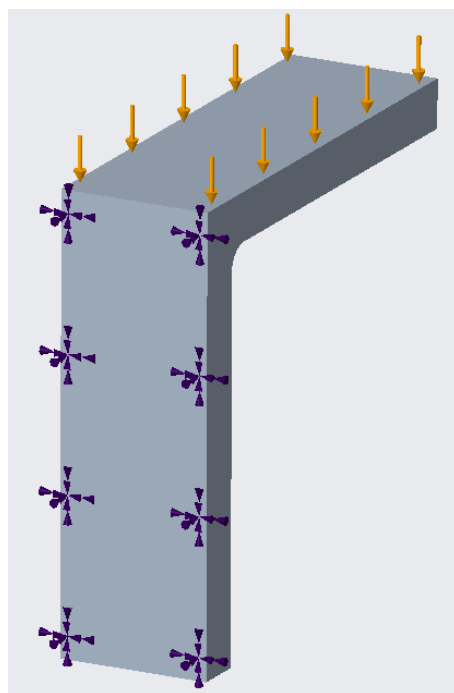
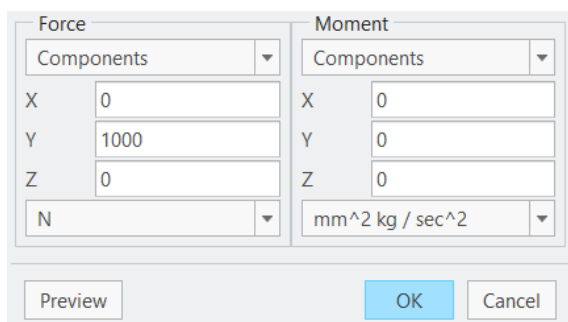
V meniju smo izbrali funkcijo Displacement in označili celotno zadnjo stran L-kotnika. Nižje, v okvirju Translation, smo pustili, da so bili pomiki nastavljeni na Fixed oziroma nepomično. V okvirju Rotation pa smo označili celoten drugi stolpec, prav tako na Fixed, kar je pomenilo, da so bile rotacije v vseh oseh onemogočene (Slika 71). S pritrditvijo ukaza smo L-kotnik v vseh oseh fiksno vpeli, brez rotacij ali pomikov.



Slika 71: Določitev vpetja

3.8.3 Določitev obremenitve

V meniju smo nato izbrali funkcijo Force/Moment in označili celotno zgornjo stran L-kotnika (Slika 72). V okvirčku Force smo spodaj za enoto izbrali N in nato v smeri Y osi definirali velikost sile 1000 N.

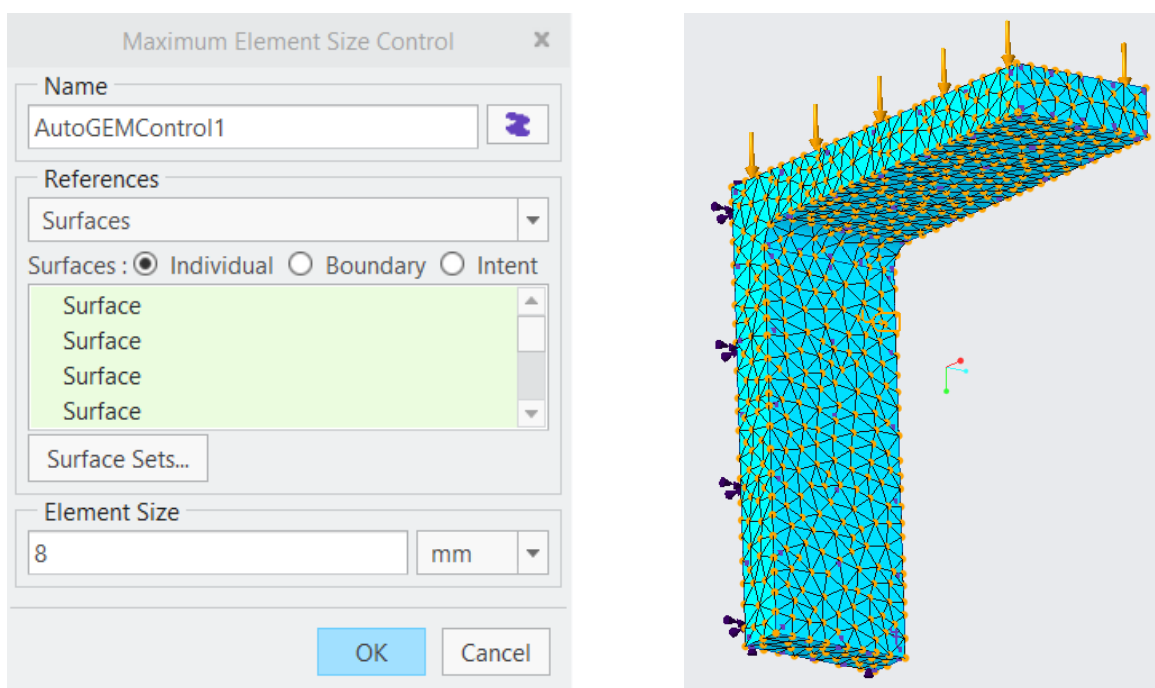


Slika 72: Določitev obremenitve

3.8.4 Mreženje

V programskem paketu Creo ni potrebno posebej delati mreženje, ker jo program glede na izmere modela sam prilagodi temu. Ker pa smo želeli, da bi bila primerjava čim bolj relevantna, smo jo prilagodili našim zahtevam.

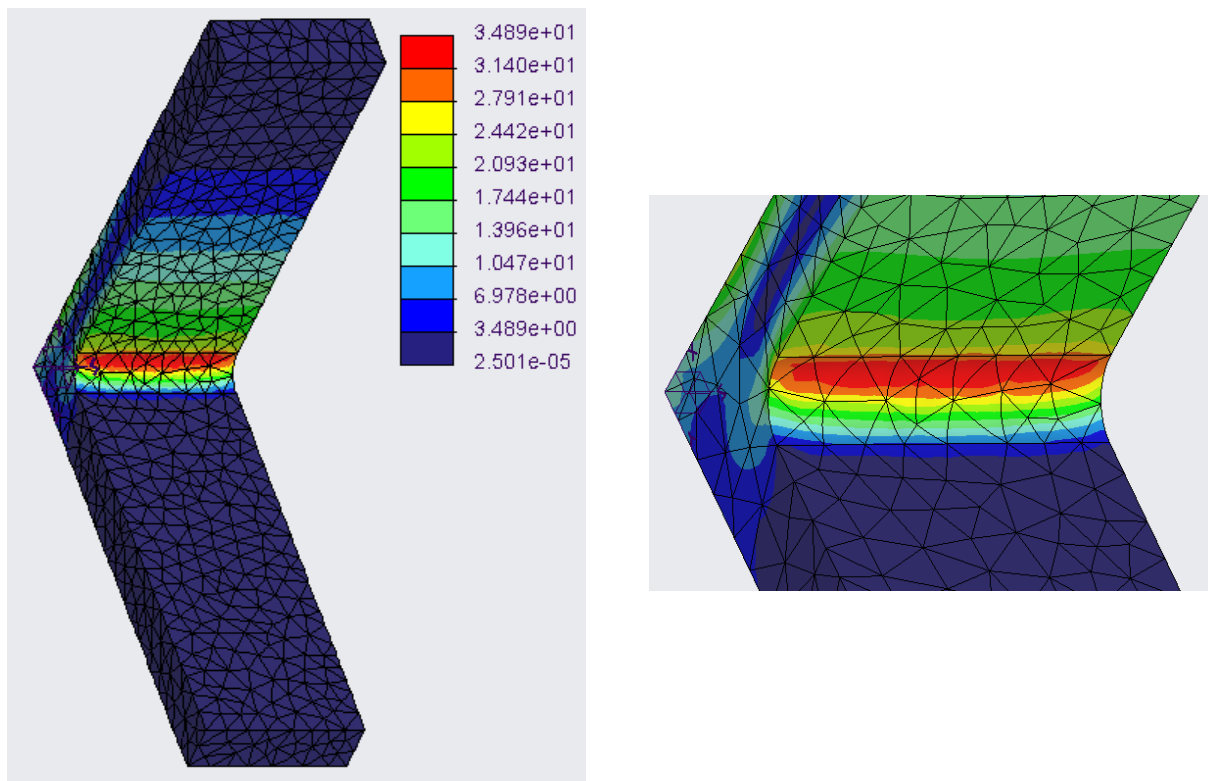
V orodni vrstici smo izbrali Refine Model in desno v meniju nato Control. Z drsnikom smo izbrali prvo funkcijo, in sicer Maximum Element Size. Označili smo vse površine na modelu in v okence Element Size vpisali 8 mm (Slika 73). S tem smo določili globalno velikost elementov in prvo statično analizo L-kotnika.



Slika 73: Določitev mreže in apliciranje na L-kotnik

3.8.5 Analiza rezultatov prve mreže

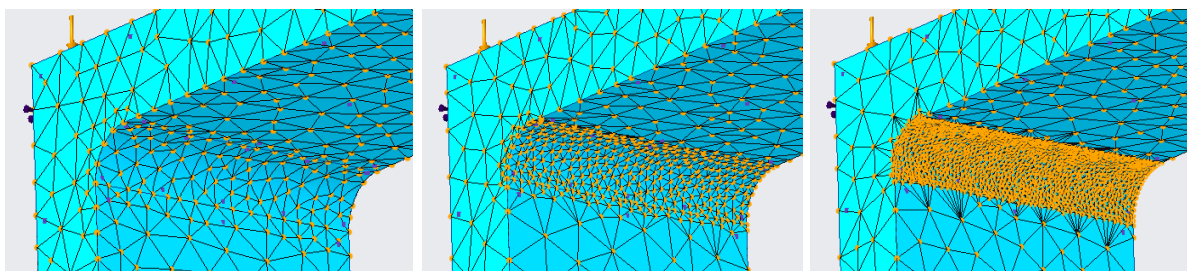
Grafični prikaz von Missovih napetosti prikazuje naslednja slika (Slika 74).



Slika 74: Nestrukturirana mreža 1 (napetost)

3.8.6 Ponovno mreženje

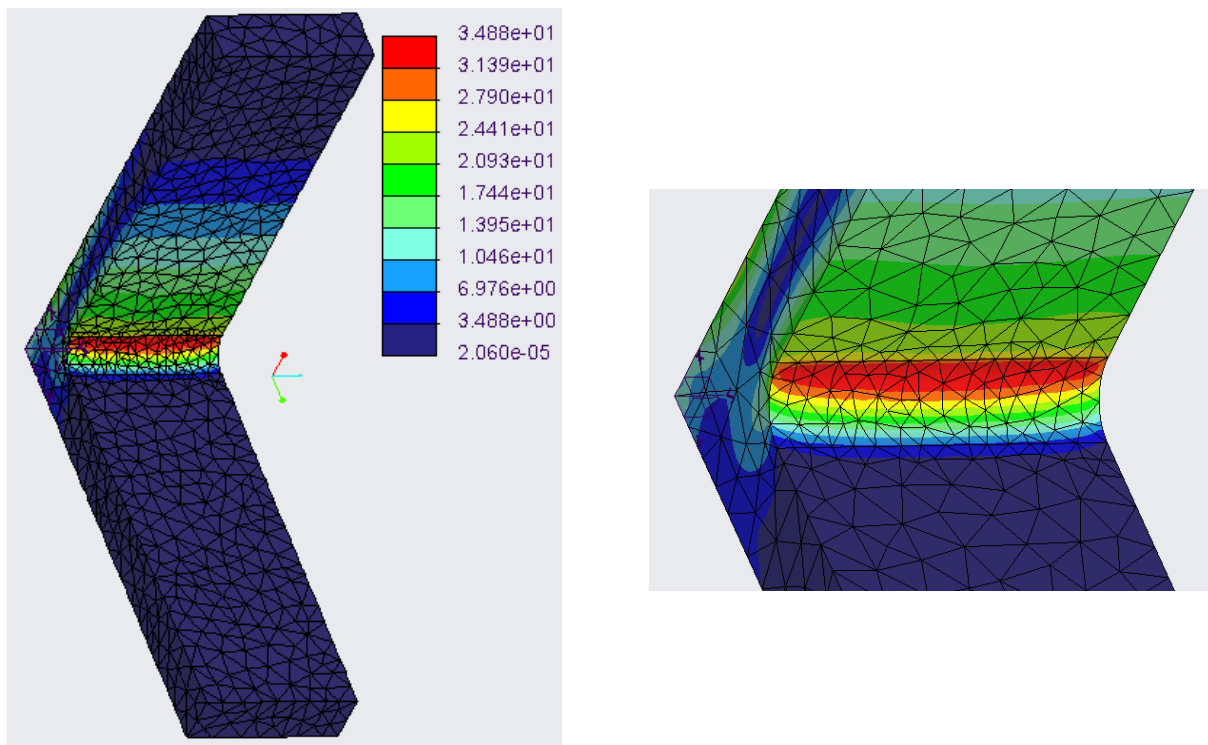
Mrežo smo želeli v predelu radija zgostiti za natančnejše rezultate, zato smo se vrnili nazaj v modul Refine Model in izbrisali prejšnjo mrežo. Postopek smo ponovili, torej smo izbrali funkcijo Element Size Control in tokrat označili vse površine razen radija in jim določili velikost elementov 8 mm, tako kot prej. Nato pa smo še enkrat izbrali funkcijo Element Size Control in označili radij in mu predpisali velikosti elementov 4, 2 in 1 mm, tako da smo spet dobili tri različne mreže (Slika 75).



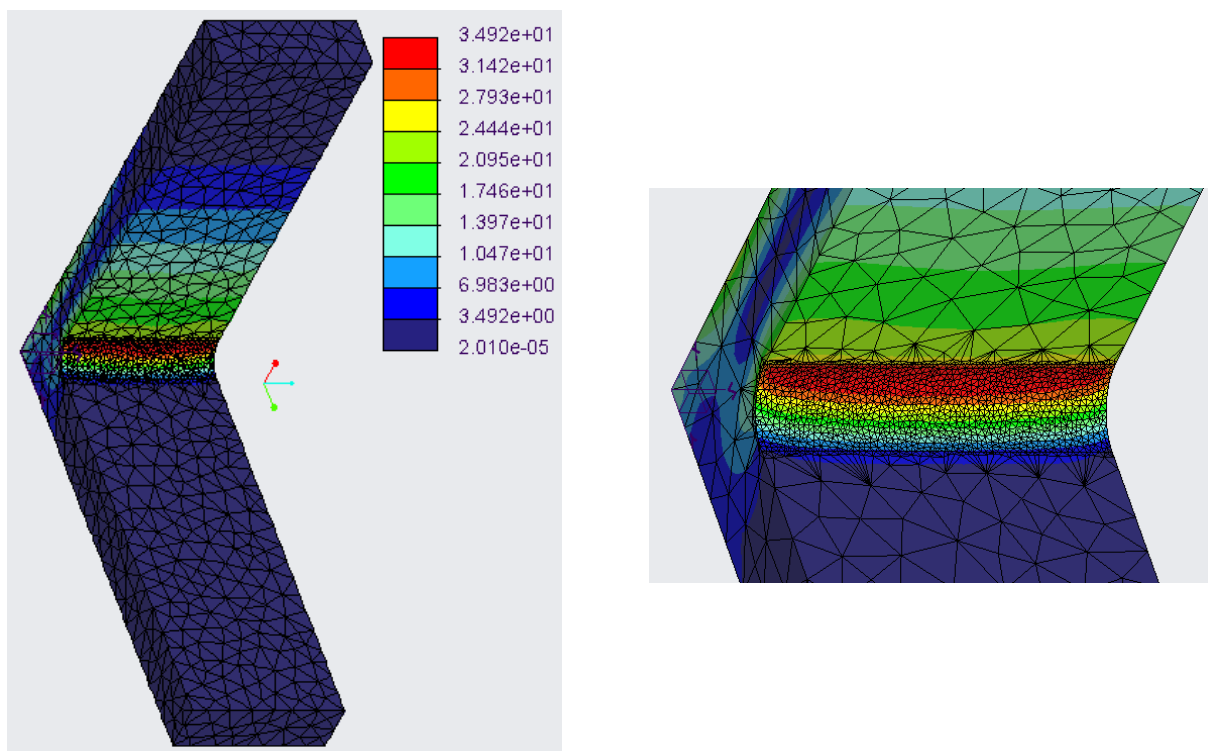
Slika 75: Različne zgostitve mrež v predelu radija

3.8.7 Analiza rezultatov zgoščenih mrež

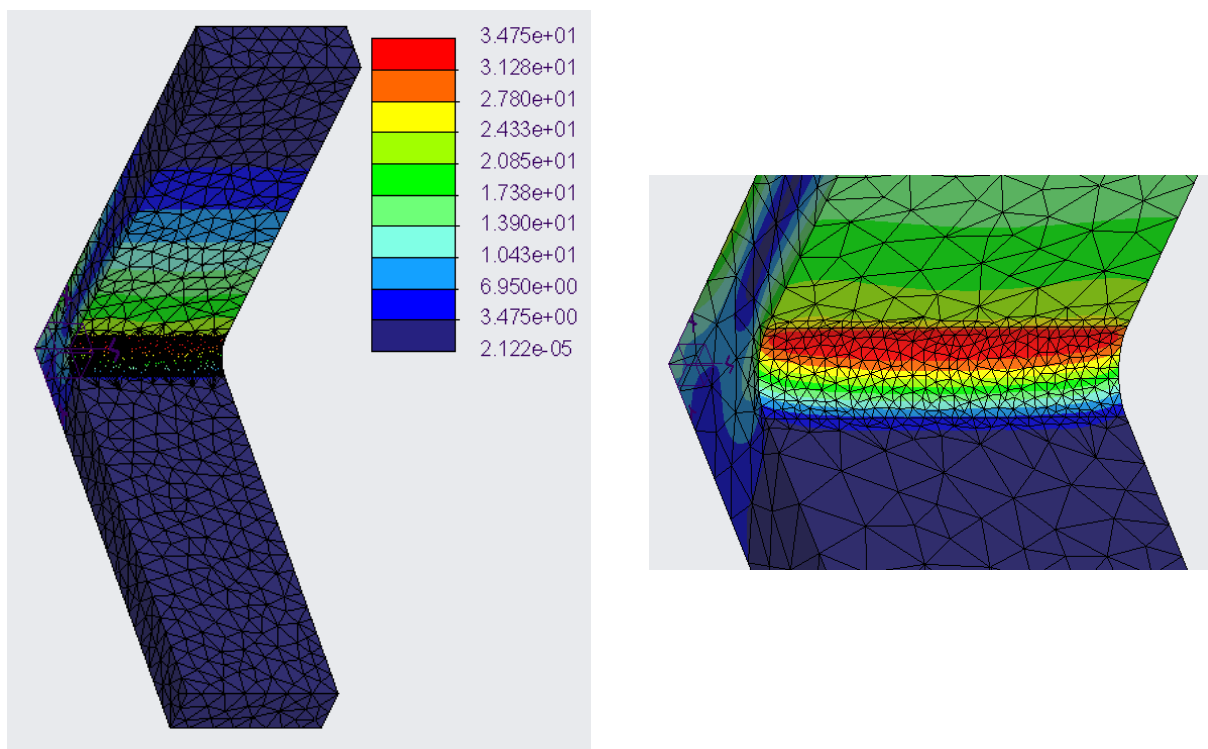
Grafični prikaz von Missovih napetosti prikazuje spodnje slike.



Slika 76: Nestrukturirana mreža 2 (napetost)



Slika 77: Nestrukturirana mreža 3 (napetost)



Slika 78: Nestrukturirana mreža 4 (napetost)

3.8.8 Primerjava in analiza rezultatov v programu Creo

Tabela 4: Primerjava rezultatov trdnostne analize v Creu

Mreža	Napetost [MPa]	Razlika [%]
Mreža 1 (8 mm)	34,89	0,40
Mreža 2 (4 mm)	34,88	0,37
Mreža 3 (2 mm)	34,92	0,49
Mreža 4 (1 mm)	34,75	/

Priprava simulacije je bila v večini primerov precej podobna kot v Solidworksu. Torej smo simulacijo zagnali z le nekaj parametri, ki smo jih morali izpolniti. Uporabili smo tri nestrukturirane mreže, ki smo jih zgoščali v predelu radija. Rezultati so prišli samo trije, vendar zelo zanimivi. Med mrežami sploh ni bilo opazne razlike. Razlog za to tiči v samem programu, saj Creo sam z izračunom določi, kje bo prišla največja napetost in tam poveča stopnjo interpolacijske funkcije, zato zgoščanje mreže nima velikega vpliva na maksimalno napetost.

Največjo napetost je tako pokazala mreža 3 s 9697 elementi, in sicer 34,92 MPa, čas, ki ga je računalnik potreboval za izračun, pa je bil 66 sekund. Razlika med najmanjšo in največjo napetostjo je znašala tako 0,49 % oziroma 0,17 MPa (Tabela 4).

3.9 PRIMERJAVA REZULTATOV L-KOTNIKA

Tabela 5: Primerjava rezultatov med programskimi paketi

Programski paket	Napetost [MPa]
Solidworks	34,98
Abaqus	34,16
Ansys	35,184
Creo	34,92
Analitični izračun	29,53

Rezultati analize (Tabela 5) so si bili precej blizu, vendar je vseeno znašala največja razlika med programi 3 % oziroma 1,024 MPa, največja razlika med programom in analitičnim izračunom pa je znašala 19,15 % oziroma 5,654 MPa. Z analizo se je pokazala prednost numeričnega izračuna v primerjavi z analitičnim, saj je v povprečju pokazala 20 % večjo napetost, ko se je upoštevala dejanska oblika modela in ne poenostavljena. Med programskimi paketi smo pričakovali podobne rezultate med programoma Creo in Solidworks, ki sta si že v osnovi precej podobna, kar se tiče funkcij in namembnosti, ter med Abaqusom in Ansysom, ker sta oba programa naprednejša v perspektu numeričnih analiz. Napoved smo lahko potrdili za Creo in Ansys, kjer je bila razlika le 0,06 MPa. Enako pa ne moremo trditi za Abaqus in Ansys, ker se je ravno tu pojavila največja razlika, in sicer 1,024 MPa.

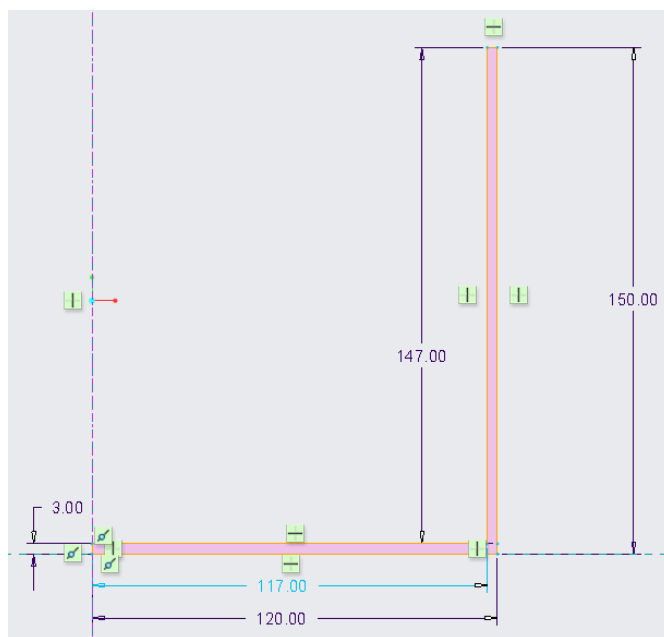
4 TERMIČNA ANALIZA POSODE ZA KUHANJE KAVE

4.1 PRIPRAVA MODELA

Ker smo želeli izvedeti več tudi o toplotnih simulacijah in prehajanju toplote, smo zmodelirali še posodo za kuhanje kave v programskem paketu Creo 5.0. Hoteli smo izvedeti, kako se toplota širi po materialu (Al 2014), če spodnjo ploskev posode obremenimo s 1500 W toplotne energije. Zanimalo nas je, ali se toplota razširi tako daleč, da vpliva na temperaturo ročaja posode in ali je temperatura ročaja dovolj majhna, da ga lahko primemo.

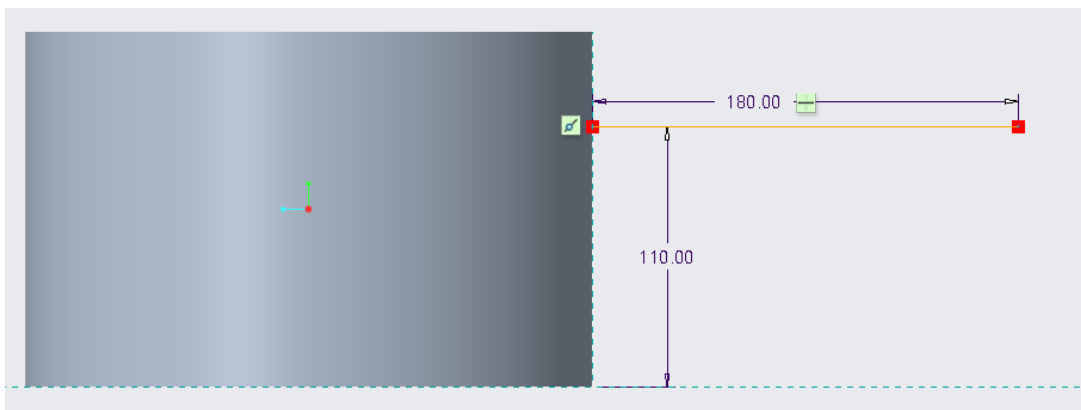
4.2 MODELIRANJE POSODE ZA KUHANJE KAVE

V začetnem programskem oknu smo izbrali Part, nato pa v programski funkciji Sketch narisali v prerezu 2D pogled posode (Slika 79).

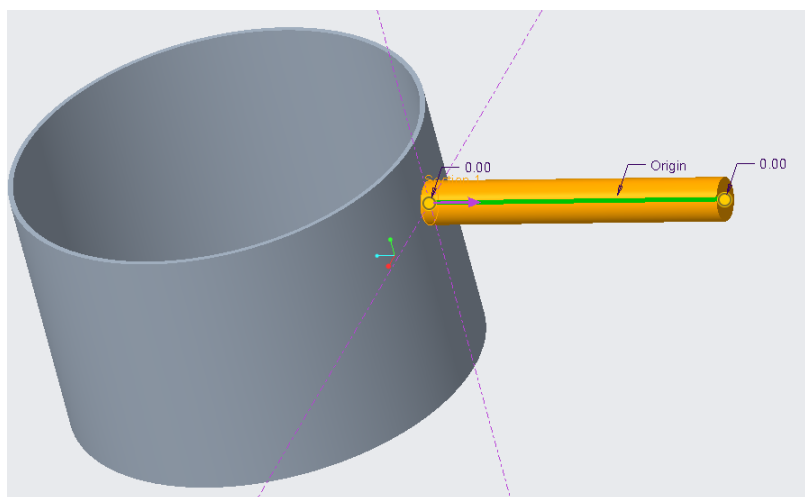


Slika 79: Stranski ris posode brez ročaja

Najprej smo narisali obliko, vidno na zgornji sliki (Slika 79), nato pa jo s funkcijo Revolve postavili v prostor (Slika 80).

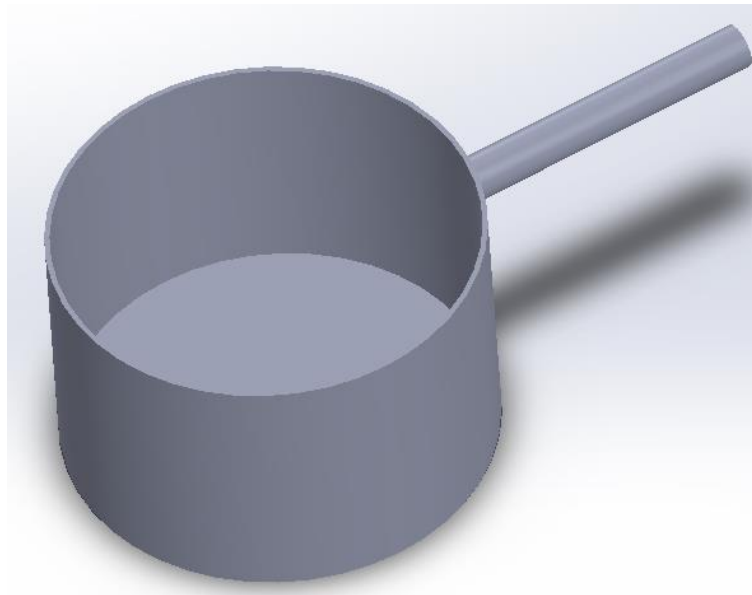


Slika 80: Uporaba funkcije Revolve in črta, po kateri je bil speljan ročaj



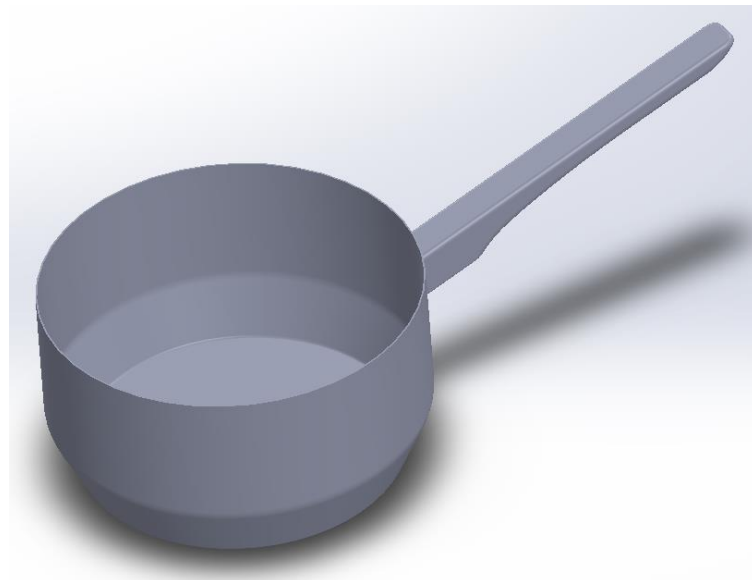
Slika 81: Risanje ročaja

Nato smo s funkcijo Sketch narisali še črto (Slika 80), po kateri smo kasneje s funkcijo Sweep v prostor izvlekli ročaj posode (Slika 81). Pri tem smo morali biti pozorni, da se je začetek ročaja ujema z obliko posode, kar smo zagotovili tako, da smo v zavihku Options izbrali Merge Ends. Model smo nato shranili v splošno obliko STEP, da ga lahko ostali programi prepoznajo in odprejo pri izdelavi simulacij.



Slika 82: Končni model posode

Končni model posode vidimo na zgornji sliki (Slika 82), vendar je to bila že optimirana oblika in tako ni bila naša prva. Prvotno zamisel, kako bi posoda izgledala, lahko vidimo na naslednji sliki (Slika 83). Zmodelirana je bila precej lepše in zahtevnejše, vendar smo po izvedbi simulacij obliko poenostavili, ker so nanjo vplivali številni radiji pri mreženju posode. To nam je na začetku vzelo kar precej časa.



Slika 83: Model prvotne posode

4.3 PRIPRAVA ANALIZE

Pri posodi za kuhanje kave so nas zanimala termične obremenitve, zato smo preizkuse na modelu v vseh programskih paketih opravljali v okolju za termične analize.

Za primerjavo in preračun oziroma analizo po metodi končnih elementov smo prav tako kot pri L-kotniku izbrali programske pakete Solidworks 2019, Ansys 2019 R2, Abaqus 2017 in Creo 5.0.

Za material, iz katerega je narejena celotna posoda, smo izbrali aluminijevo zlitino 2014. Ker jo je zlahka obdelovati v določenih temperaturah in spada med najmočnejše razpoložljive aluminijeve zlitine ter ima visoko trdoto. [5] Glavni lastnosti materiala, ki smo jih potrebovali pri termičnih analizah, sta bili toplotna prevodnost (thermal conductivity) in emisijski koeficient (convection coefficient). Da bi bila primerjava čim bolj relevantna, smo izbrali enako obliko in velikost končnih elementov v vseh programskih paketih.

4.4 ROBNI POGOJI IN LASTNOSTI MATERIALA

Lastnosti aluminija 2014:

- Emisijski koeficient: $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ [1]
- Toplotna prevodnost: 160 W/mK

Robni pogoji:

- Temperatura okolice: 295 K
- Absolutna ničla: $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Toplotna obremenitev: 1500 W

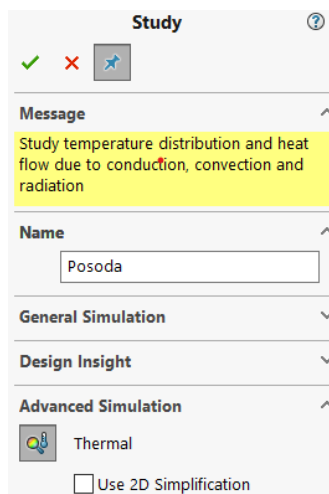
4.5 SOLIDWORKS

4.5.1 Uvoz modela

Ker smo posodo zmodelirali v programu Creo in ne v Solidworksu, smo morali model najprej uvoziti. To smo naredili tako, da smo v začetnem oknu izbrali Open, v naslednjem pa vrsto datoteke STEP in nato poiskali model posode na mestu, kjer je bil shranjen v računalniku. S potrditvijo smo model uvozili.

4.5.2 Definicija nove termične analize

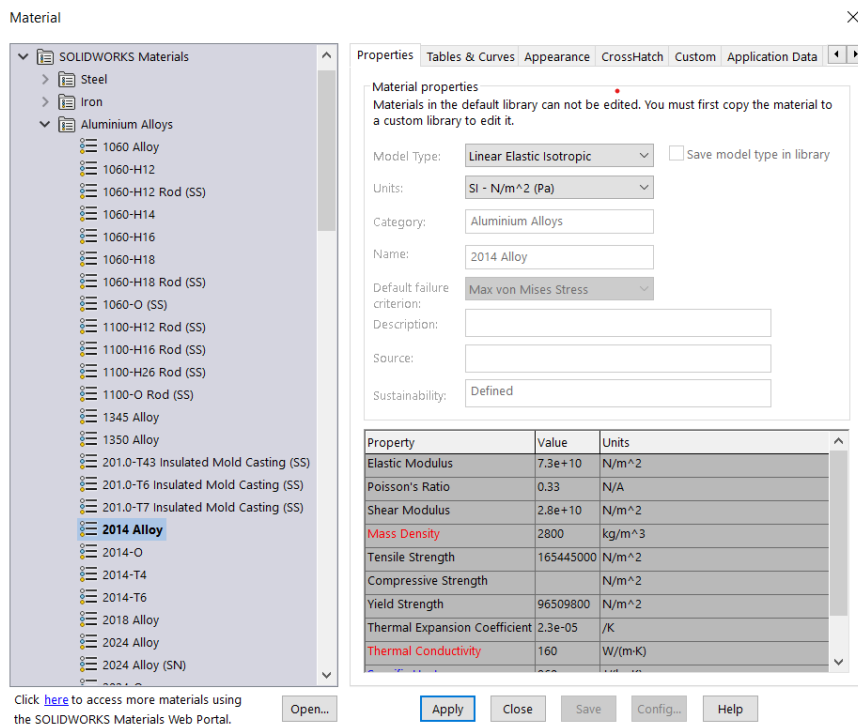
Definirali smo novo analizo, tako da smo med tipi analiz izbrali Thermal in jo poimenovali Posoda (Slika 84).



Slika 84: Definicija termične analize

4.5.3 Določitev materiala posode

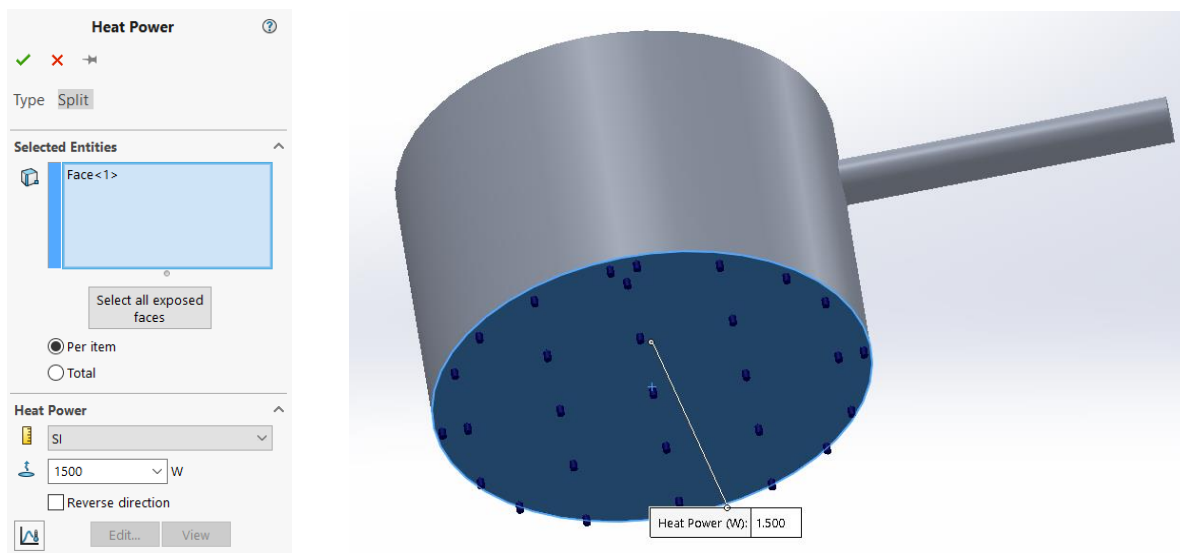
V simulacijskem drevesu pod Posoda, v knjižnici, kjer se nahajajo vsi materiali, smo izbrali aluminijevo zlitino 2014 (Slika 85).



Slika 85: Določitev materiala

4.5.4 Določitev toplotne obremenitve

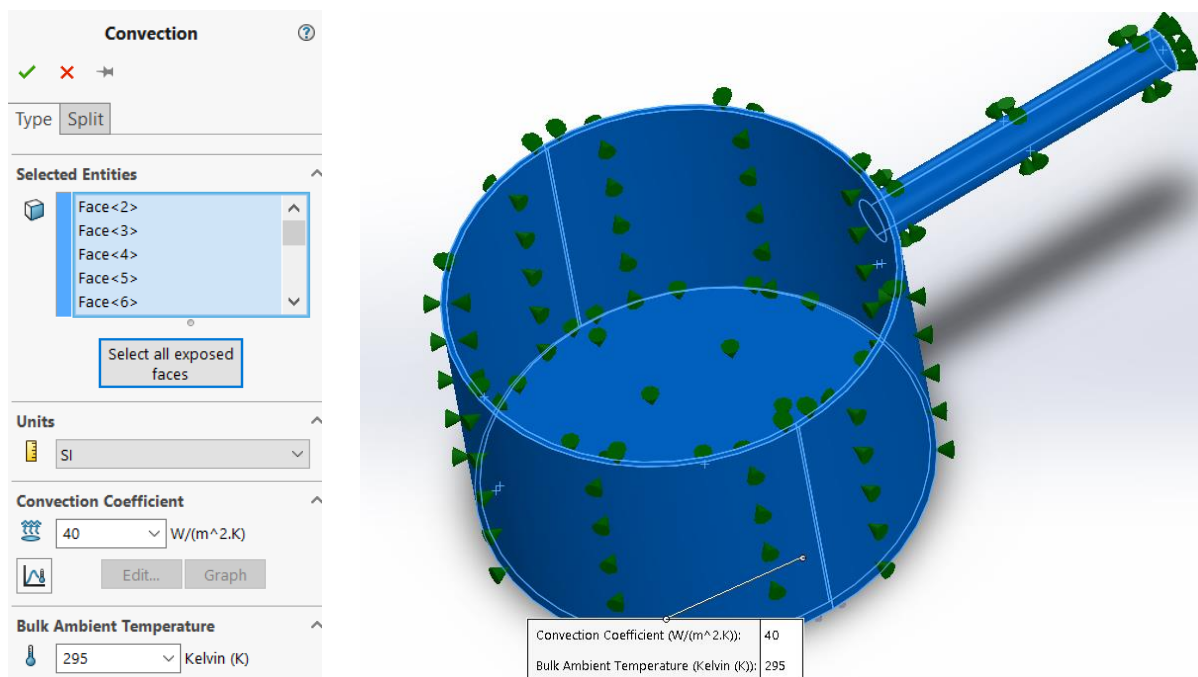
Na simulacijskem drevesu pod Thermal Loads smo izbrali možnost Heat Power. V naslednjem oknu pa smo vpisali vrednost toplotne obremenitve (1500 W) in označili površino, kjer smo želeli, da ta obremenitev deluje – spodnja ploskev posode (Slika 86).



Slika 86: Določitev toplotne obremenitve

4.5.5 Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

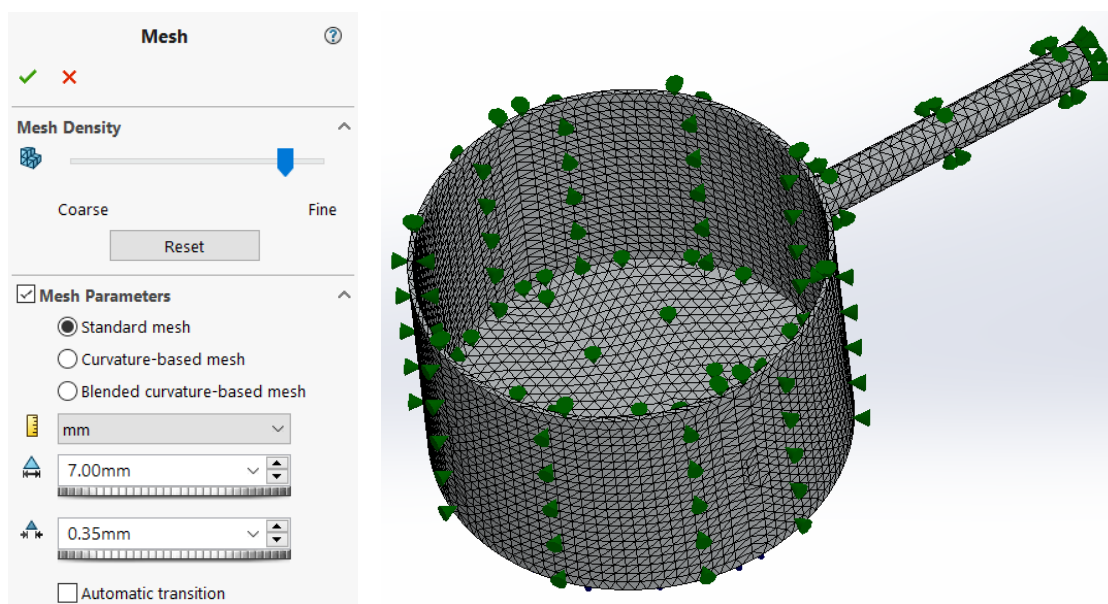
V simulacijskem drevesu smo pod Thermal Loads izbrali možnost Convection. V novem oknu smo nato vpisali emisijski koeficient, temperaturo okolice in označili vse površine posode razen spodnje, kjer smo že definirali toplotno obremenitev (Slika 87).



Slika 87: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

4.5.6 Mreženje

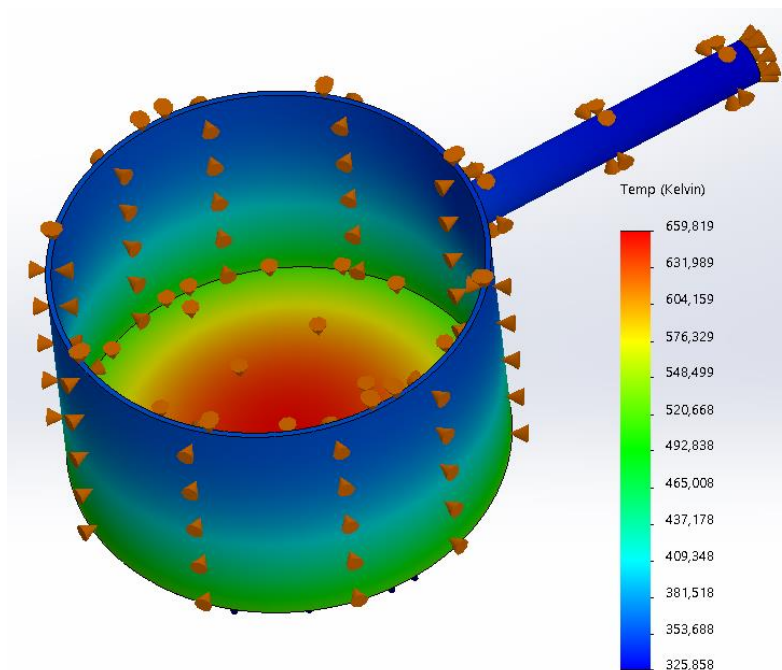
Za mreženje v simulacijskem drevesu smo izbrali modul Mesh in nato Create Mesh. Izbrali smo standardno mrežo in nastavili velikost končnih elementov na 7 mm (Slika 88). Minimalno vrednost elementov smo pustili, da se je nastavila avtomatsko (0.25 mm).



Slika 88: Mreža – 7 mm

4.5.7 Analiza rezultatov prve mreže

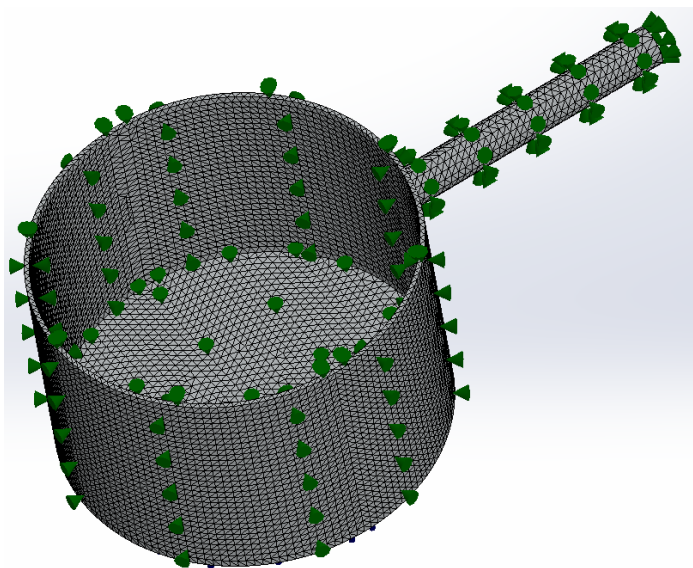
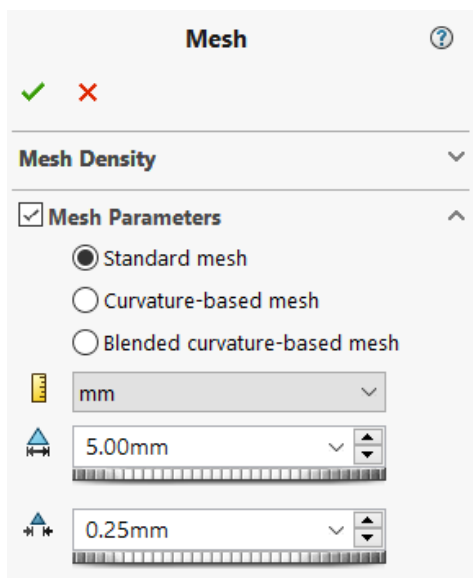
Na spodnji sliki (Slika 89) so vidni rezultati analize po prvem mreženju. Najvišja temperatura, ki se je pojavila na dnu posode, je znašala 659,819 K (386,669 °C), najnižja temperatura, ki se je pojavila na ročaju, pa 325,858K (52,708 °C).



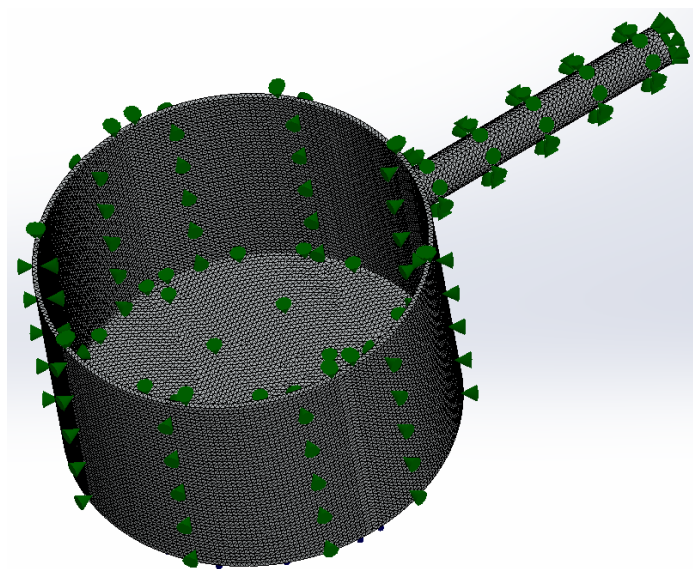
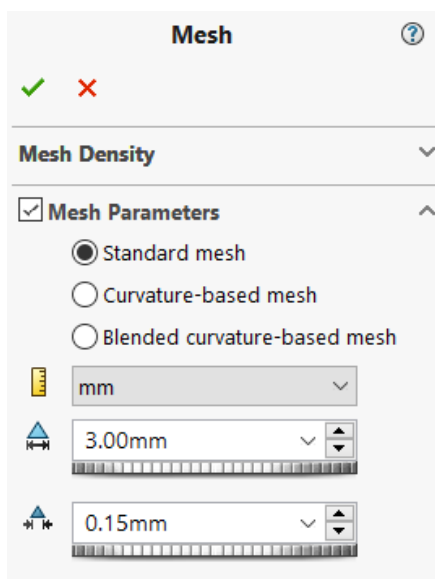
Slika 89: Mreža – 7 mm (temperatura)

4.5.8 Ponovno mreženje

V simulacijskem drevesu, v modulu Mesh, smo ponovno ustvarili dve novi bolj zgoščeni mreži (Sliki 90 in 91). Tokrat z velikostjo elementov 5 mm in 3 mm, in znova pustili, da se je spodnja vrednost (0.25 mm in 0.15 mm) nastavila avtomatsko.



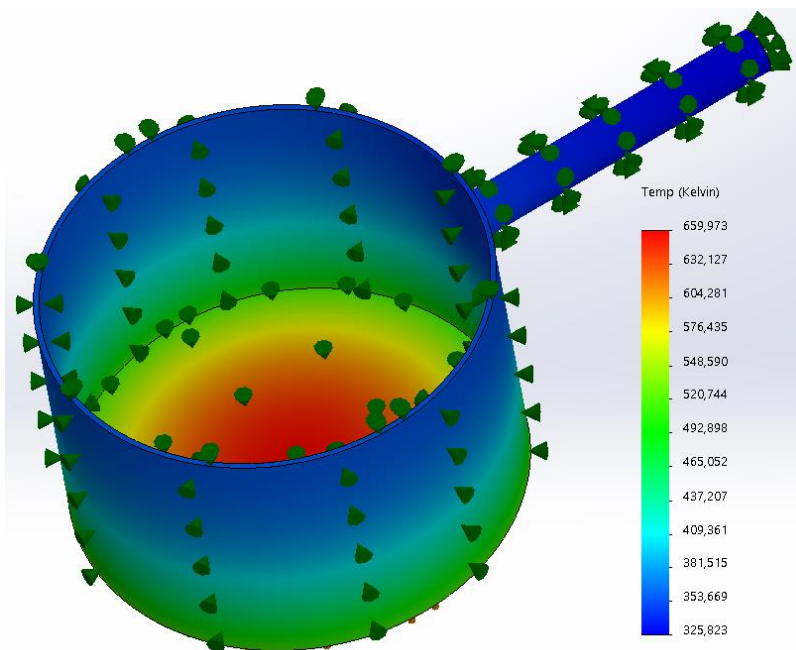
Slika 90: Mreža – 5 mm



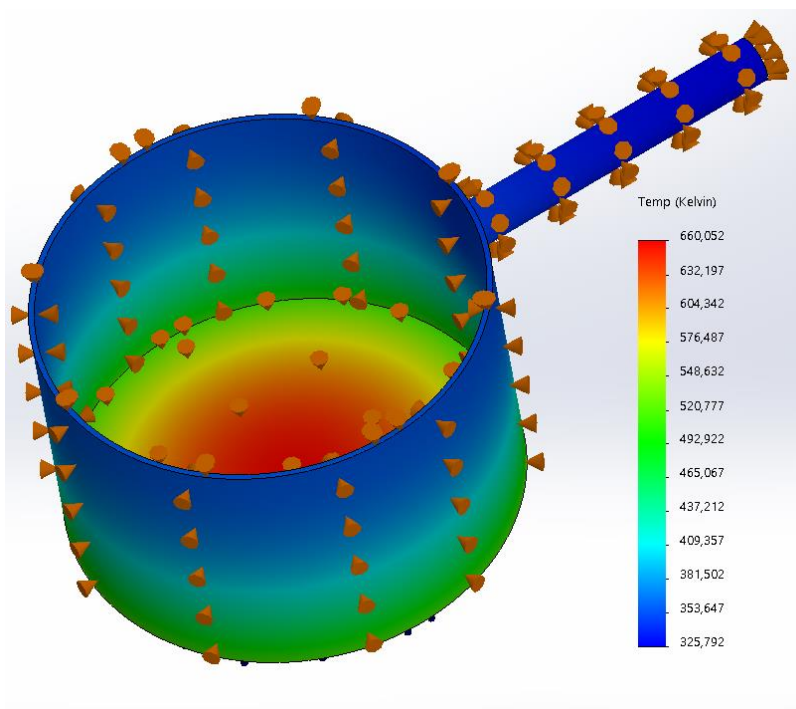
Slika 91: Mreža – 3 mm

4.5.9 Analiza rezultatov zgoščenih mrež

Rezultati so bili zelo podobni rezultatom prve mreže, kar pomeni, da gostota mreže skoraj ni vplivala na končne rezultate.



Slika 92: Mreža – 5 mm (temperatura)



Slika 93: Mreža – 3 mm (temperatura)

4.5.10 Primerjava in analiza rezultatov v programu Solidworks

Tabela 6: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Solidworksu

Mreža	Temperatura na ročaju posode [K]	Temperatura na ročaju posode [°C]	Razlika [%]
Mreža 1 (7 mm)	325,858	52,708	0,02
Mreža 2 (5 mm)	325,823	52,673	0,01
Mreža 3 (3 mm)	325,792	52,642	/

V Solidworksu je bila priprava termične analize zelo enostavna, saj je tudi sam program zasnovan tako, da lahko po zelo enostavni in logični poti pridemo do rešitve. Zelo nam je pripomoglo tudi to, da ima program že narejeno knjižico s podatki o materialih in nam posebnih materialnih lastnosti ni bilo potrebno nastavljanje. Za mreženje in preračun je potreboval zelo malo časa. Posebne razlike med rezultati različnih velikosti mrež ni bilo, kar je pomenilo, da velikost mreže ni imela močnega vpliva na rezultate, saj je razlika med prvo in tretjo mrežo znašala le 0,02 % oziroma 0,066 K (Tabela 6).

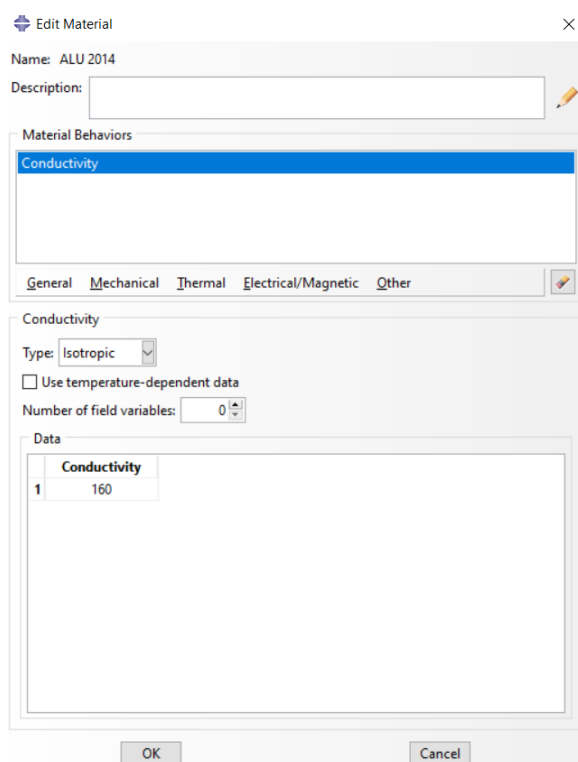
4.6 ABAQUS

4.6.1 Uvoz modela

Najprej smo morali model posode uvoziti v Abaqus. To smo naredili tako, da smo v zavihku File izbrali Import in nato Part. V oknu, ki se je odprlo, smo izbrali vrsto datoteke STEP in poiskali datoteko Posoda, na mestu, kjer smo jo shranili. S potrditvijo smo model uvozili.

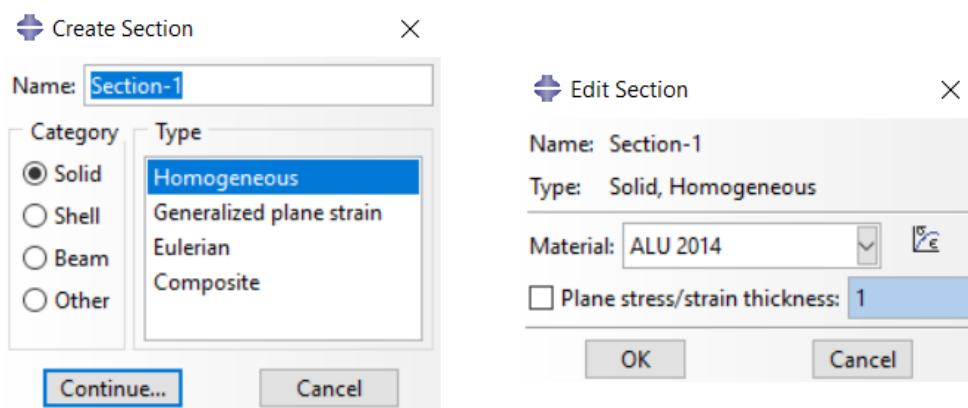
4.6.2 Določitev materialnih lastnosti

V modulu Property smo z ukazom Create Material dodali nov material in ga poimenovali ALU 2014. V zavihku Thermal smo izbrali Conductivity in v spodnji okvirček vpisali vrednost za naš material (Slika 94).



Slika 94: Določitev materialnih lastnosti

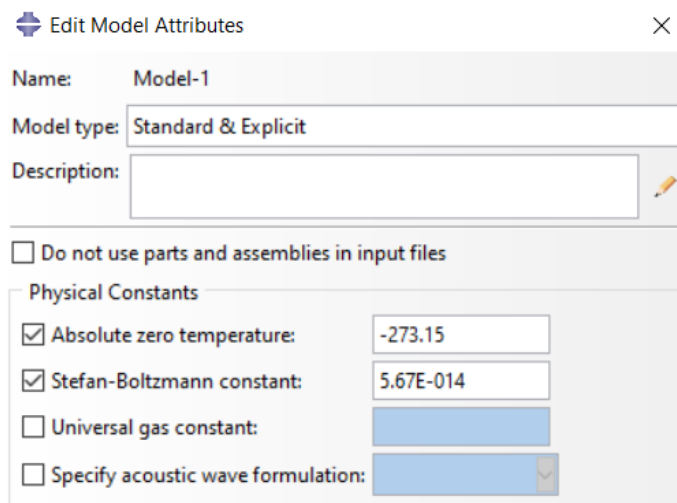
S potrditvijo smo materialu določili potrebno lastnost. Nato smo ga s kreiranjem in dodajanjem sekcije prepisali posodi (Slika 95).



Slika 95: Dodajanje sekcije

4.6.3 Vnos robnih pogojev

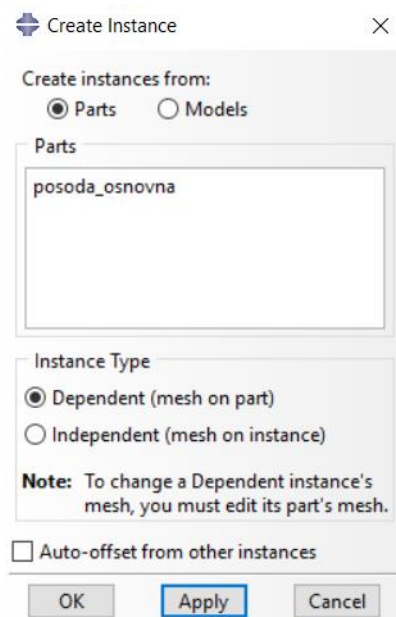
Program Abaqus je od nas zahteval določitev absolutne ničle in konstante sevanja črnega telesa. To smo naredili tako, da smo v zavihku model izbrali možnost Edit Attributes in v oba okvirčka vnesli zahtevane vrednosti (Slika 96).



Slika 96: Vnos robnih pogojev

4.6.4 Povezovanje delov

V modulu Assembly z ukazom Create Instance dodamo dele in njihove korelacije, če jih model vsebuje. V našem primeru smo označili celo posodo in ukaz potrdili (Slika 97).

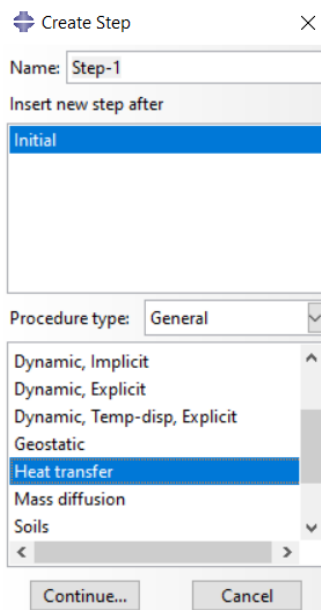


Slika 97: Povezovanje delov

4.6.5 Določitev vrste analize

Novo analizo smo ustvarili tako, da smo v modulu Step izbrali Create Step, nato pa smo v okencu Procedure Type izbrali General in spodaj v seznamu Heat Transfer (Slika 98). V

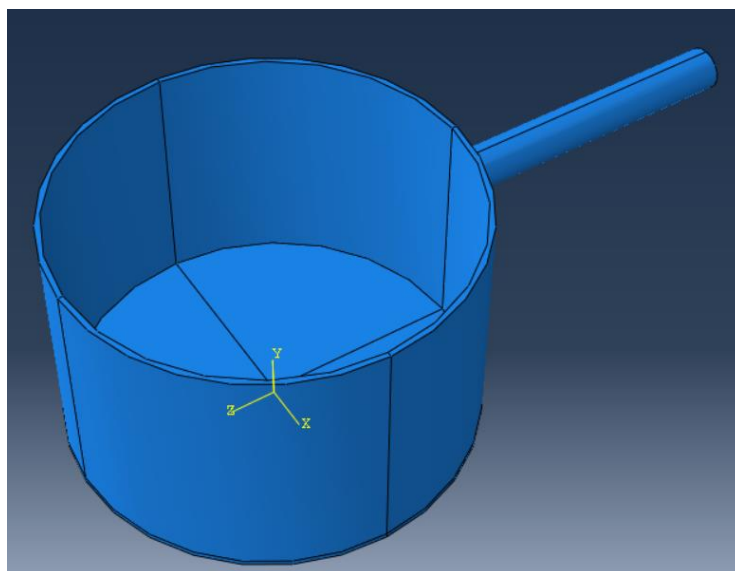
naslednjem oknu smo nato pod Response izbrali še možnost Steady-state, kar je pomenilo, da ta analiza ni odvisna od časa.



Slika 98: Definicija nove termične analize

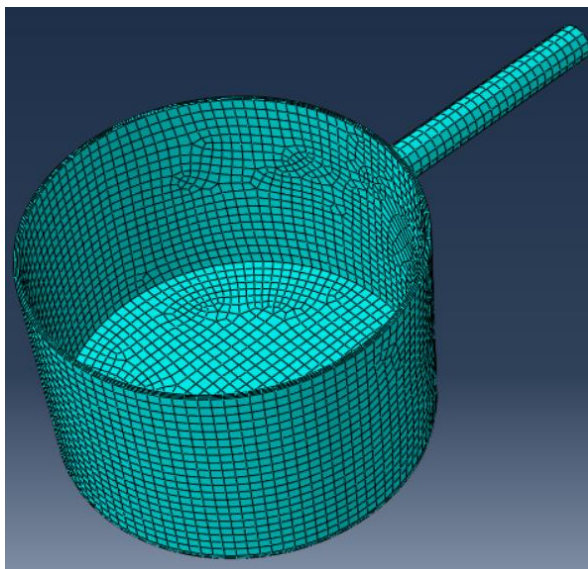
4.6.6 Mreženje

V modulu Mesh smo najprej model po ravninah razdelili na več površin zaradi kreiranja bolj kakovostne mreže (Slika 99).



Slika 99: Razdeljevanje posode na več površin

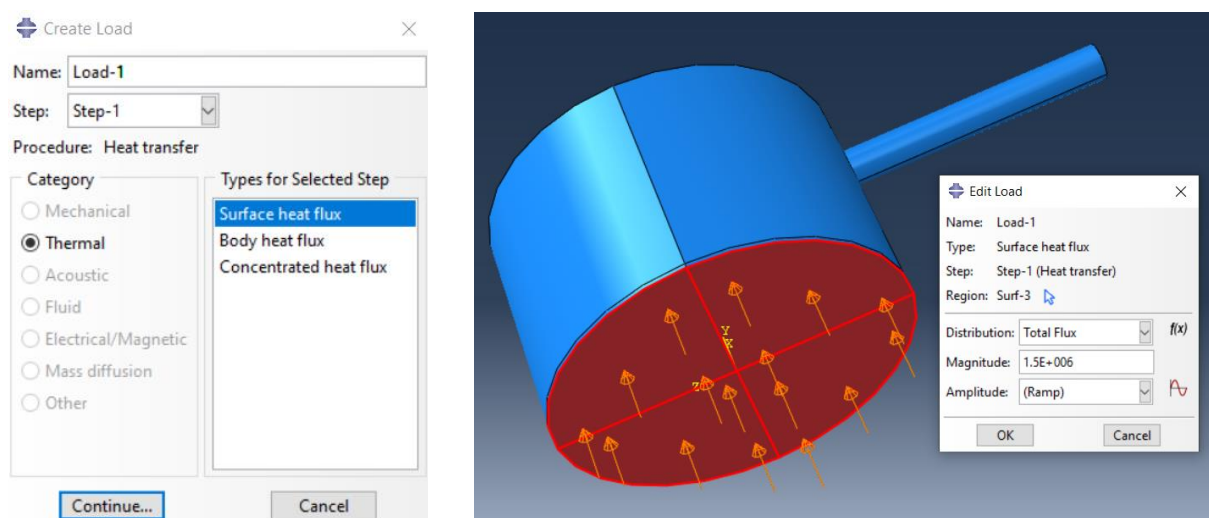
Mrežo na modelu smo nato predpisali tako, da smo izbrali ukaz Seed Part in v okence vpisali želeno velikost delcev 7 mm (Slika 100). Izbrati smo morali še tip končnih elementov, kar smo storili tako, da smo pod modulom Mesh izbrali Element Type in nato v naslednjem oknu obkljukali Heat Transfer in potrdili ukaz. Nato smo z ukazom Mesh Part model zamrežili.



Slika 100: Mreža – 7 mm

4.6.7 Določitev toplotne obremenitve

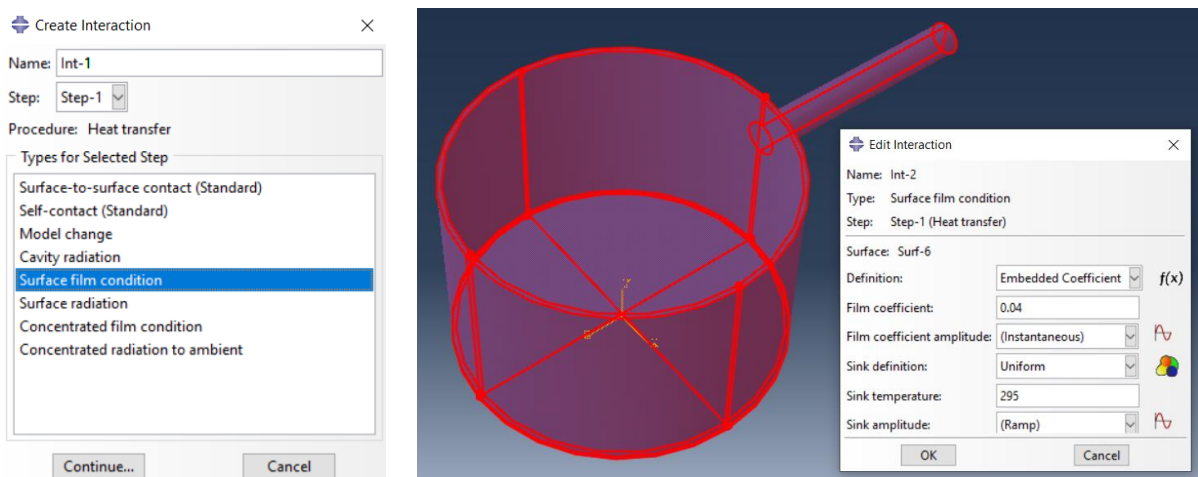
V modulu Load smo izbrali možnost Create Load in v naslednjem oknu obkljukali Surface Heat Flux. Nato smo na modelu označili spodnjo površino in vpisali vrednost toplotne obremenitve (Slika 101).



Slika 101: Določitev toplotne obremenitve

4.6.8 Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

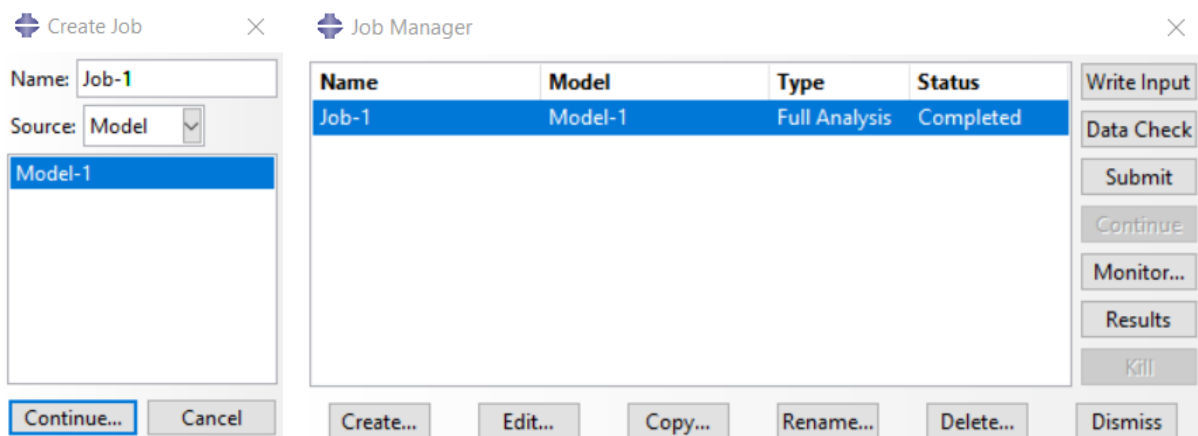
V modulu Interaction smo izbrali možnost Create Interaction in v naslednjem oknu, ki se nam je odprlo, obkljukali Surface film condition. Nato smo označili vse površine posode razen spodnje, kjer smo že definirali toplotno obremenitev in vpisali zahtevane vrednosti (Slika 102).



Slika 102: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

4.6.9 Priprava za analizo

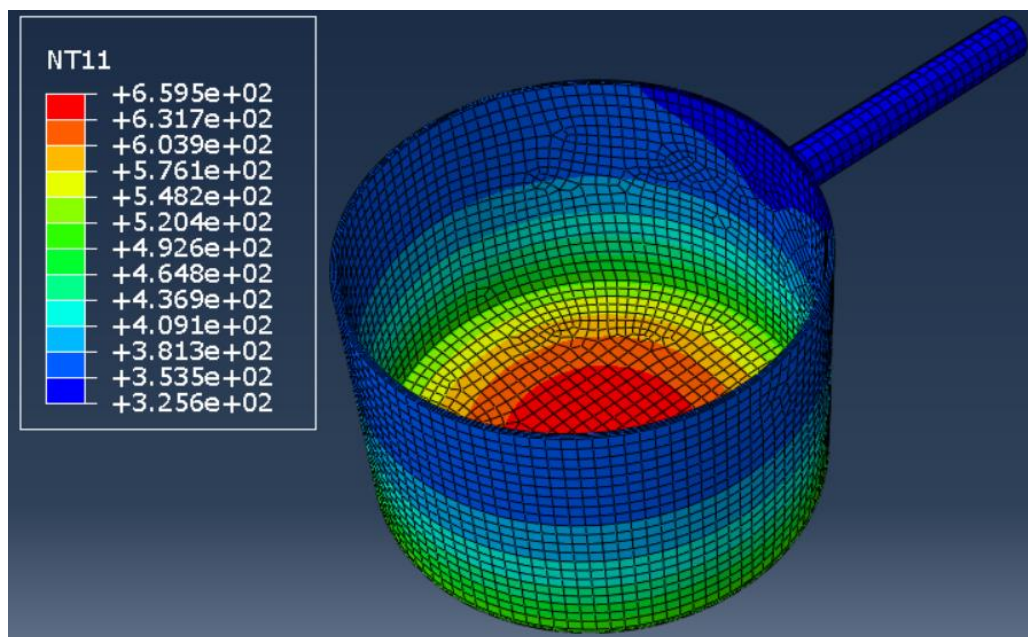
V modulu Job smo izbrali ukaz Create Job in ga z ukazom Submit zagnali (Slika 103).



Slika 103: Priprava na analizo

4.6.10 Analiza rezultatov prve mreže

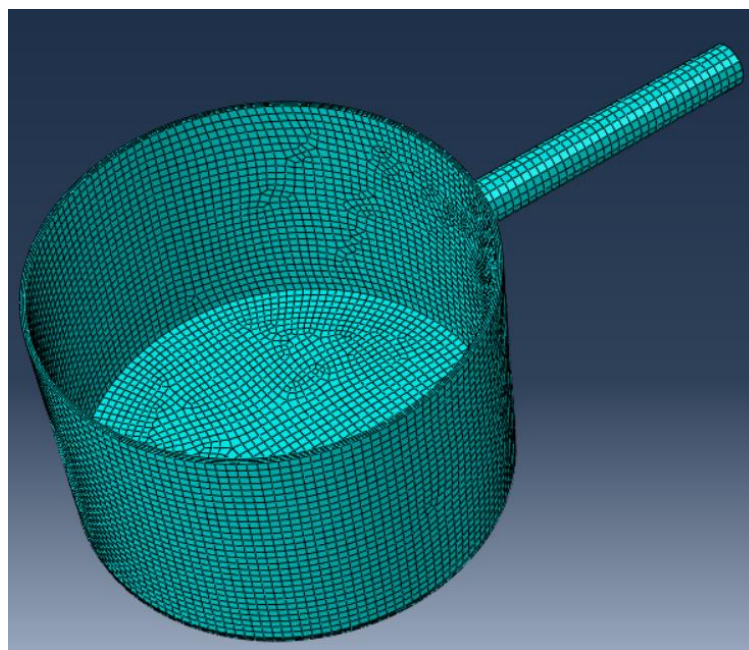
Temperatura, ki se je pojavila na ročaju, je znašala 325,6 K (52,45 °C).



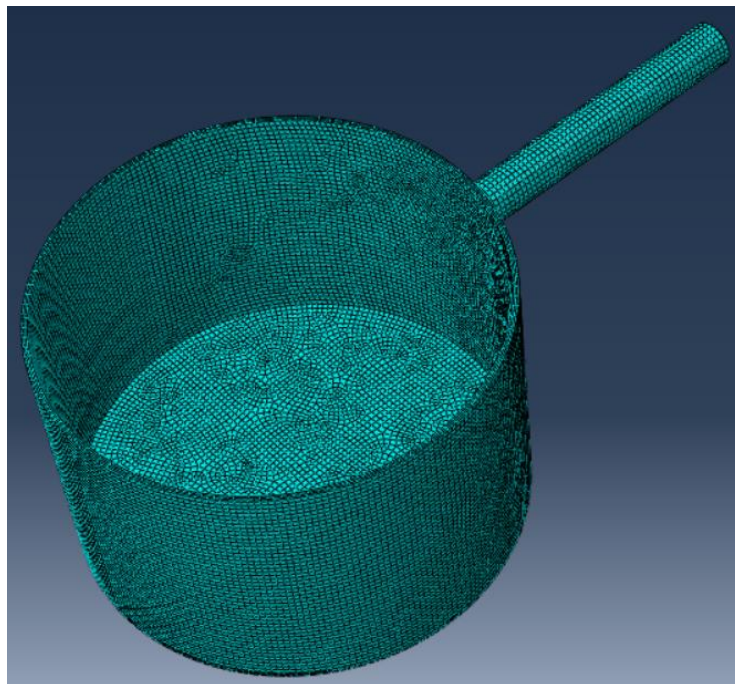
Slika 104: Mreža – 7 mm (temperatura)

4.6.11 Ponovno mreženje

V modulu Mesh smo predpisali novo mrežo tako, da smo izbrali ukaz Seed Part in v okence vpisali novo velikost delcev 5 mm in 3 mm (Sliki 105 in 106).



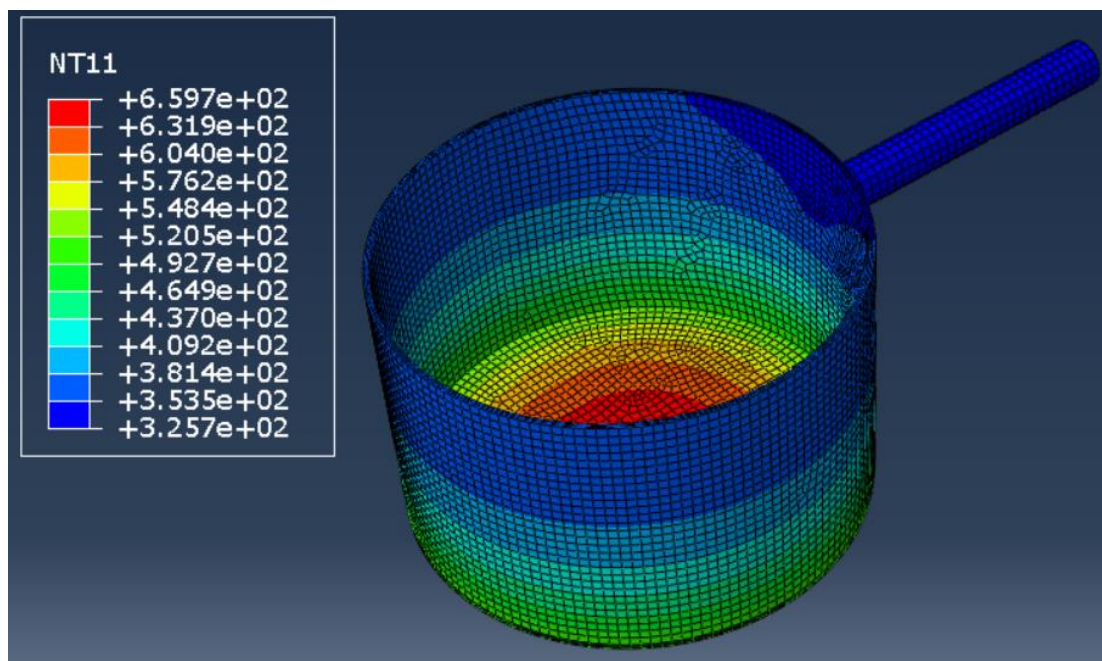
Slika 105: Mreža – 5 mm



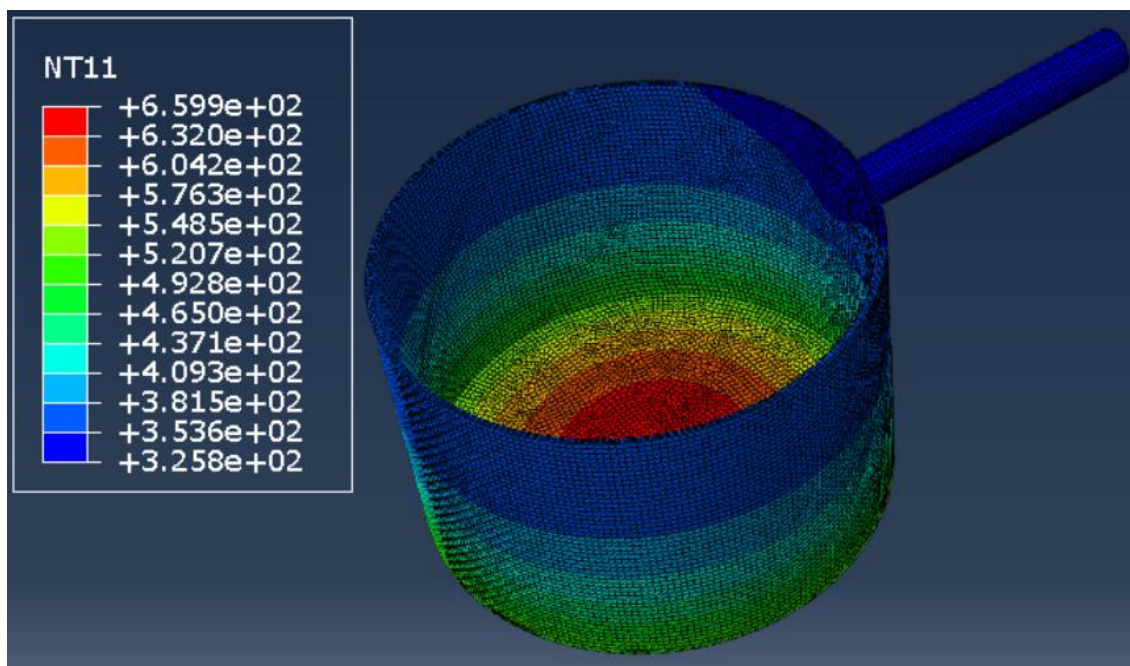
Slika 106: Mreža – 3 mm

4.6.12 Analiza rezultatov zgoščenih mrež

Rezultati so zelo podobni rezultatom prve mreže, kar pomeni, da mreža ni močno vplivala na rezultate.



Slika 107: Mreža – 5 mm (temperatura)



Slika 108: Mreža – 3 mm (temperatura)

4.6.13 Primerjava in analiza rezultatov v programu Abaqus

Tabela 7: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Abaqusu

Mreža	Temperatura na ročaju posode [K]	Temperatura na ročaju posode [°C]	Razlika [%]
Mreža 1 (7 mm)	325,6	52,45	-
Mreža 2 (5 mm)	325,7	52,55	0,03
Mreža 3 (3 mm)	325,8	52,65	0,06

V Abaqusu je bila priprava termične analize veliko trši oreh kot v Solidworksu. Ker je Abaqus program, ki je narejen izključno za izvajanje simulacij, smo morali nastaviti veliko več stvari kot v Solidworksu, za kar smo porabili tudi veliko več časa. Posebno težavo so nam povzročale enote, saj jih program nima nastavljenih. Zato smo morali paziti, da smo vrednosti pravilno pretvarjali in da so se enote ujemale, pri čemer smo morali pokazati veliko znanja. Tudi tukaj velikost mreže ni imela velikega vpliva na končne rezultate. Razlika med prvo in tretjo mrežo je znašala 0,06 % oziroma 0,2 K (Tabela 7).

4.7 ANSYS

4.7.1 Določitev materiala

Najprej smo odprli program Workbench. Na levi strani, kjer je bil stolpec z orodji, smo izbrali modul Steady-state Thermal, kar je pomenilo, da smo izvajali toplotne simulacije. Pojavilo se nam je manjše okno, v katerem smo morali izpolniti vsa področja, ki so zahtevana.

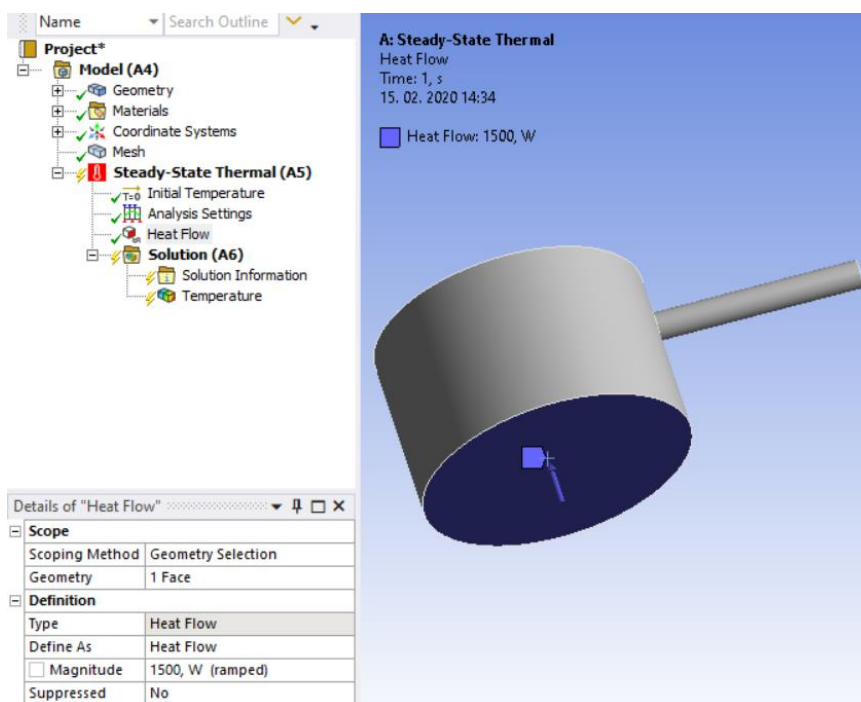
Najprej smo pod drugim poglavjem izbrali Engineering Data, kjer smo definirali material. Ker v knjižnici ni bilo materiala z enakimi karakteristikami, kot je naš, smo aluminij duplirali, ga poimenovali ALU 2014 in mu pripisali enake lastnosti, kot smo jih uporabili v prejšnjih programih.

4.7.2 Uvoz modela

Pod tretjim poglavjem smo izbrali Geometry, kjer smo pripravili model. V zavihku File smo izbrali Open in odprli Posodo.

4.7.3 Določitev toplotne obremenitve

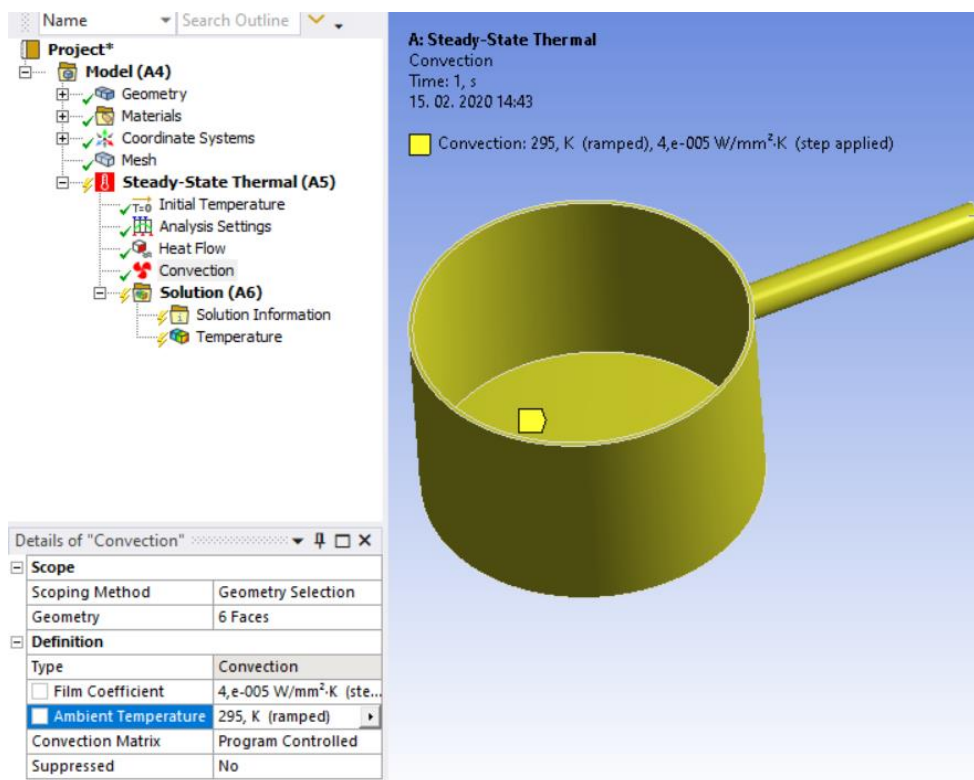
Ko smo zaključili s tretjim poglavjem, smo prešli na naslednje, kjer smo določili še ostale parametre, potrebne za simulacijo. V modulu Steady-State Thermal smo izbrali možnost Heat Flow, označili spodnjo površino posode in v okence spodaj vpisali želeno vrednost (Slika 109).



Slika 109: Določitev toplotne obremenitve

4.7.4 Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

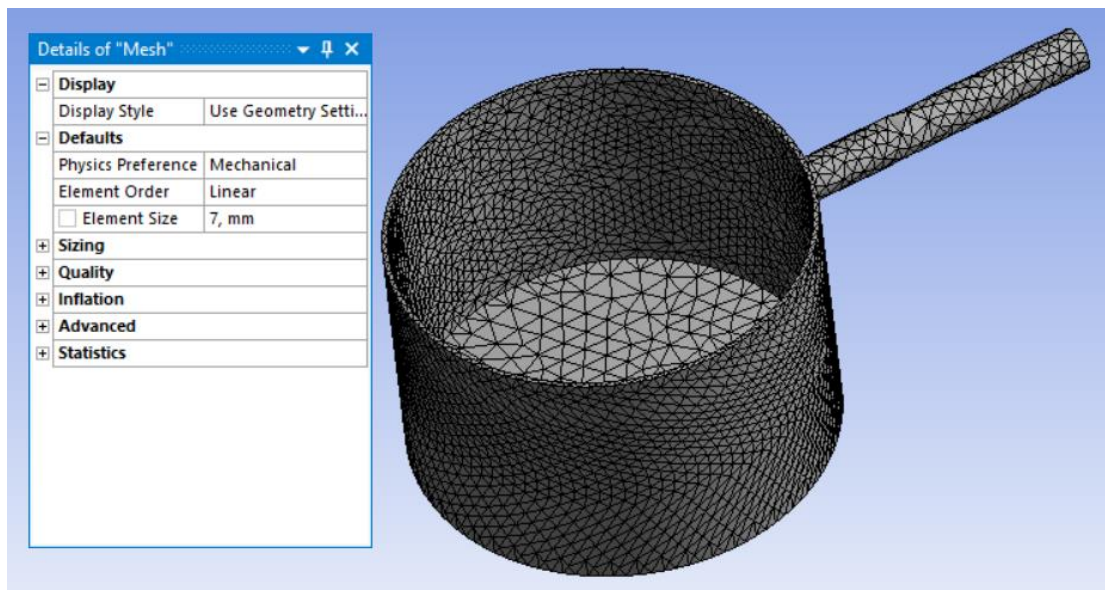
V modulu Steady-State Thermal smo izbrali možnost Convection, označili vse površine posode razen spodnje, kjer smo že definirali toplotno obremenitev, in v spodnje okence zapisali zelene vrednosti (Slika 110).



Slika 110: Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

4.7.5 Mreženje

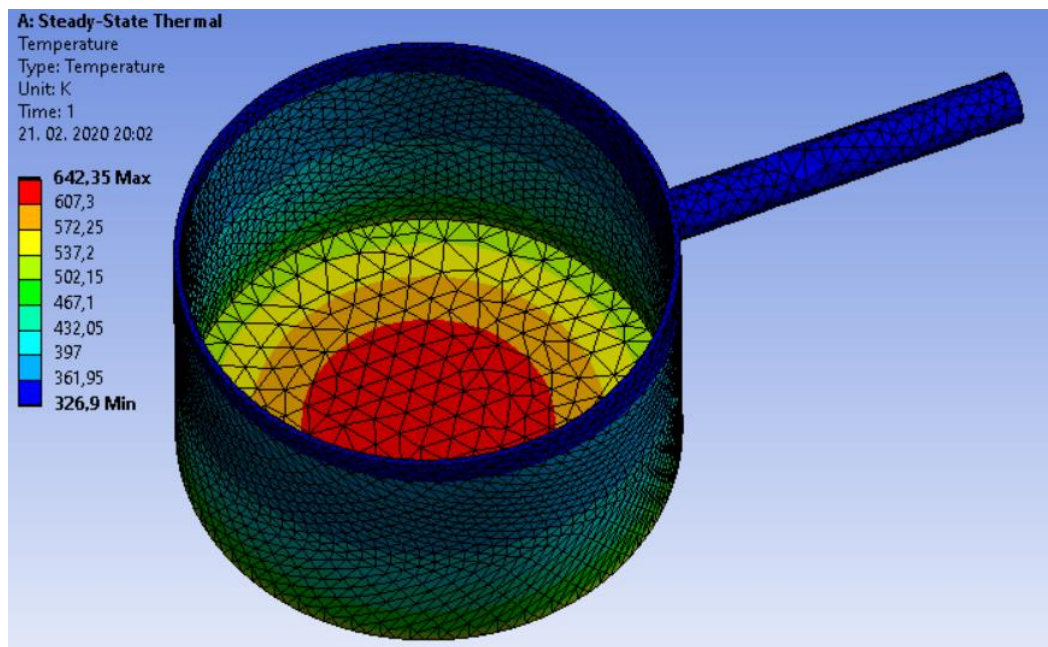
V modulu Mesh smo model zamrežili. Označili smo celoten model in v urejevalniku izbrali Apply, velikost elementov pa smo definirali v vrstici Element Size, kjer smo za globalno velikost izbrali 7 mm (Slika 111).



Slika 111: Mreža – 7 mm

4.7.6 Analiza rezultatov

Prikaz rezultatov mreže 7 mm, kjer se na ročaju pojavi temperatura 326,9 K (53,75 °C) prikazuje spodnja slika (Slika 112).



Slika 112: Mreža – 7 mm (temperatura)

4.7.7 Analiza rezultatov v programu Ansys

Tabela 8: Rezultati temperaturne analize v Ansysu

Mreža	Temperatura na ročaju posode [K]	Temperatura na ročaju posode [°C]	Razlika [%]
Mreža 1 (7 mm)	326,9	53,75	-
Mreža 2 (5 mm)	-	-	-
Mreža 3 (3 mm)	-	-	-

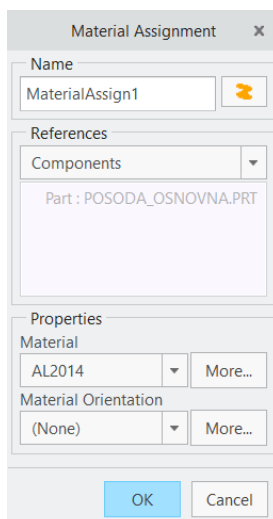
Ansys tako kot Abaqus spada med programe, ki so narejeni z namenom izvajanja računalniških simulacij. Vendar je bilo delo z Ansysom lažje kot z Abaqusom, saj je Ansys že imel knjižico z lastnostmi materialov in tudi enote nam je program pretvarjal sam. Slaba lastnost programa je bila, da nam je omogočal izračun le mreže z velikostjo elementov 7 mm, saj študentska verzija programa omejuje število elementov pri izračunu. Rezultat, ki smo ga dobili na ročaju posode, je znašal 325,6 K (Tabela 8).

4.8 CREO

Ko smo zagnali program Creo, smo najprej odprli model posode. Nato smo v orodni vrstici izbrali podprogram Applications in zagnali modul za simulacije, Simulate. V zgornji vrstici smo nato izbrali še možnost Thermal Mode.

4.8.1 Določitev materiala

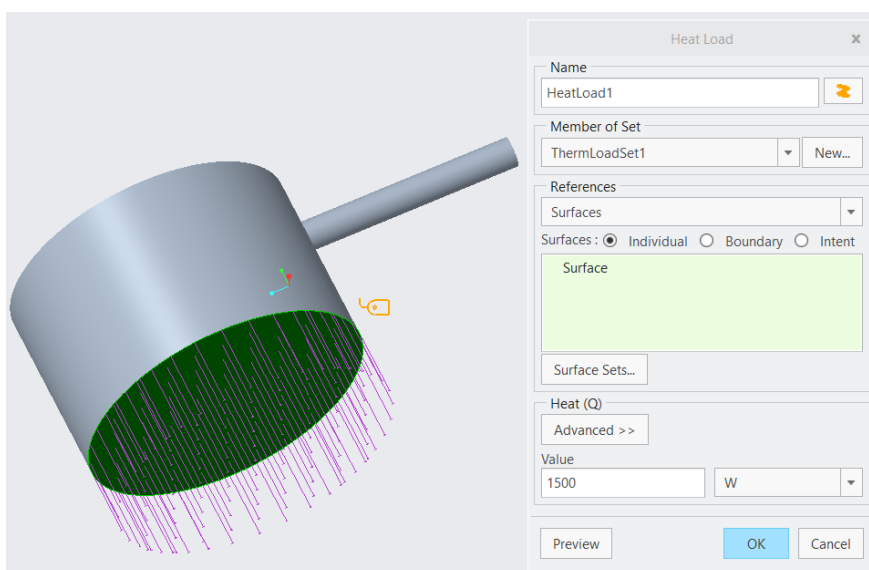
Najprej smo v orodni vrstici izbrali možnost Material Assignment. Ko se nam je odprlo novo okno, smo v knjižici izbrali material AL2014 in potrdili ukaz (Slika 113). Pri simulaciji smo na začetku imeli ogromno težav, saj se temperatura ni širila po materialu, kot bi se morala. Kasneje smo ugotovili, da je bil vzrok v materialu, saj mu v knjižnici materialov niso bili pripisani pravilni parametri. Zato smo v knjižnici potrebne vrednosti spremenili in tako simulacijo izvedli brez težav.



Slika 113: Dodajanje materiala modelu

4.8.2 Določitev toplotne obremenitve

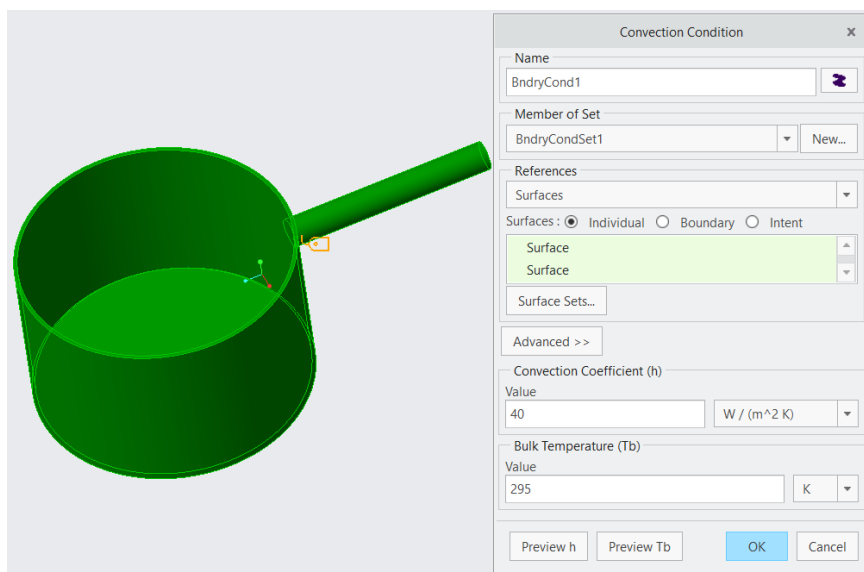
V orodni vrstici smo najprej izbrali ikono Heat, nato označili spodnjo površino, kjer smo želeli toplotno obremenitev, in v okence vpisali želeno vrednost obremenitve (Slika 114).



Slika 114: Določanje toplotne obremenitve

4.8.3 Določitev emisijskega koeficienta in temperature okolice

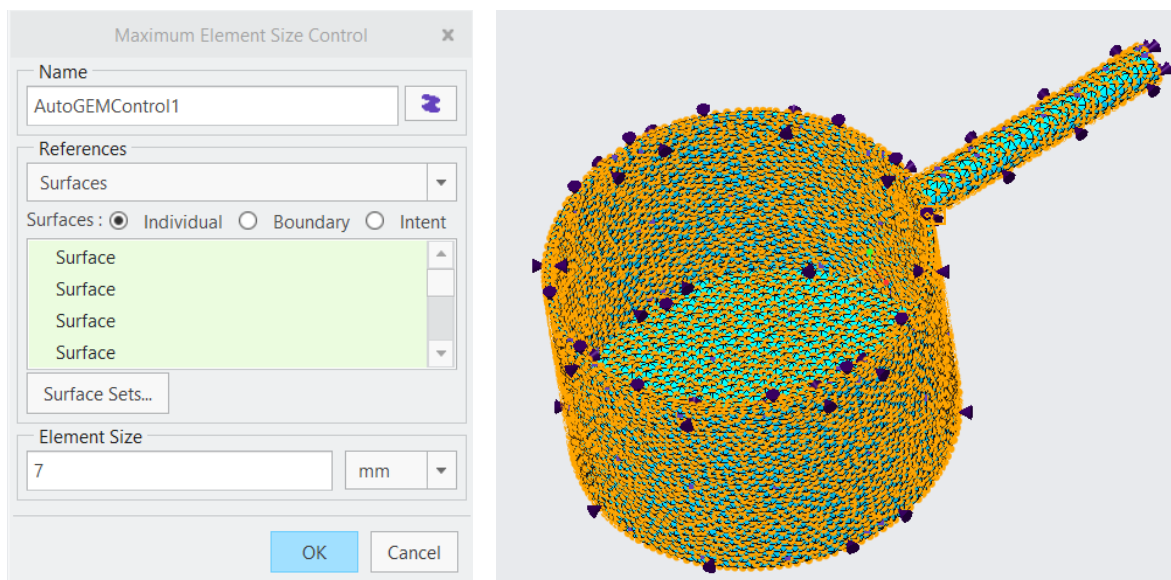
V zgornji vrstici smo izbrali možnost Convection Condition. V novem oknu, ki se nam je pojavil, smo nato vpisali emisijski koeficient, temperaturo okolice in označili vse površine posode razen spodnje, kjer smo že definirali toplotno obremenitev (Slika 115).



Slika 115: Določanje emisijskega koeficienta in temperature okolice

4.8.4 Mreženje

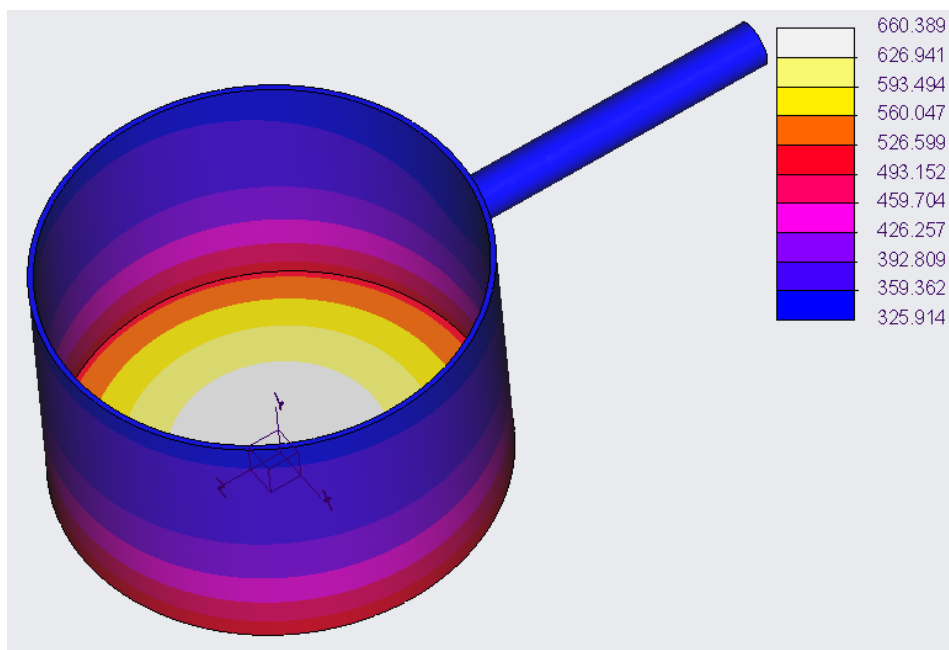
V orodni vrstici smo izbrali Refine Model in nato desno v meniju Control. Z drsnikom smo izbrali prvo funkcijo, in sicer Maximum Element Size. Označili smo vse površine na modelu in v okence Element Size vpisali 7 mm (Slika 116). S tem smo določili globalno velikost elementov.



Slika 116: Mreža – 7 mm

4.8.5 Analiza rezultatov prve mreže

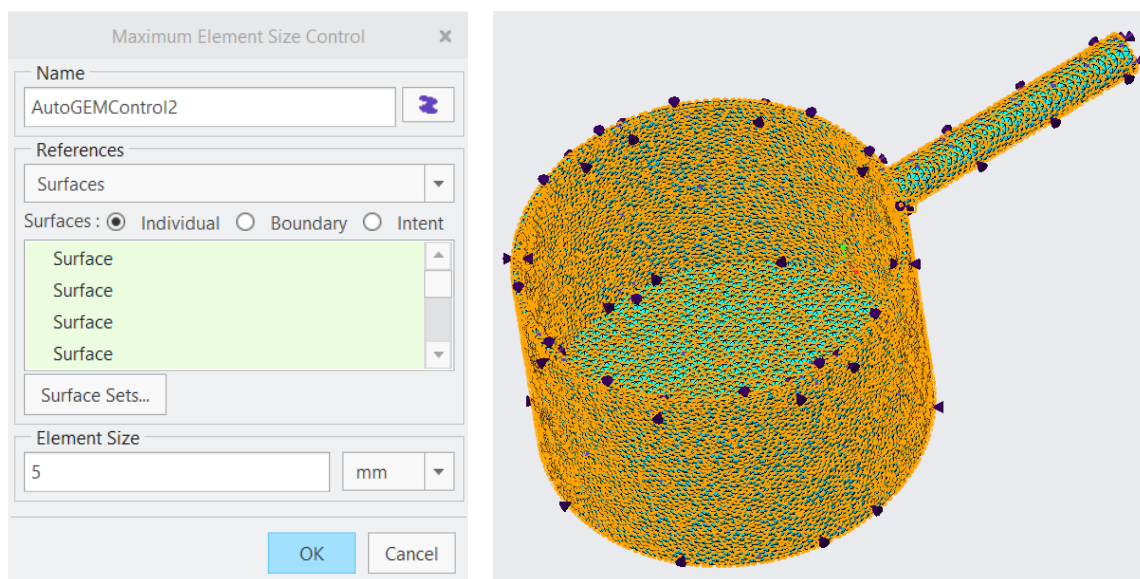
Prikaz rezultatov prve mreže, kjer se je na ročaju pojavila temperatura 325,914 K (52,764 °C), prikazuje spodnja slika (Slika 117).



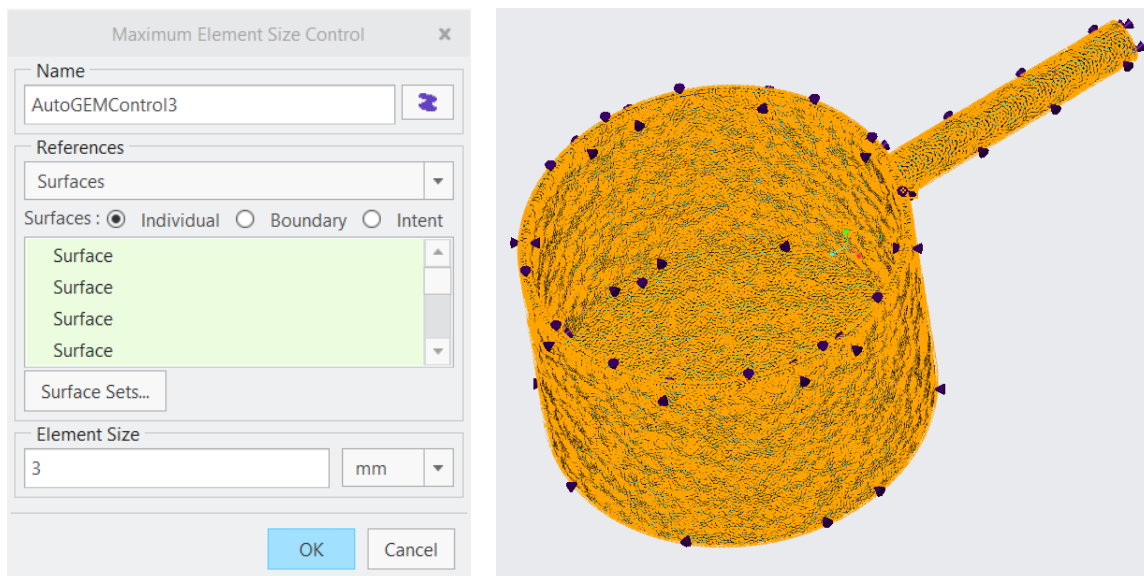
Slika 117: Mreža – 7 mm (temperatura)

4.8.6 Ponovno mreženje

Model smo nato še dvakrat zamrežili po istem postopku kot prvič, le da smo tokrat nastavili velikost elementov na 5 mm in 3 mm (Sliki 118 in 119).



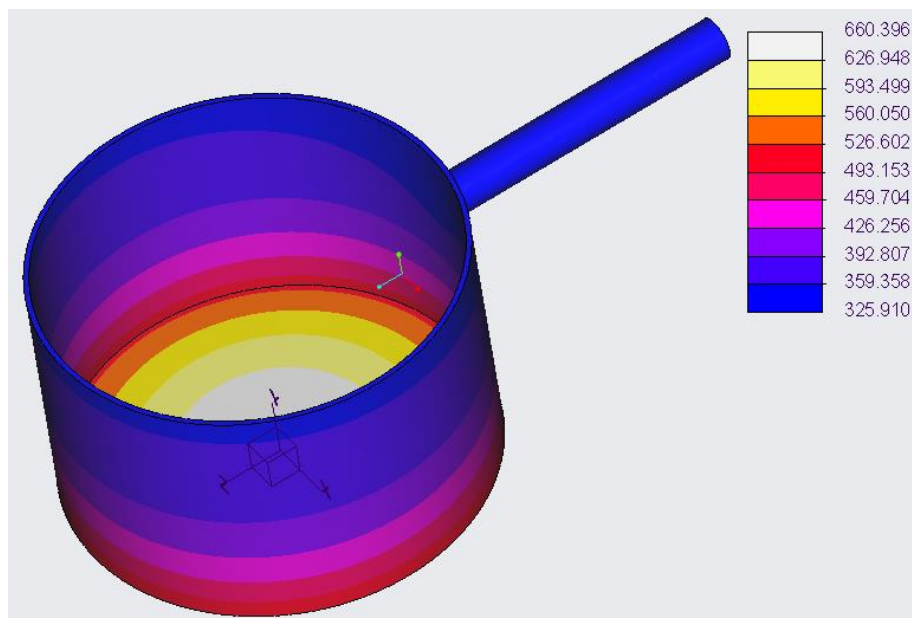
Slika 118: Mreža – 5 mm



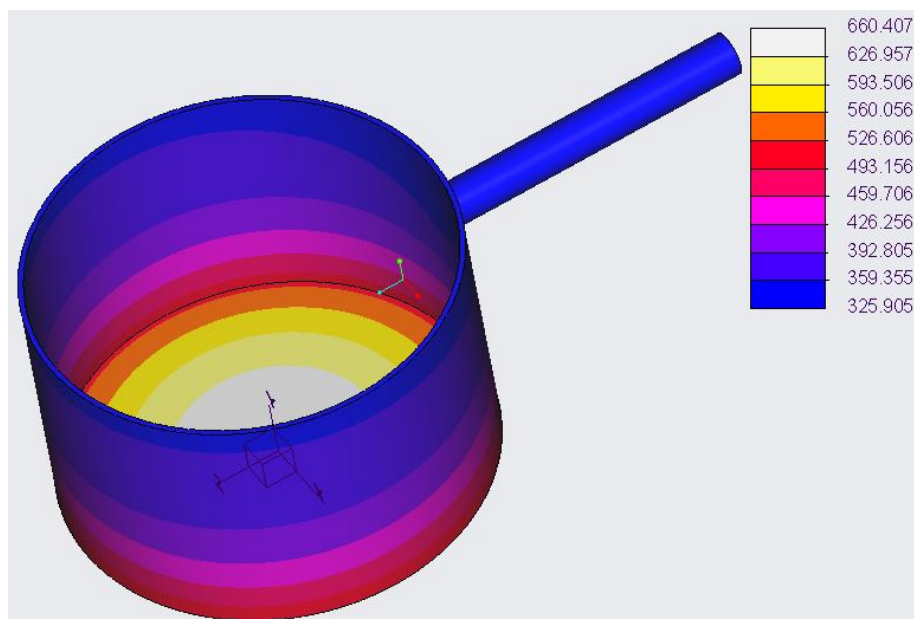
Slika 119: Mreža – 3 mm

4.8.7 Analiza rezultatov zgoščenih mrež

Rezultati so zelo podobni prvim, kar pomeni, da tudi v tem programskem paketu mreža ni imela posebnega vpliva na rezultate.



Slika 120: Mreža – 5 mm (temperatura)



Slika 121: Mreža – 3 mm (temperatura)

4.8.8 Primerjava in analiza rezultatov v programu Creo

Tabela 9: Primerjava rezultatov temperaturne analize v Creo

Mreža	Temperatura na ročaju posode [K]	Temperatura na ročaju posode [°C]	Razlika [%]
Mreža 1 (7 mm)	325,914	52,764	0,003
Mreža 2 (5 mm)	325,910	52,760	0,002
Mreža 3 (3 mm)	325,905	52,755	/

Program Creo je zasnovan predvsem za 3D modeliranje, vendar vsebuje tudi modul z možnostjo izvajanja računalniških simulacij, ki pa je za razliko od ostalih programov narejen nekoliko površno. Pri izdelavi toplotne simulacije smo imeli kar nekaj težav, zato smo porabili zelo veliko časa. Program je za mreženje in izračun potreboval malo več časa, kot so ga potrebovali ostali programi. V tem programu mreža skoraj ni imela vpliva na rezultate, saj je tudi sam program narejen tako, da izdelava mreže ni nujna, ker si jo glede na model predpiše sam. Razlika med prvo in tretjo mrežo je znašala 0,003 % oziroma 0,009 K (Tabela 9).

4.9 POSODA ZA KUHANJE KAVE

Tabela 10: Primerjava rezultatov med programskimi paketi

Programski paket	Temperatura [K]	Temperatura [°C]
Solidworks	325,858	52,708
Abaqus	325,8	52,65
Ansys	326,9	53,75
Creo	325,914	52,764

Rezultati termične analize (Tabela 10) so si bili zelo podobni. Največja razlika med programi je znašala 0,34 % oziroma 1,1 K. S to analizo se je pokazalo, da ne pride do večjih razlik v rezultatih pri termični analizi v različnih programskih paketih oziroma so te zanemarljive, saj smo praktično v vseh programih pri enotni mreži dobili skoraj enake rezultate. Prav tako ni bilo bistvenih razlik oziroma so te skoraj zanemarljive, ko primerjamo rezultate različnih mrež znotraj istega programa. Največja razlika, ki se je pojavila med mrežami, je bila v Abaqusu, kjer je razlika znašala 0,2 K. Najmanjša razlika pa je bila v Creu, kjer je znašala samo 0,09 K. Ker razlik med rezultati z različnimi mrežami skoraj ni bilo, smo v zgornji tabeli primerjali najvišje temperature, ki smo jih dobili v posameznih programskih paketih. V Solidworksu, Ansysu in Creu smo te rezultate dobili pri izvajanju simulacije z mrežo 7 mm, v Abaqusu pa z mrežo 3 mm. Vse mreže pri izdelavi toplotnih simulacij v vseh programskih paketih pa so bile nestrukturirane, razen v programu Abaqus, kjer so bile delno strukturirane.

5 PREDSTAVITEV REZULTATOV RAZISKOVALNE NALOGE

Naša prva hipoteza je bila, da bo med programskimi paketi prišlo do razlik. Hipotezo smo ovrgli z rezultati, pridobljenimi iz simulacij. Rezultate smo zbrali v tabeli, iz katere so razvidne razlike med njimi, vendar so se pri analizi L-kotnika pojavila večja odstopanja med rezultati kot pri analizi posode za kuhanje kave. Pri L-kotniku je bilo odstopanje 1,024 MPa, pri posodi za kuhanje kave pa 1,1 K, kar pa so zelo majhne vrednosti, zato lahko razlike med programskimi paketi zanemarimo.

Druga hipoteza je bila, da bo gostota mreže imela velik vpliv. To hipotezo smo delno potrdili, saj je imela mreža pri L-kotniku v nekaterih programih zelo velik vpliv, pri posodi za kuhanje kave pa je razlika med mrežami bila zanemarljiva. Pri L-kotniku smo naredili štiri različne mreže in vsaka je bila od prejšnje gostejša za faktor dva. Razlike, ki so se pri tem pojavile med najredkejšo in najgostejšo, so bile različne med programi. Največja se je pojavila v Solidworksu, ki je znašala 158,5 %, v Abaqusu je razlika znašala 131,28 %, v Ansysu 49,96 % in v Creu 0,49 %. Pri posodi za kuhanje kave pa smo naredili tri različne mreže, ki smo jih zmanjševali za vrednost dva milimetra. Tukaj ni prišlo do večjih razlik. Največja razlika se je pojavila v Abaqusu, in sicer 0,06 %, v Solidworksu je razlika bila 0,02 % in v Creu 0,003 %.

Tretja hipoteza je bila, da bo stopnja interpolacijske funkcije imela velik vpliv na končni rezultat. Hipotezo smo potrdili, saj je imela ta precejšen vpliv. V vseh programih (razen v Creu) je največjo napetost pokazala prav mreža, v kateri smo izbrali kvadratno in ne linearno stopnjo interpolacije. Najočitnejša razlika je bila prav pri Solidworksu, kjer je največja razlika pri popolnoma isti mreži znašala 139,1 %, oziroma 18,85 MPa. Prav s prilagajanjem stopnje interpolacijskih funkcij se lahko v modelu izognemo precejšnjemu številu elementov in s tem prihranimo na času.

Zadnja hipoteza je bila, da bo pri temperaturni analizi prišlo do večje razlike med programskimi paketi kot pri statični analizi. To hipotezo smo ovrgli, ker smo s simulacijami dokazali prav nasprotno, saj je največja razlika pri L-kotniku znašala 3 %, pri posodi pa 0,34 %.

6 ZAKLJUČEK

Splošno gledano glede na naše parametre se nam je zdel program Solidworks najbolj domač. Razlogi za to so enostavno rokovanje, saj je priprava simulacije zelo preprosta, logična in hitra, pa tudi zaradi tega, ker sam program vsebuje knjižnico materialov, kjer so materialom vnaprej predpisane lastnosti. Torej lahko z njim rokujejo tudi manj večji uporabniki. Minimalna napetost, ki smo jo dobili v Solidworksu, je pri mreži z elementi prvega reda L-kotnika znašala 13,55 MPa in maksimalna 30,16 MPa. Pri mreži z elementi drugega reda pa minimalna 32,40 MPa in maksimalna 34,98 MPa. Temperatura, ki se je pojavila na ročaju posode, je znašala 325,858 K.

Program Abaqus se nam je zdel zahtevnejši in kompleksnejši od prej omenjenega Solidworksa. Razlogi za to so skladnost enot, obsežnejša priprava analize in robnih pogojev, za katere smo porabili več časa. Po drugi strani pa je program zelo napreden, saj omogoča veliko prilagoditev. Maksimalna napetost, ki smo jo iskali v vseh programih, je bila tu najmanjša, pa tudi odstopala je najbolj od vseh štirih programskih paketov. Minimalna napetost, ki se je pojavila pri navadni mreži, je bila 14,77 MPa in maksimalna 33,78 MPa. Pri strukturirani mreži pa minimalna 15,15 MPa in maksimalna 34,16 MPa. Temperatura na ročaju posode je znašala 325,8 K.

Prav tako napreden program, ki je za razliko od Abaqusa bil nekoliko lažji za uporabo, je bil Ansys. Priprava simulacije v njem ni bila pretežka, smo pa imeli zaradi študentske verzije omejeno število končnih elementov, kar je vplivalo tako na primerjavo kot na končni rezultat. Minimalna napetost pri navadni mreži je znašala 23,462 MPa in maksimalna 35,184 MPa. Pri strukturirani mreži pa je minimalna napetost znašala 23,623 MPa in maksimalna 32,988 MPa. Temperatura na ročaju posode je bila 326,9 K.

Malo manj urejen in uporabniku prijazen program na področju izvajanja simulacij je bil Creo. Prav tako simulacije nismo mogli izvajati doma, temveč v šoli na šolskem serverju, ker program tega ni omogočal. V tem programu, v primerjavi z drugimi, gostota mreže na končni rezultat ni imela vpliva, kar lahko štejemo kot največjo prednost Crea, saj si je gostoto mreže in kakovost končnih elementov glede na model prilagajal sam. Minimalna napetost je tako znašala 34,75 MPa, maksimalna pa 34,92 MPa. Temperatura na ročaju posode je znašala 325,914 K.

7 VIRI IN LITERATURA

- [1] Čretnik S. CREO SIMULATE METODE KONČNIH ELEMENTOV. Maribor. SCI družba za informacijske tehnologije, d. o. o. 2013.
- [2] FERLEŽ, A. Tipi analiz v programskem paketu Ansys, seminarska naloga. Celje, 2017.
- [3] Abaqus [online]. 2019. (27. 12. 2019). Dostopno na naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus>
- [4] AISI 304 [online]. 2016. (citirano 15. 1. 2020). Dostopno na naslovu: <https://steelselector.sij.si/steels/PK11EX.html>
- [5] Aluminij 2014 [online]. 2019. (citirano 15. 1. 2020). Dostopno na naslovu: https://en.wikipedia.org/wiki/2014_aluminium_alloy
- [6] Ansys [online]. 2019. (citirano 27. 12. 2019). Dostopno na naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- [7] Creo [online]. 2019. (citirano 27. 12. 2019). Dostopno na naslovu: https://en.wikipedia.org/wiki/PTC_Creo
- [8] Solidworks [online]. 2014. (citirano 27. 12. 2019). Dostopno na naslovu: http://eprints.fri.uni-lj.si/2683/1/63090002-PETER_JUR%C5%A0E-Avtomatsko_konstruiranje_z_orodjem_SolidWorks.pdf
- [9] Solidworks [online]. 2018. (citirano 27. 12. 2019). Dostopno na naslovu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>