

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Коначни елементи

Број индекса: 713/2013

Славиша С. Чавић

**Анализа температурних дилатација на
топловоду
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Мирослав Живковић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Објасни принцип рада система даљинског грејања.
- Прикаже елементе топловодне мреже и особине материјала за израду предизолованих топловодних цеви.
- Објасни принцип рада компензатора температурних дилатација.
- Изврши прорачун димензија „U“ компензатора за конкретан пример топловодне трасе.
- Креира модел топलोвода коришћењем софтвера *Femap*, са *NX Nastran* солвером.
- Изврши анализу резултата добијених нумеричким прорачуном у софтверу *NX Nastran*.
- Изведе закључна разматрања.

Препоручена литература:

[1] Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић, Метод коначних елемената 1- Линеарна анализа, Крагујевац, 1998.

[2] Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, *Linear static and dynamic structural analysis, Pre-andpost- processing examples in program Femap for program package PAK, Faculty for Mechanical Engineering, Kragujevac, University of Kragujevac*, 2013.

[3] Интернет ресурси

Крагујевац, датум

ментор:

Проф. др Мирослав Живковић

Резиме

У овом раду је, на примеру самокомпензације температурних дилатација топловодне инсталације „U“ компензатором извршена анализа напонских стања и аксијалног издужења топловода добијених методом коначних елемената. Аналитички прорачун „U“ компензатора је употребљен само за одређивање дужине цеви и димензија компензатора, док су резултати дилатација добијени нумеричким прорачуном изложени графички. На овај начин представљене су могућности методе коначних елемената при решавању једаног одређеног случаја равanske компензације температурних дилатација.

Кључне речи: самокомпензација температурних дилатација, „U“ компензатор, топловодна инсталација, метод коначних елемената.

Abstract

This paper gives, at the example of self-compensation the temperature dilatations of district heating installation by "U" compensator an analysis of the state of stress and axial elongation of heating pipes using the finite element method. Analytical calculation of the "U" compensator is used only to determine pipe lengths and sizes of compensator, while the results obtained by numerical analysis of dilatation are exposed graphically. By this way, the possibilities of finite element method are present for a particular case of the plane compensation of the temperature dilatations.

Key words: self-compensation of temperature dilatations, "U" compensator, district heating installation, Finite element method.

Садржај:

1. Увод	5
2. Систем даљинског грејања	6
2.1. Елементи топоводне мреже	6
2.2 Материјали за предизоловане топоводне цеви.....	7
2.2.1. Челичне цеви.....	7
2.2.2. Изолација – <i>PUR</i> пена.....	7
2.2.3. <i>PEHD</i> обложна цев	8
2.3. Компензатори температурних дилатација	9
2.4. Напонска стања у правој цеви.....	11
2.5. Димензионисање „ <i>U</i> “ компензатора.....	12
3. Креирање модела топовода	16
4. Анализа резултата	27
5. Закључак.....	36
Литература:	37

1. Увод

Систем даљинског грејања је систем грејања домаћинстава и индустријских објеката из једног центра. То може да буде градски систем или систем снабдевања топлотном енергијом више насељених места, то могу бити и регије, али исто тако и читаве државе. Сваки систем даљинског грејања се састоји из елемената који чине јединствен техничко-технолошки систем међусобно повезаних енергетских објеката који служи за производњу, пренос и дистрибуцију топлотне енергије. Сваки систем чине: производни извор, топловодна мрежа и топлопредајне станице. Производни извор је систем постројења који претвара примарну енергију у топлотну енергију. Топловодна мрежа је хијерархијски уређен систем цевовода и мерно регулационих уређаја који повезује производни извор и топлопредајне станице. Обухвата цевовод и примарну топлотну мрежу. Дистрибутивна мрежа је део система даљинског грејања који чине топлопредајне станице и секундарне топловодне мреже за дистрибуцију топлотне енергије до објеката корисника грејања, док топлопредајна станица обезбеђује испоруку топлотне енергије у унутрашње топлотне инсталације и до уређаја корисника. Један систем даљинског грејања подразумева повезаност и комуникацију између елемената система, као и мерење одређених параметара у одређеним тачкама (температура, проток, притисак), даљинско управљање системом и читавање параметара на свакој контролној тачки ситема. За ове потребе користе се различите врсте мерних уређаја, сензора, електромотора и електронских уређаја који се комуникацијским каблом или бежично повезују са рачунаром на коме се врши праћење или управљање системом. Системи даљинског грејања у Србији постоје у 56 градова. Инсталирани топлотни капацитет ових постројења износи око 6.600 MW. На мрежу даљинског грејања прикључено је укупно око 400.000 станова, што чини око 17% станова у Србији.

2. Систем даљинског грејања

2.1. Елементи топловодне мреже

Систем даљинског грејања може се поделити у три целине: места потрошње, топловодна мрежа и места производње топлотне енергије. Тачно познавање рада свих елемената система и њихове међусобне повезаности је неопходан услов за постизање оптималних резултата. Уопштено говорећи, топловод се састоји од три основна елемента:

1. цевовода, кроз који се транспортује предајник топлотне енергије и који се обично изводе од предизолованих челичних цеви међусобно спојених заваривањем;
2. изолације, предвиђене за заштиту спољне површине челичног цевовода од корозије и топловода у целини од топлотних губитака;
3. носеће конструкције, која прима тежину топловода и друге силе које се јављају при његовом раду и растеређује челични цевовод и његову изолацију од спољашњих оптерећења.

Висока термичка отпорност изолације тј. низак коефицијент провођења топлоте неопходна је ради снижења топлотних губитака топловода. Величина ових губитака зависи од проводљивости топлоте посматраног слоја и његове дебљине. Иста величина губитка топлотне енергије може се остварити различитим изолацијама одговарајуће дебљине. Подразумева се да се исти овај ефекат може постићи и одговарајућим комбиновањем више различитих изолационих слојева истовремено. Која вредност губитка топлоте и која комбинација изолационих слојева треба да се примени код система за транспорт топлотне енергије произилази из техноекономске анализе целог система.

2.2 Материјали за предизоловане топоводне цеви



Слика 1. Предизолована топоводна цев

2.2.1. Челичне цеви

Због релативно малих притисака у топоводу (до $2,5\text{MPa}$) и температуре која највише може износити 130°C , челичне цеви које се користе за топовод се израђују од бешавно (S) округлог, нелегираног, умиреног (R) челика. Димензије челичних цеви бирају се из стандарда *SRPS EN 10216-2*. Квалитет челичних цеви је *P235GH*.

Табела 1. Хемијски састав челика *P235GH*:

Легирајући елемент	%
C	0,17
P	0,04
S	0,04
N	0,009
Al	0,08
Si	0,25

2.2.2. Изолација – *PUR* пена

Изолација топовода изводи се од експандиране полиуретанске (*PUR*) пене са заштитном цеви од полиетилена високе густине. Техничка својства *PUR* пене морају бити у складу са *SRPS EN 253*. Пречник ћелије у радијалном правцу треба да буде у просеку мањи од $0,4\text{mm}$. Грешака у пени (шупљина) треба да буде мало и то врло удаљених једна од друге. Оне не смеју да смање функционалне особине изолације. Најмања укупна густина *PUR* пене треба да буде 80 kg/m^3 . Чврстоћа на смицање између радне челичне цеви и пене треба

да буде већа од 0.2 N/mm^2 , а између пене и заштитне *PEHD* цеви већа од $(D_s/D_u) \times 0.2 \text{ N/mm}^2$ где су D_s и D_u спољашњи, односно унутрашњи пречник радне цеви. Челична цев мора да буде центрирана у заштитној цеви тако да на правој деоници одступања буду мања од 10% од дебљине изолације у било којој тачки цеви. Коефицијент термичке проводљивости максимално. $0,028 \text{ W/mK}$. Стална радна температура максимално. 130°C .

2.2.3. *PEHD* обложна цев

Polietilen High Density (PEHD) је бешавно екструдирани тврди полиетилен који је отпоран на ударце, неломљив, еластичан и подноси температуру до -50°C . У свим националним и међународним нормама, односно упутствима, *PEHD* је наведен као једини материјал за обложне цеви у КМР-систему спајања. Општи захтеви квалитета су у складу са *DIN8075*.



Слика 2. *PEHD* облога

У складу са *SRPS EN 253* унутрашња површина је обрађена коронапоступком, ради потпуне везе *PEHD* обложне цеви и *PUR* пене. Димензије, односно дебљина зида је минимална по *SRPS EN 253*. Својом отпорношћу на практично сва хемијска једињења која постоје у земљи, *PEHD* се примењује као обложна цев за директно полагање у земљу а због своје отпорности на временске утицаје и УВ-зрачења погодан је и за надземне трасе топловода. Складиштење на отвореном простору и услед дејства сунчеве светлости је због тога могуће чак и у дужим временским периодима. Због изузетних својстава, при заваривању *PEHD*-а, код заварених шавова „фитинга“, настаје безбедност и квалитет у највишој могућој мери. Код *PEHD* лучних сегмената, спајање се врши апаратом за заваривање, сучеоним заваривањем. Шавови код фазонских делова израђују се са екструдер апаратом за

заваривање. *PEHD* је потврђеног квалитета који се већ дуги низ година успешно примењује код система са пластичним обложним цевима.

Табела 2 Карактеристике материјала предизоловане топловодне цеви

	Челик	<i>PUR</i>	<i>PEHD</i>	Јединица мере
Модул еластичности	205000	15	1000	N/mm^2
<i>Poisson</i> – ов коефицијент	0,3	0,5	0,46	
Коефицијент топлотне проводљивости	52,33	0,028	0,35	W/mK
Коефицијент линеарног ширења	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$52 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}

2.3. Компензатори температурних дилатација

Приликом транспорта флуида цевоводима настају оптерећења која се преносе на ослонаце и која се могу поделити на:

1. силе од механичког деловања транспортованог флуида,
2. силе које настају при компензацији температурних дилатација цеви,
3. силе отпора померања покретних ослонаца,
4. тежинска оптерећења и силе услед деловања ветра.



Слика 3. „U“ компензатор

Сви материјали од којих се израђују цевоводи шире се са порастом температуре. Силе и напрезања у топловоду морају остати у дозвољеним границама при температурним дилатацијама. То се остварује компензаторима температурних дилатација и самокомпензацијом. Компензатори су уређаји који омогућују температурне дилатације цеви тако да оптерећења буду у дозвољеним границама. Самокомпензација температурних дилатација остварује се погодним вођењем трасе топловода. Наиме, уколико на пример посматрамо равански топловод између два укљештена непокретна ослоња за праволинијску деоницу добијамо физички неприхватљиво велике силе на ослоњцима услед температурних дилатација. Зато се у пракси користе „L“, „Z“ и „U“ компензатори, односно одговарајући начини вођења трасе којима се остварују оптерећења у дозвољеним границама. За разлику од аналитичког прорачуна, коришћењем методе коначних елемената посао пројектанта се своди на уношење улазних параметара и цртање конфигурације са свим припадајућим компонентама у графичком окружењу одговарајућег програма. У овом конкретном случају посматра се само оптерећење услед температурних дилатација док се остала оптерећења занемарују.

2.4. Напонска стања у правој цеви

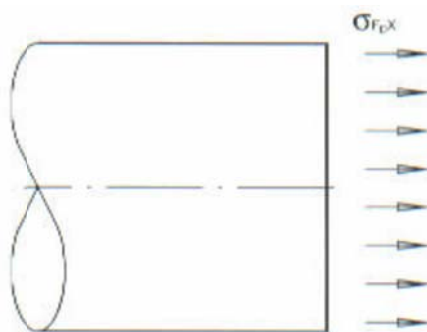
Због силе истезања и унутрашњег притиска у правој цеви јављају се следећа напонска стања:

1. Аксијални напон- σ_{FDx}

$$\sigma_{FDx} = \frac{F_D}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

F_D - сила истезања

A - попречни пресек челичне цеви



Слика 4. Аксијални напон

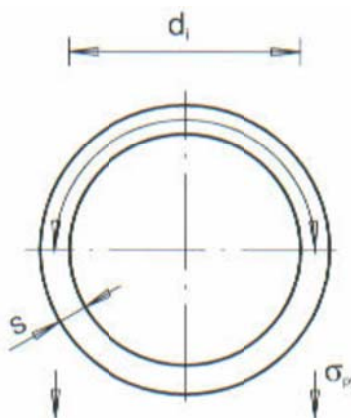
2. Тангенцијални напон - σ_{py}

$$\sigma_{py} = \frac{p \cdot d_1}{2 \cdot s} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

p - унутрашњи притисак

d_1 - унутрашњи пречник челичне цеви

s - дебљина зида челичне цеви



Слика 5. Тангенцијални напон

2.5. Димензионисање „U“ компензатора

За одређивање димензија компензатора потребно је неколико улазних података након чега се димензије кракова компензатора одређују дијаграмом:

- DN – номинални или називни пречник цеви
- L_{max} – највећа дозвољена дужина трасе без компензације за одређени профил цеви
- ΔL – температурно издужење трасе

Табела 3. Највећа дозвољена дужина трасе без компензације за одређене пречнике цеви

Профил	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200
$L_{max}(m)$	44	56	58	67	82	93	104	117	130	156	179

Приликом постављања трасе између две чврсте тачке допуштена дужина постављања L_{max} **смањује се на $L_{max}/2$** .

Дужина трасе ће бити $L=60m$ са цевима пречника $DN80$.

Табела 4. Димензије попречног пресека предизоловане топловодне цеви

<i>DN 80</i>	Унутрашњи полупречник (r_s)	Спољашњи полупречник (r_u)	Дебљина (s)	Јединица мере
Челична цев	41,25	44,45	3,2	<i>mm</i>
Изолација(PUR)	44,45	77	32,55	<i>mm</i>
Обложна цев (PEHD)	77	80	3	<i>mm</i>

$$\Delta L = \alpha \cdot L_x \cdot \Delta T [\text{mm}]$$

$$\Delta L = 82,8 \text{ mm}$$

α – коефицијент линеарног истезања ($1,15 \cdot 10^{-5}$)

L_x – постојећа дужина цеви (60 m)

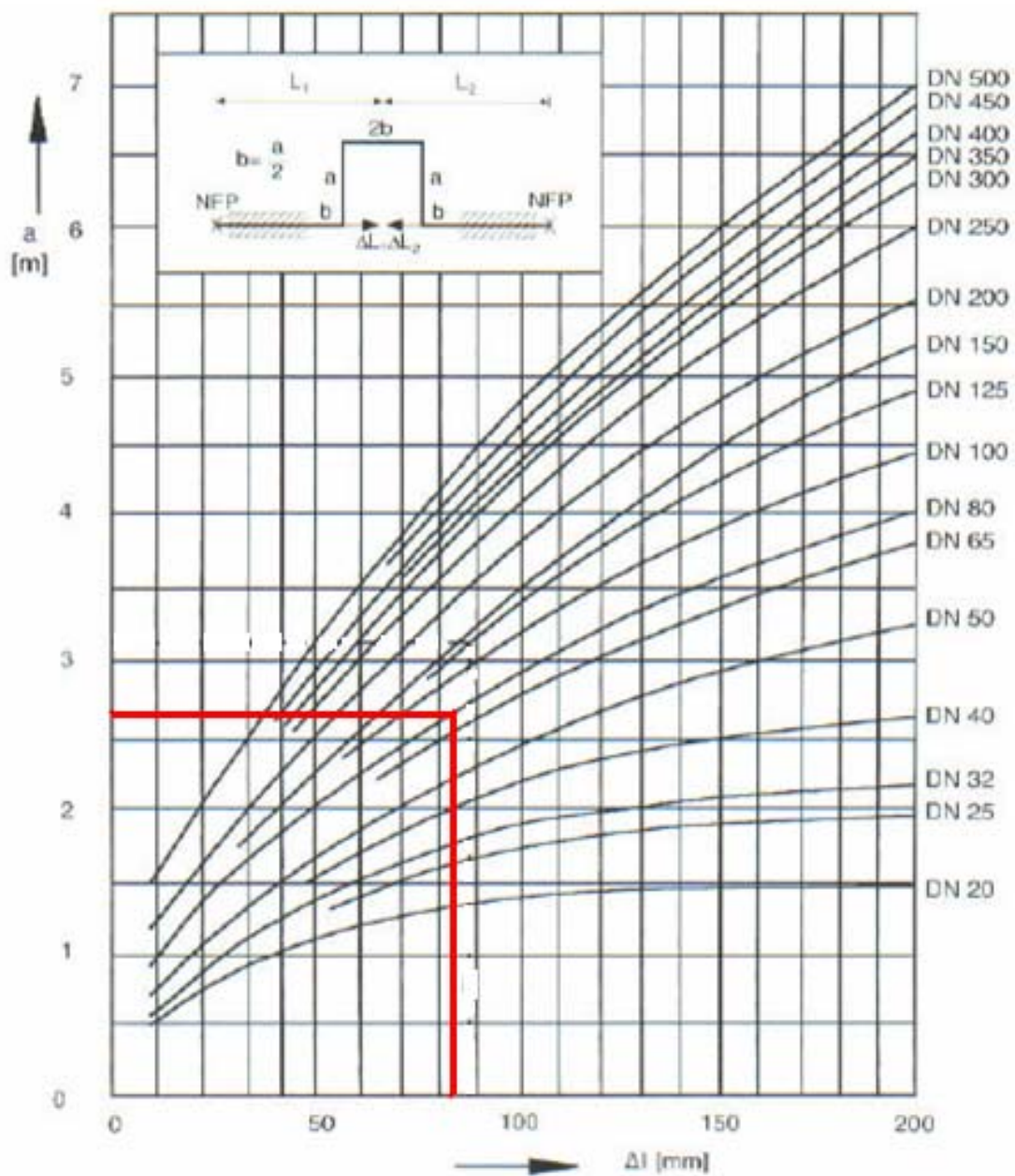
ΔT – разлика максималне дозвољене и референтне температуре (115°C)

Дијаграмом приказаном на Слици 6 одређена је дужина крака компензатора **a=2,7m**.

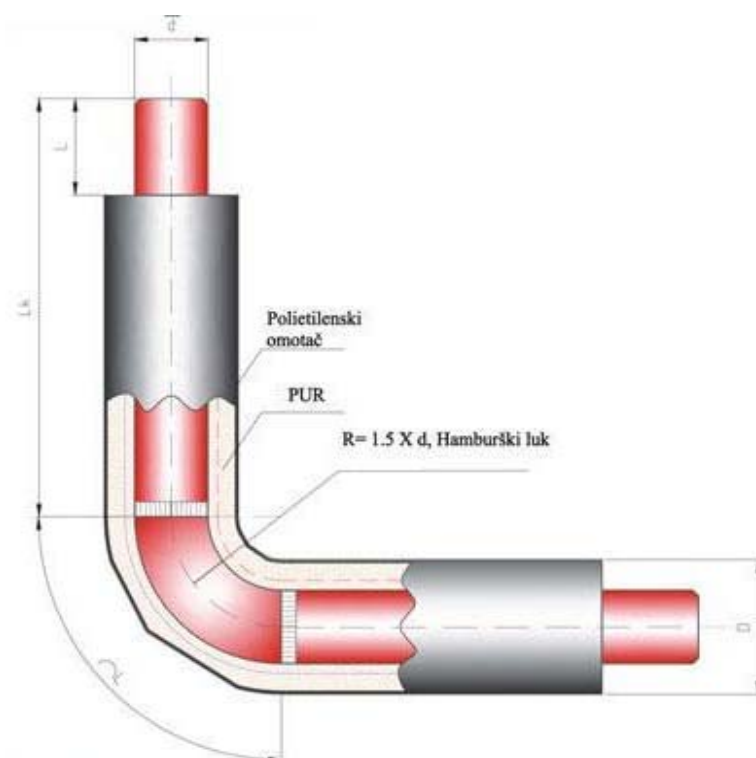
Полупречник лука колена (R) одређен је обрасцем:

$$R = 1,5 d = 133 \text{ mm}$$

d – спољашњи пречник челичне цеви ($88,9 \text{ mm}$)



Слика 6. Дијаграм за одређивање дужине крака „U“ компензатора



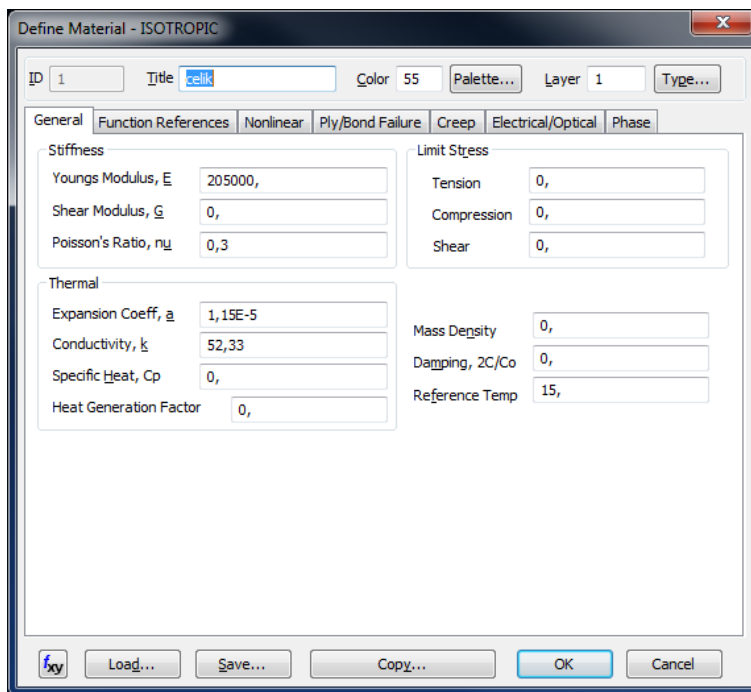
Слика 7. Предизоловано „колено“

3. Креирање модела топловода

Топловод је моделиран коришћењем софтвера *Femap*, са *NX Nastran* солвером, који ради на основама методе коначних елемената. За креирање мреже коначних елемената коришћени су 3Д елементи.

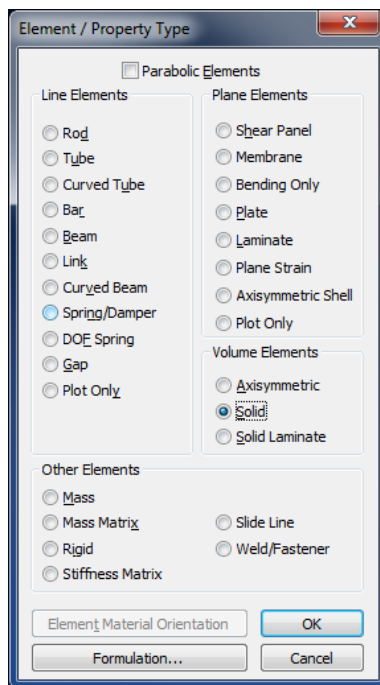
Пре уношења геометрије у опцијама основних подешавања потребно је дефинисати карактеристике материјала модела и тип коначног елемента.

У овом случају је реч о чврстом телу (*solid*), које је састављено од три врсте материјала: челик, полиуретанска пена и полиетилен високе густине. За сваки од та три материјала потребно је дефинисати карактеристике у прозору (слика 8), који се отвара из падајућег менија **Model>Material**. За анализу температурних дилатација топловода је потребно унети: модул еластичности, *Poisson*– ов коефицијент, коефицијент истезања, коефицијент топлотне проводљивости и референтну, односно почетну температуру.



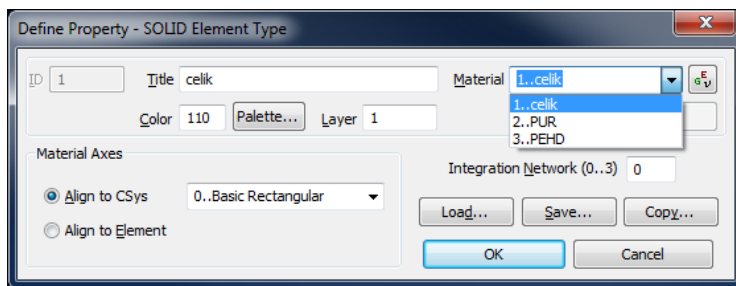
Слика 8. Дефинисање материјала

Након тога из падајућег менија отварамо прозор **Model>Property** у коме се дефинишу особине коначних елемената (слика 9) у зависности од тога да ли се ради о линијском, раванском или запреминском типу коначног елемента.



Слика 9. Дефинисање типа коначног елемента

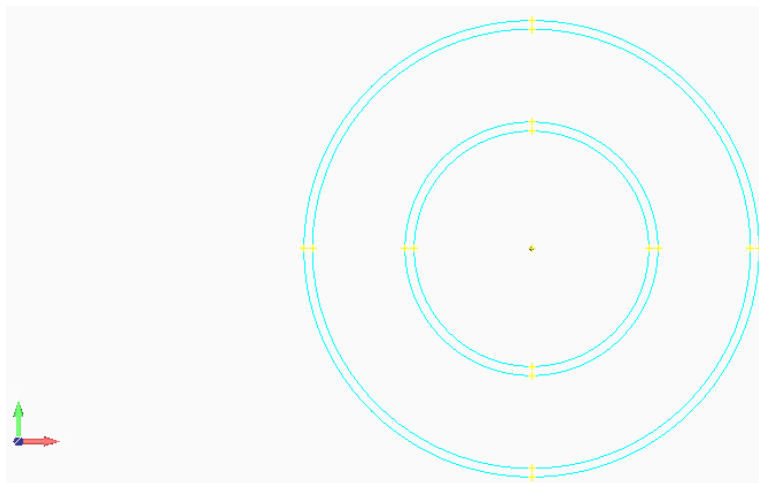
На крају се дефинисаним запреминским 3Д елементима бира један од три дефинисана материјала (слика10) од кога је направљена предизолована топловодна цев.



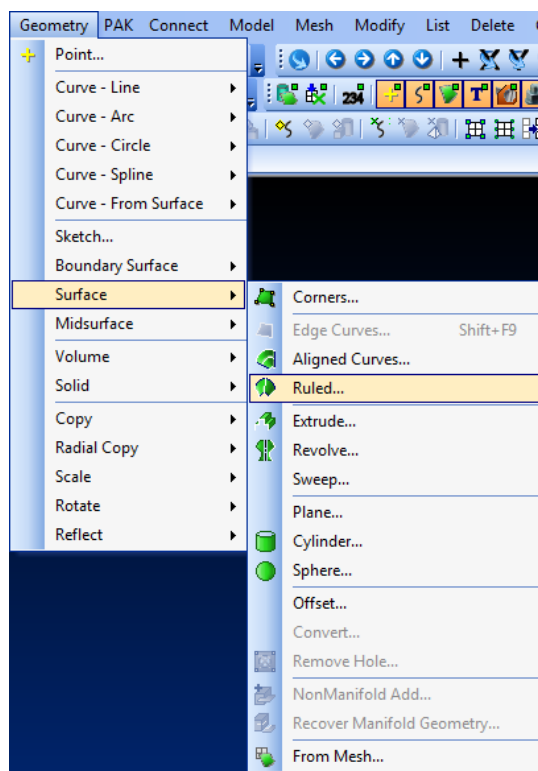
Слика 10. Додељивање врсте материјала 3Д елементима

Моделирање геометрије започиње цртањем попречног пресека предизоловане цеви. Потребно је нацртати четири круга (слика 11) који ће служити као границе слојева предизоловане топловодне цеви. Димензије кругова су приказане у табели 4. Командом **Geometry>Surface>Ruled** (слика

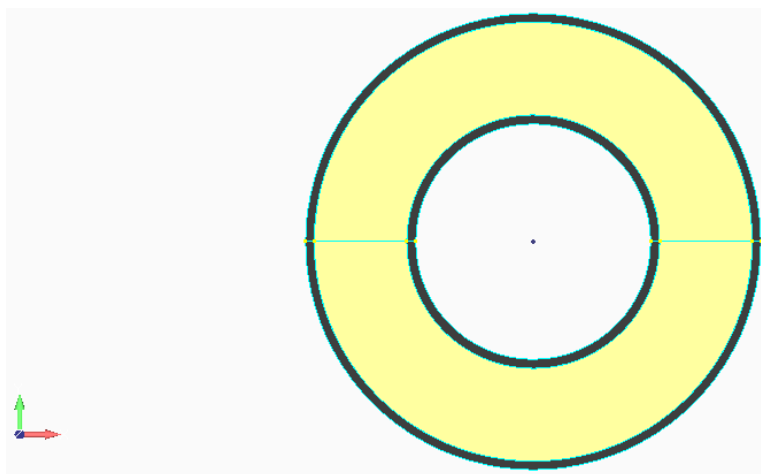
12) се дефинишу три површине на којима ће се генерисати 2Д коначни елементи.



Слика 11. Границе слојева материјала

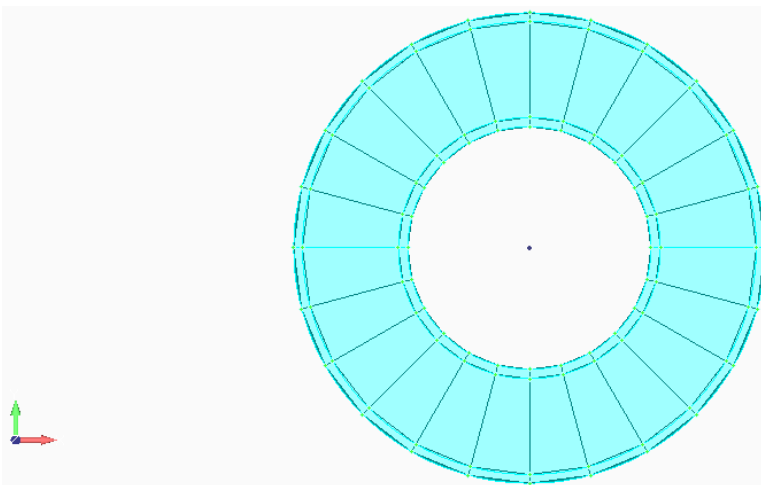


Слика 12. Команда за дефинисање површина попречног пресека



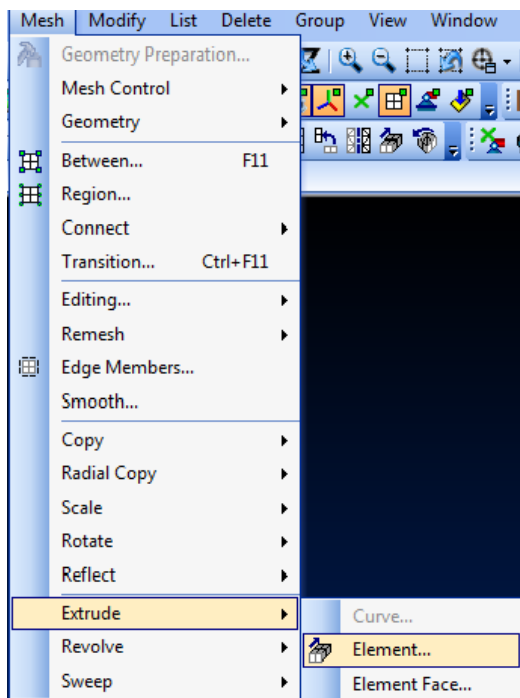
Слика 13. Попречни пресек предизоловане цев

Свака од три саставне површине попречног пресека овог модела се дели на исти број елемената како би имали заједничке чворове. Поштовано је правило да угао надовезујућих страница елемената не сме бити већи од 15° , као и да странице једног елемента не прелазе однос 1:10 (слика 14).



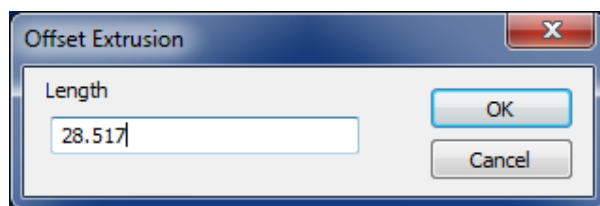
Слика 14. Елементи попречног пресека

Да би од попречног пресека добили запреминске елементе користи се команда **Mesh>Extrude>Element** (слика 15). Изабере се команда *Element face* којом се бира лице елемента од кога ће се елементи умножити.

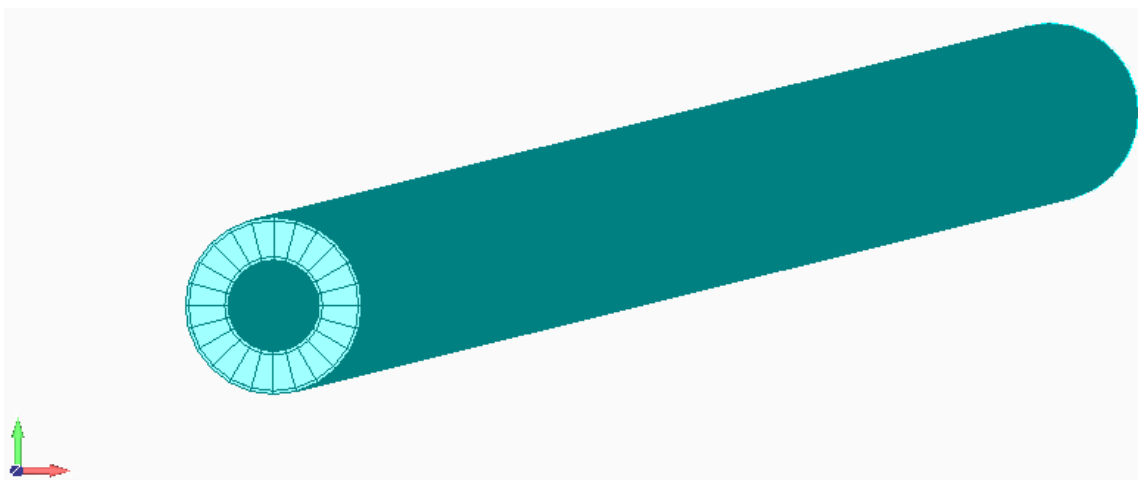


Слика 15. Команда *Extrude*

Дужина правог дела топловода је $28,517m$ и то представља вредност коју треба унети приликом „офсетовања“ 3Д елемената (слика 16). Да би се испоштовало правило о максималном односу страница од 1:10, број елемената који ће бити „екструдовани“ од сваког првобитног 2Д елемента је 1000.

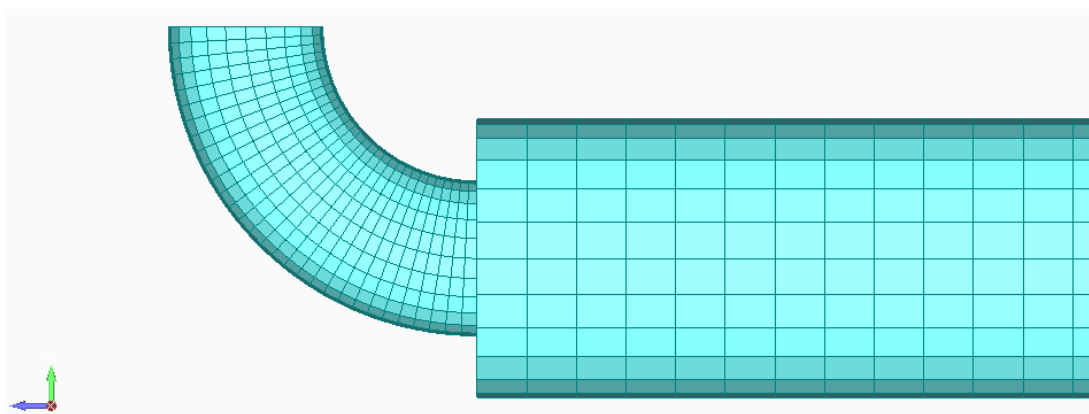


Слика 16. Дужина умножавања елемената



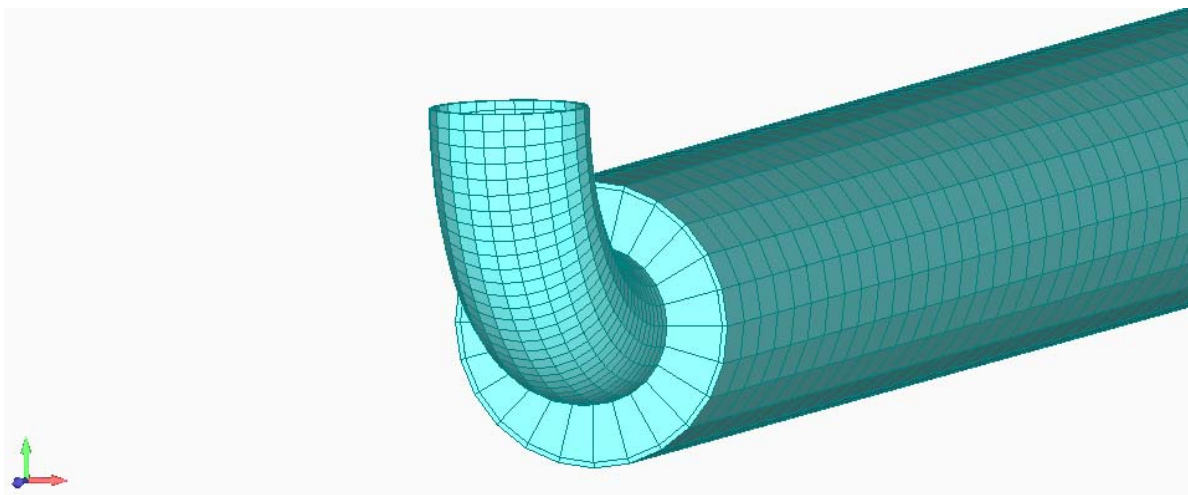
Слика 17. Праволинијски део топловода

Праволинијски део топловода је креиран командом **Extrude** док се за креирање лучног дела користи команда **Revolve** која се налази у истом падајућем менију. При креирању лучног дела топловода треба изабрати 30 елемената за умножавање, лице елемента од кога ће се остали умножити, величина и правац угла, као и координате центра лука.

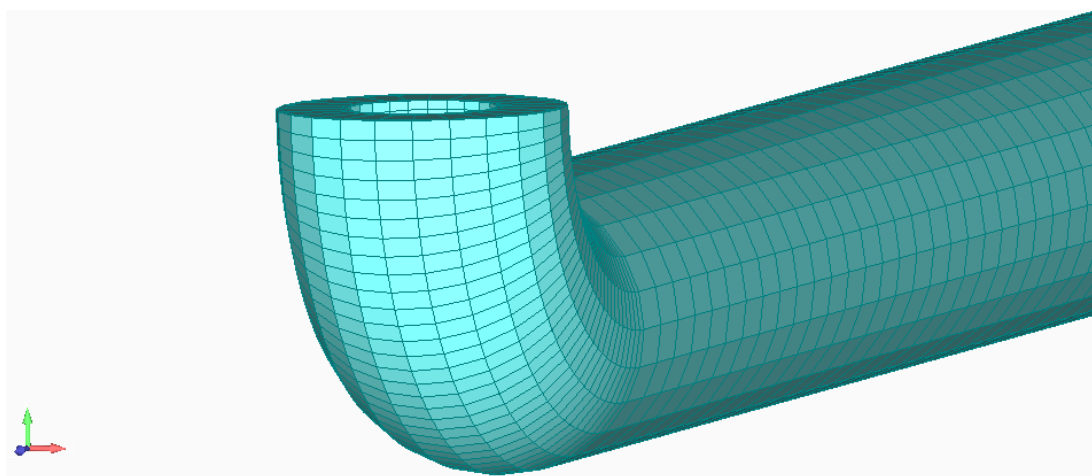


Слика 18. Елементи лука цеви топловода

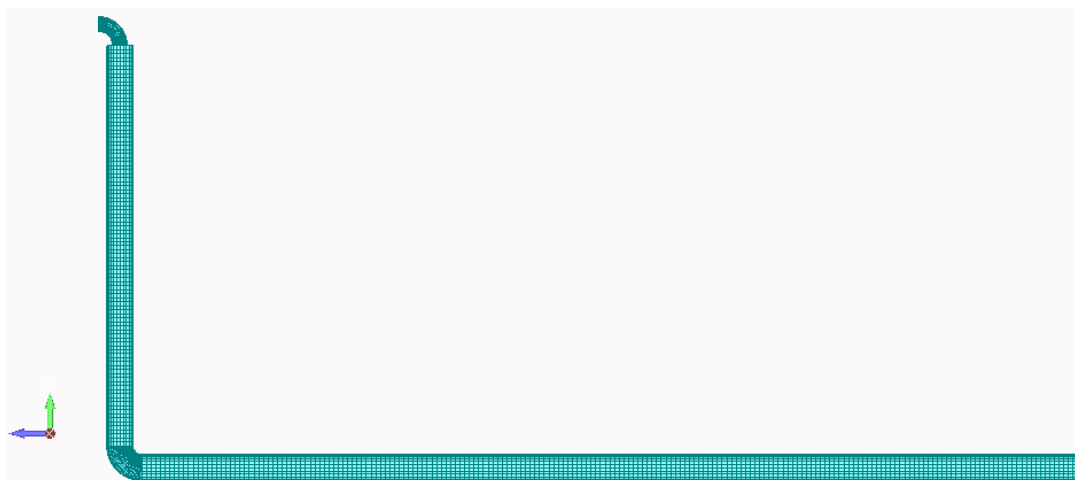
Модел топловодне цеви је састављен од три различите врсте материјала, односно од три слоја, па се сваки од њих мора посебно креирати на сваком правом делу и на сваком „колenu“. Ово је потребно из разлога што се командама **Extrude** или **Revolve** сваки пут изнова додељује различита врста слоја топловодне предизоловане цеви.



Слика 19. Мрежа 3Д елемената челичног лука добијена командом Revolve

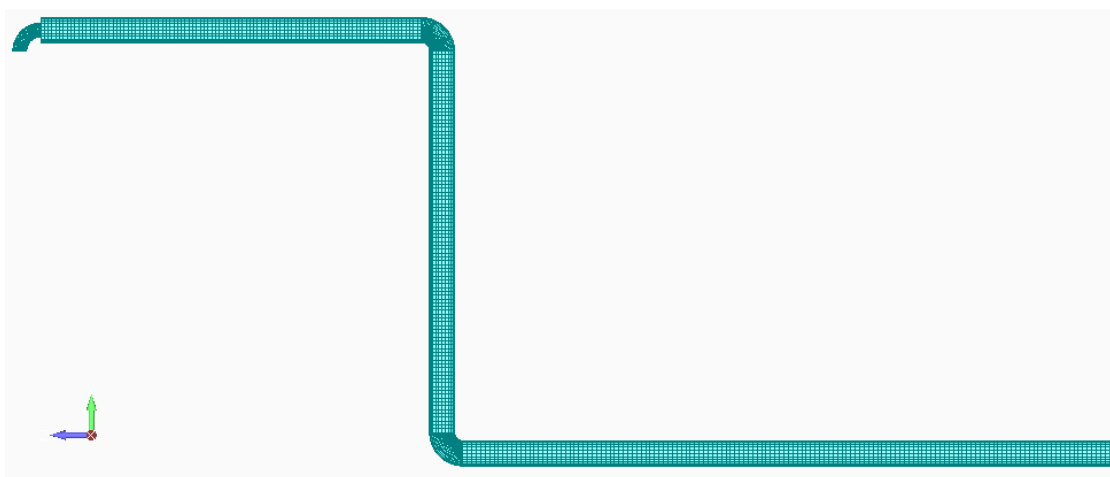


Слика 20. Мрежа 3Д елемената слојева PUR“ и „PEHD“ добијених командом Revolve “



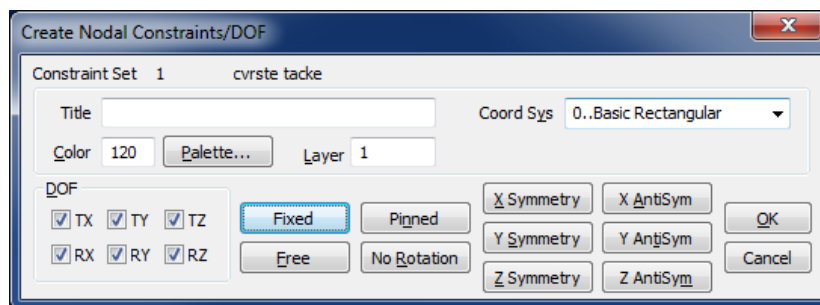
Слика 21. Мрежа коначних елемената крака „а“ компензатора

Дужина моделираног топловода између две чврсте тачке износи 60 m , док компензатор који се налази на средини трасе има 3 крака истих дужина од $2,7\text{ m}$. Полупречник лукова компензатора је 133 mm . Све мере се рачунају према средишњој оси цеви.

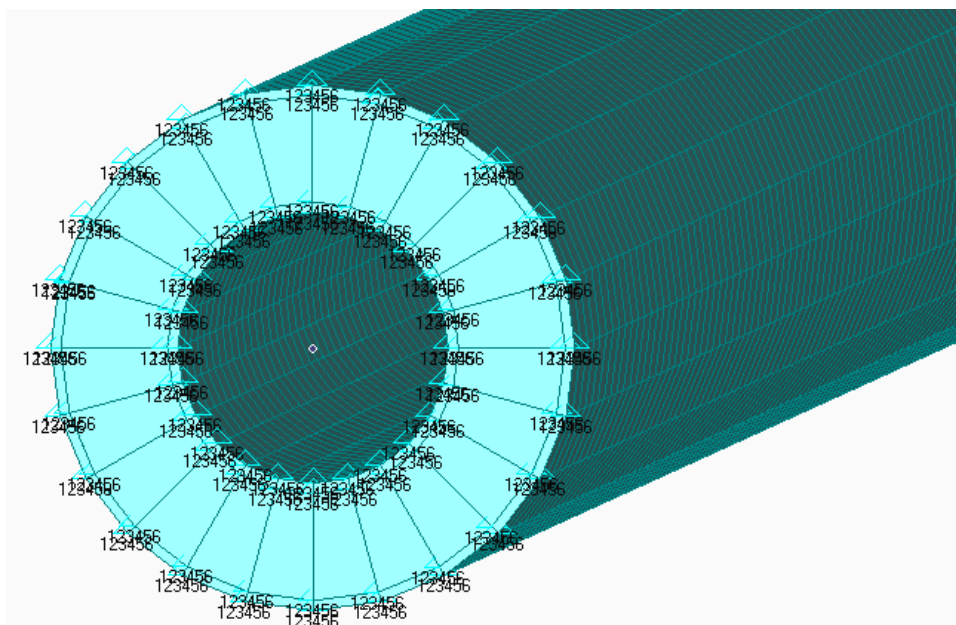


Слика 22. Мрежа коначних елемената крака „б“ компензатора

После креирања мреже коначних елемената модела топловода прелази се на задавање ограничења, односно ослонаца. Почетак и крај ове трасе су „заливени“ у бетонским стубовима па се чворови модела на тим местима фиксирају (слика 24). Топловод је положен у бетонски канал целом дужином, па су свим чворовима који су у контакту са подлогом ограничена транслаторна померања у вертикалном правцу.

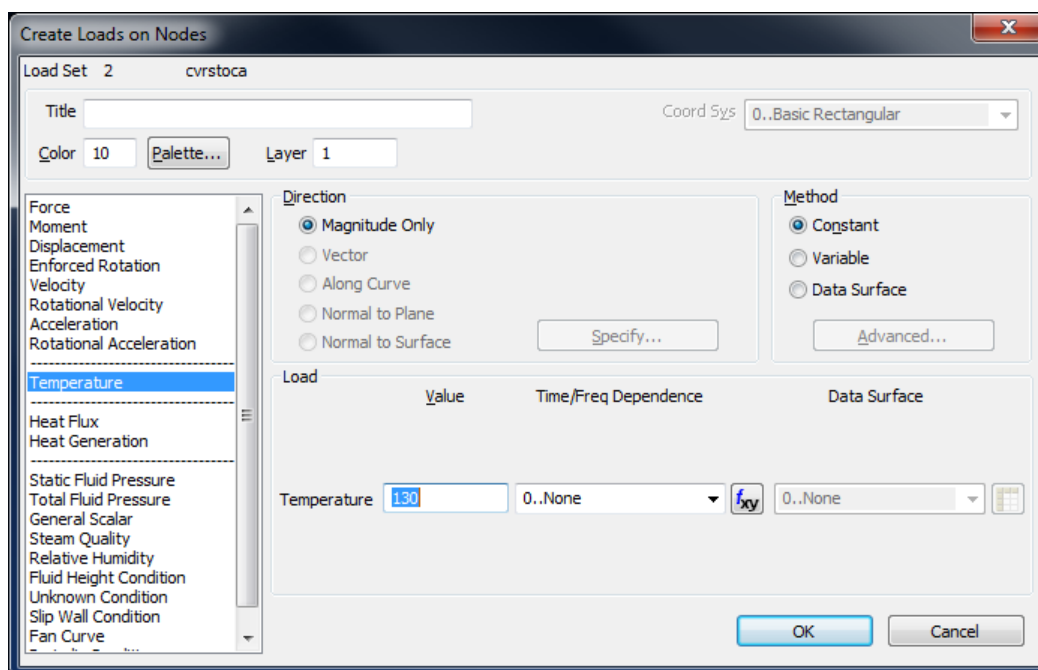


Слика 23. Ограничења чворова који се налазе на крајевима топловода

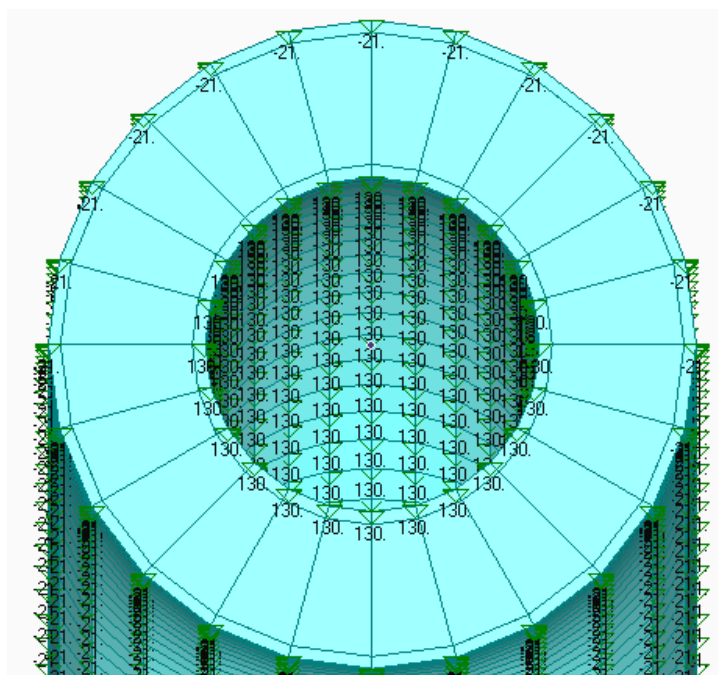


Слика 24. Гранични услови на почетку и крају трасе топловода

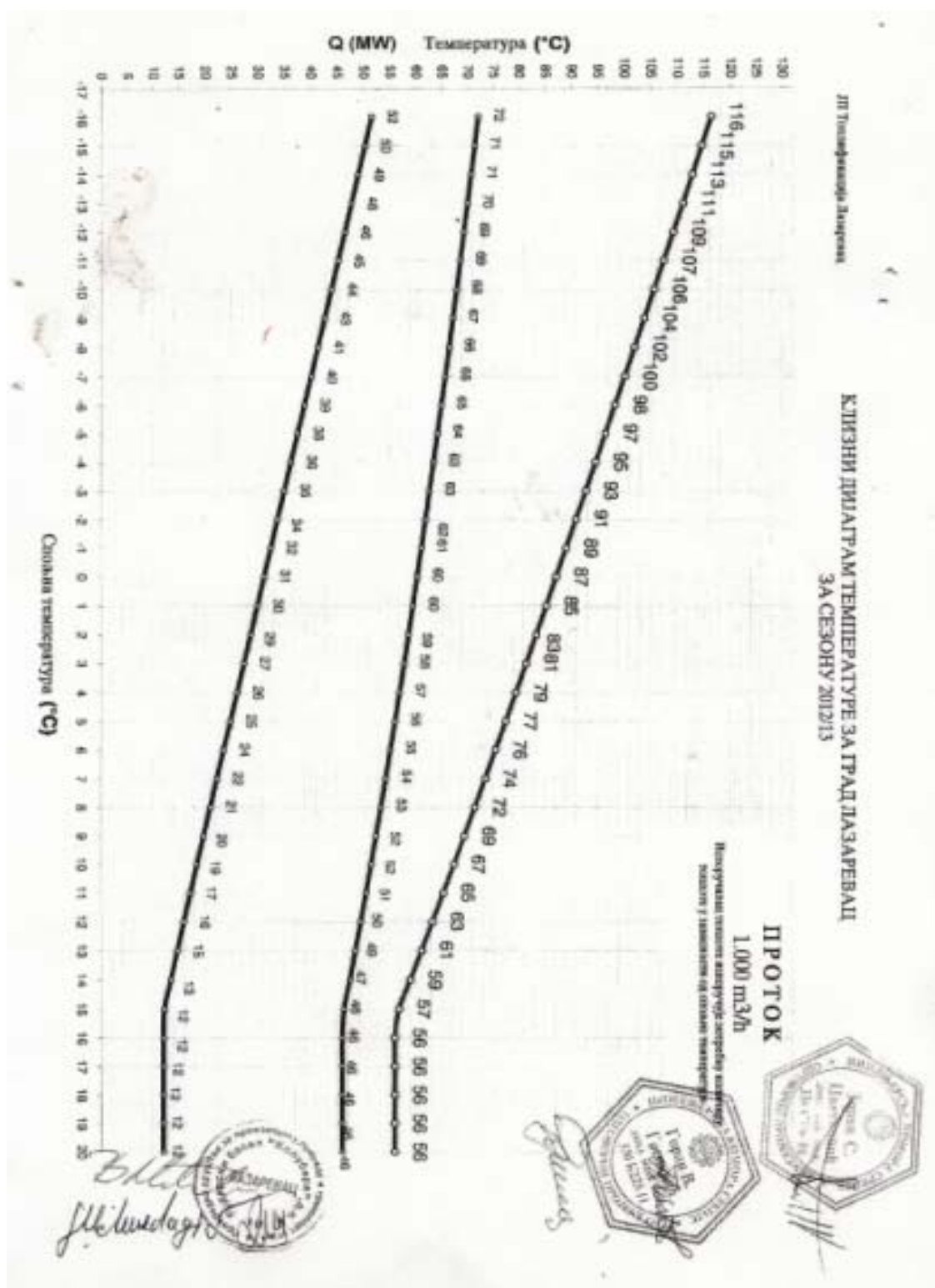
Након задавања ограничења, прелазимо на задавање радних температура на унутрашњој и спољашњој страни модела предизоловане цеви. На основу дијаграма топлане (слика 27) најнеповољнији услови рада јесу када је спољна температура -21°C и када се топловодом дистрибуира вода температуре 130°C .



Слика 25. Уношење температура



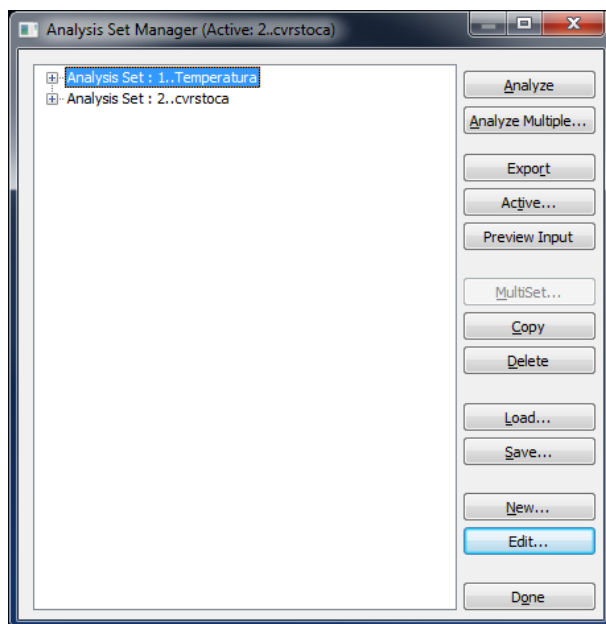
Слика 26. Задате температуре на чворовима модела



Слика 27. Дијаграм температура

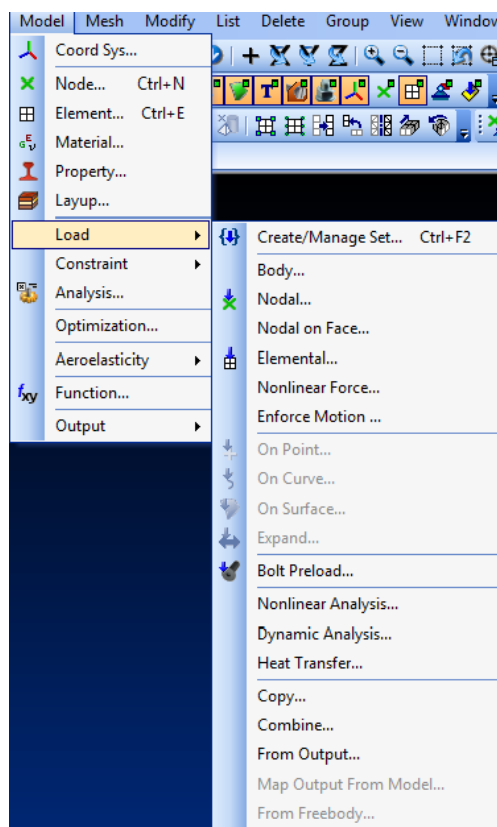
4. Анализа резултата

Нумерички прорачун је урађен у софтверу *NX Nastran*. Прво је пропуштен прорачун расподеле температура (слика 28), који нам је послужио као улазно оптерећење за прорачун чврстоће топловода (слика 29).

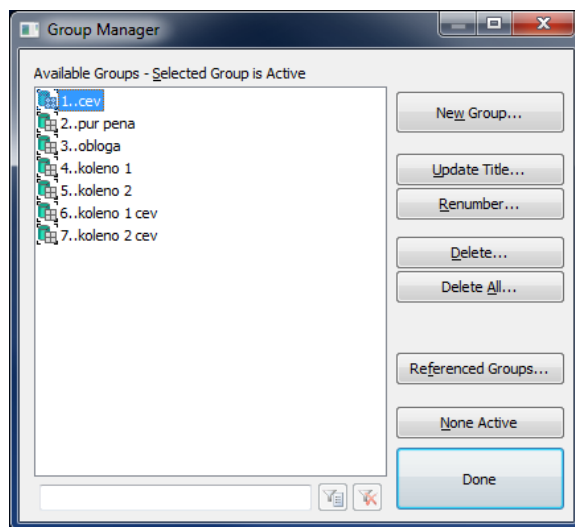


Слика 28. Анализа провођења топлоте

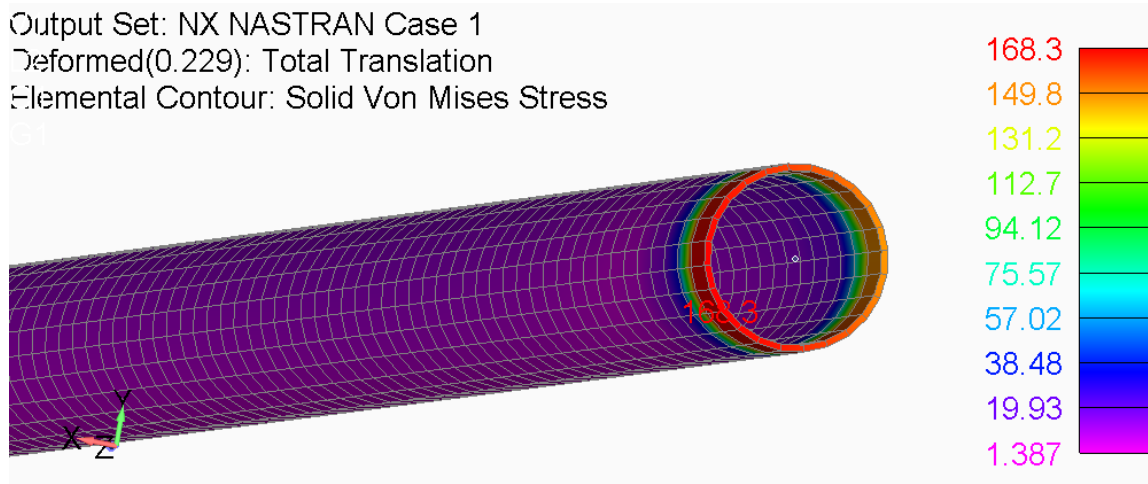
Ради боље прегледности и тумачења добијених резултата модел треба поделити у неколико група елемената. У конкретном случају групе су направљене тако да свака група представља по један слој предизоловане цеви топловода (слика 30).



Слика 29. Креирање оптерећења након прорачуна расподеле температуре

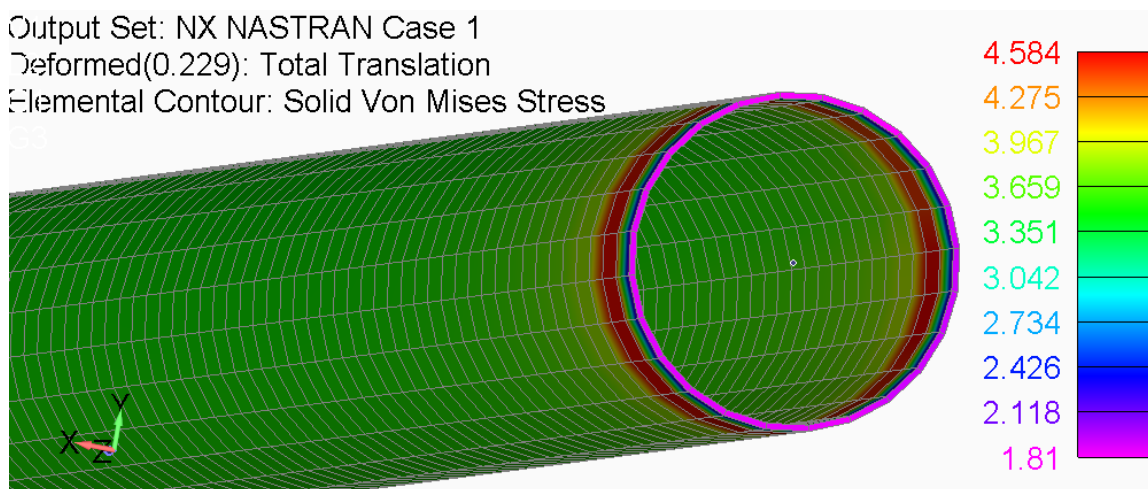


Слика 30. Креиране групе за анализу добијених резултата

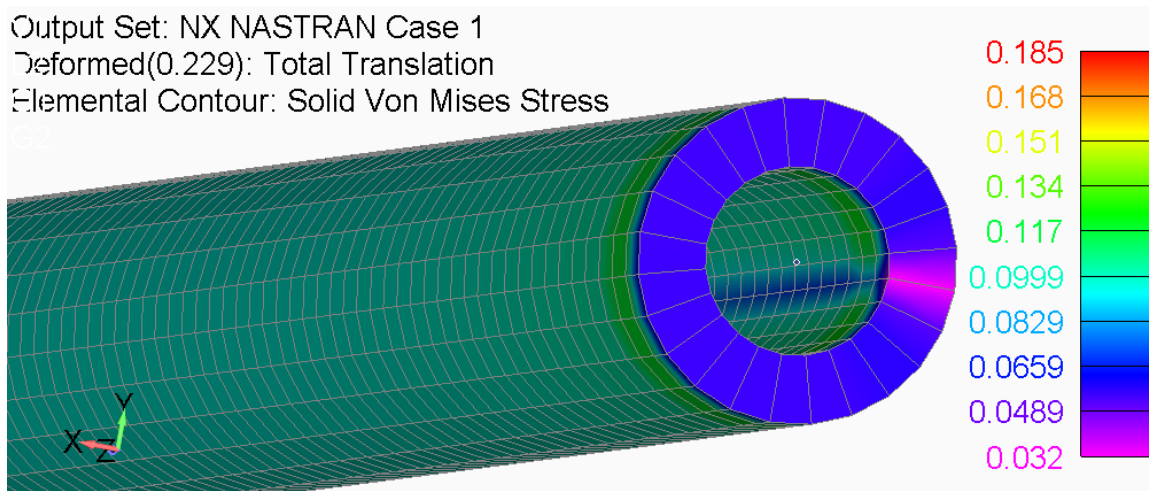


Слика 31. Поље еквивалентог напона у челичној цеви – Место максималног напона

Максимални напон у сва три материјала се очекивано јавља у челичној цеви на месту где је она укљештена у чврстој тачки (слика 31). Вредност напона је мања од дозвољеног напона, који за челичну цев износи $\sigma_{doz}=190\text{MPa}$. Максимални напон у заштитној облози се као и код челичне цеви јавља код укљештења (слика 32).

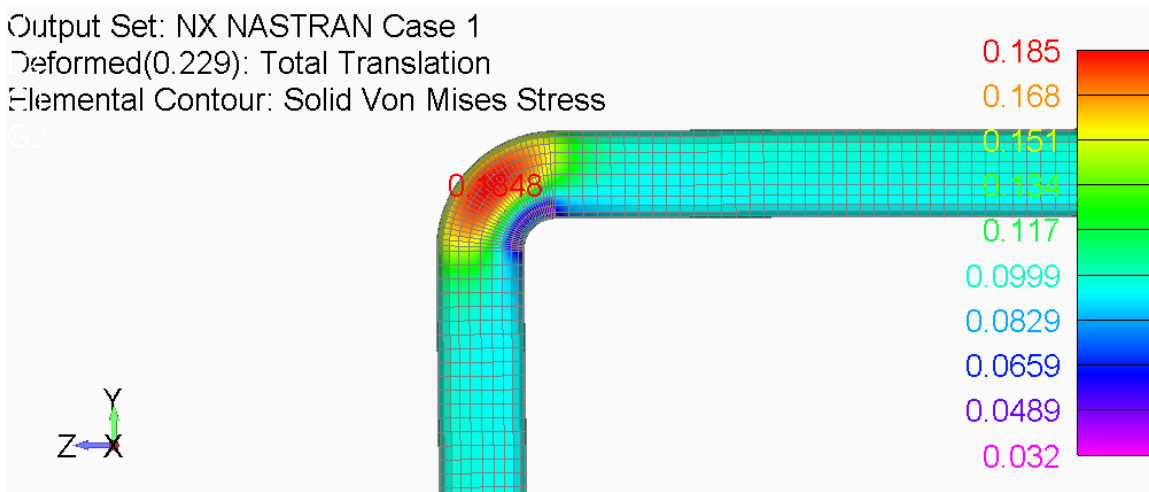


Слика 32. Поље еквивалентог напона у РЕHD облози– Место максималног напона



Слика 33. Поље еквивалентног напона у изолацији на месту укљештења

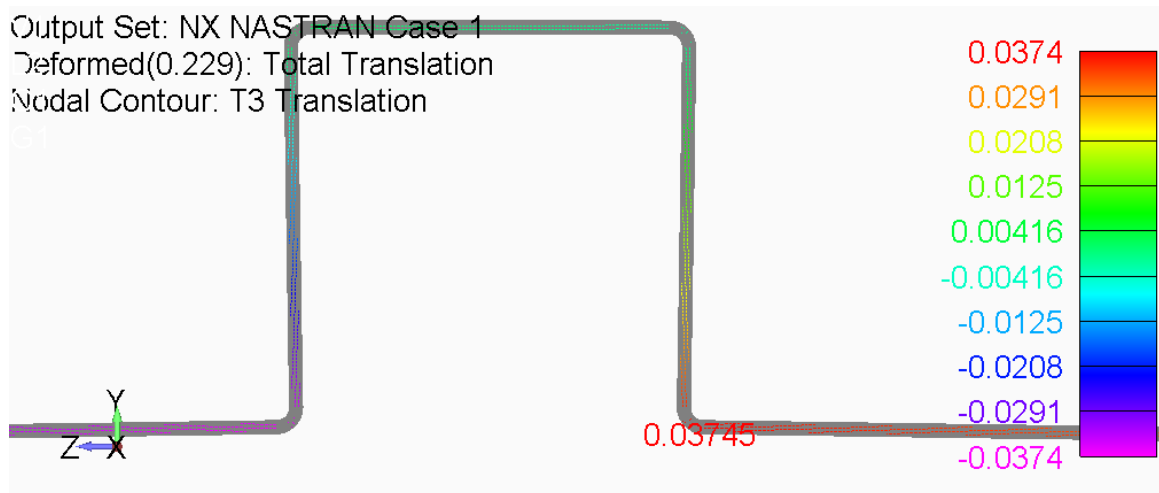
За разлику од челичне цеви и *PEHD* облоге, у којима се највеће вредности напона јављају на месту укљештења, у случају изолационог материјала максимална вредност напона је у колену између два крака компензатора (слика 34).



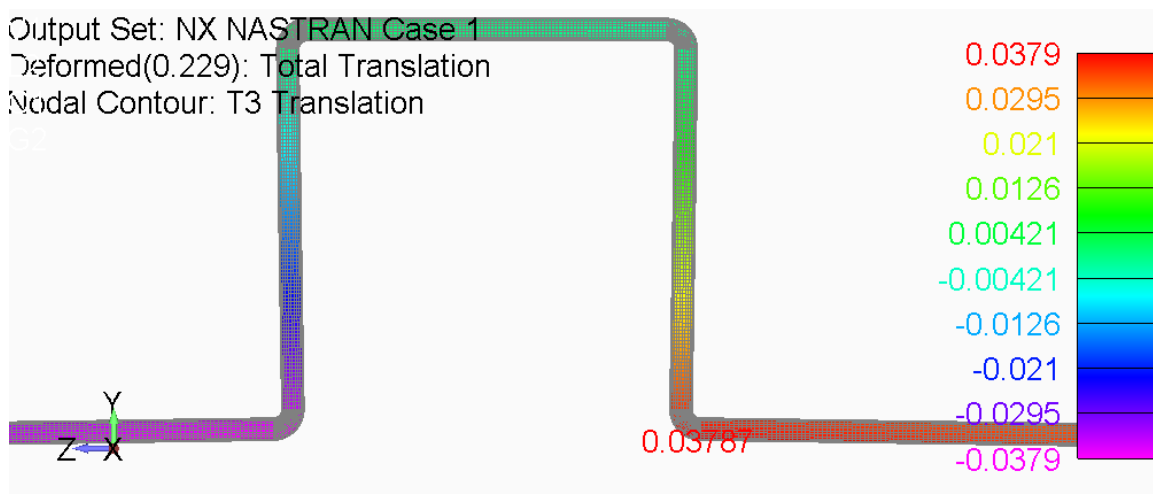
Слика 34. Поље еквивалентног напона у изолацији - Место максималног напона

На сликама 35-37 приказано је поље подужног померања сва три слоја предизоловане топоводне цеви на месту компензатора, посебно. Приказани резултати потврђују да се сва три слоја предизоловане топоводне цеви

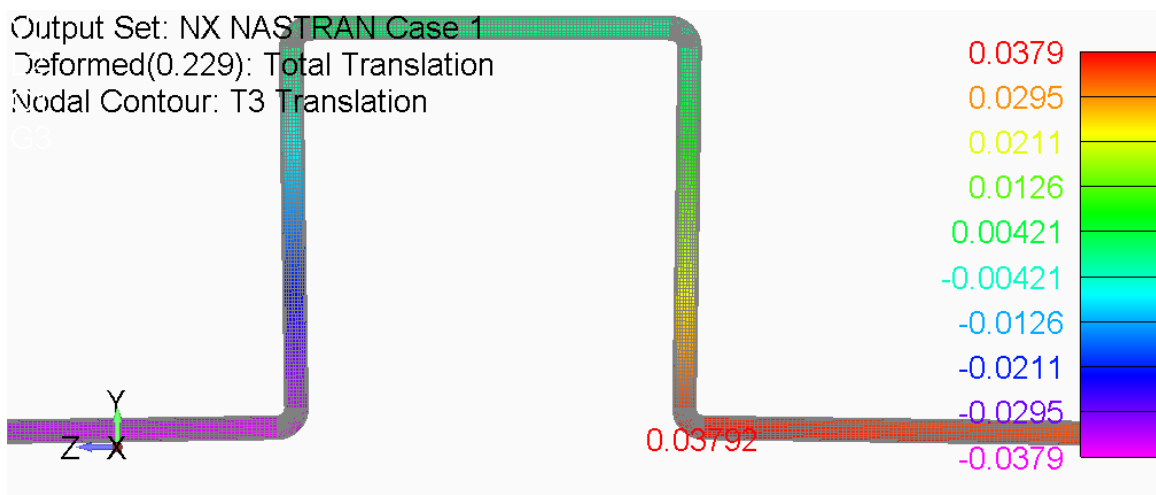
померају паралелно један са другим. Види се да се померање поклапа са аналитички добијеним издужењем Δl .



Слика 35. Поље померања челичне цеви у правцу Z осе (издужење)

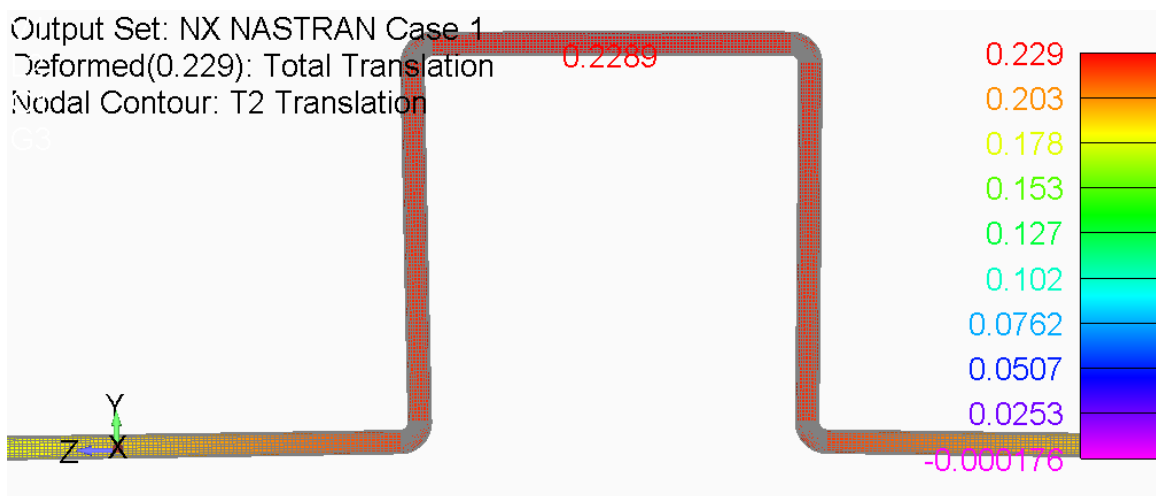


Слика 36. Поље померања изолације у правцу Z осе (издужење)



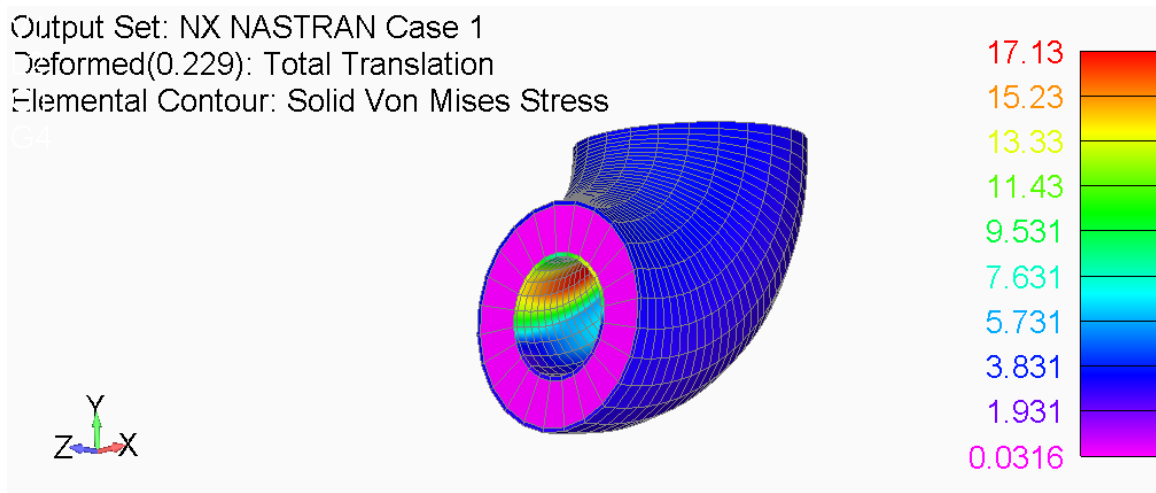
Слика 37. Поље померања облоге у правцу Z осе (издужење)

На слици 38 приказана је улога компензатора. Померања цеви са леве и десне стране која су најизраженија на средини трасе компензатор претвара у померање по Y осе и тиме ослобађа цев од прекомерних напона.

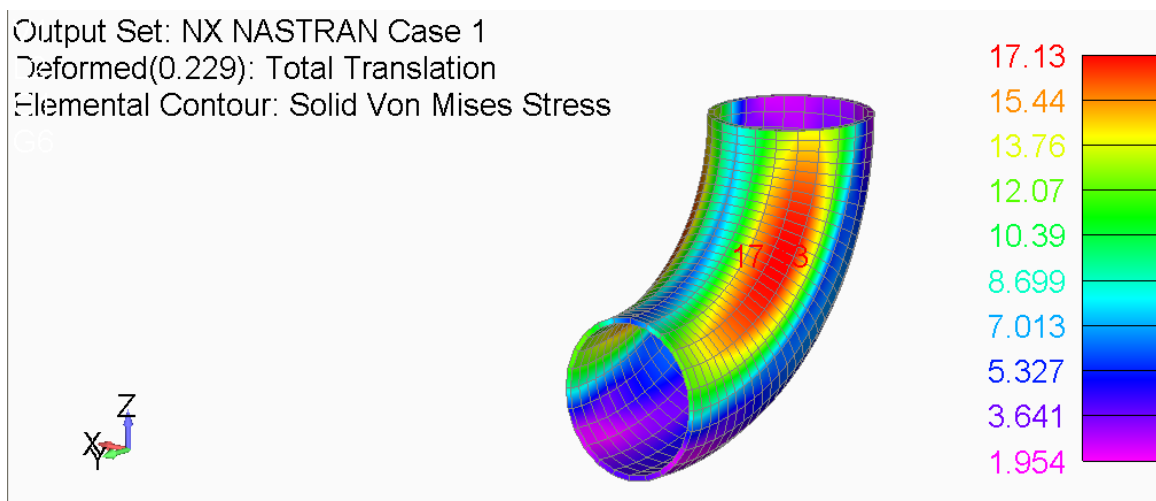


Слика 38. Поље померања компензатора у правцу Y осе

На сликама 39 и 40 је приказано поље еквивалентног напона у колену1 које се налази између праве цеви и првог крака компензатора. Напони у изолацији и обложној цеви су релативно малих вредности, док се у челичној цеви највећа вредност напона јавља на бочном делу мада је и она далеко испод дозвољене вредности.

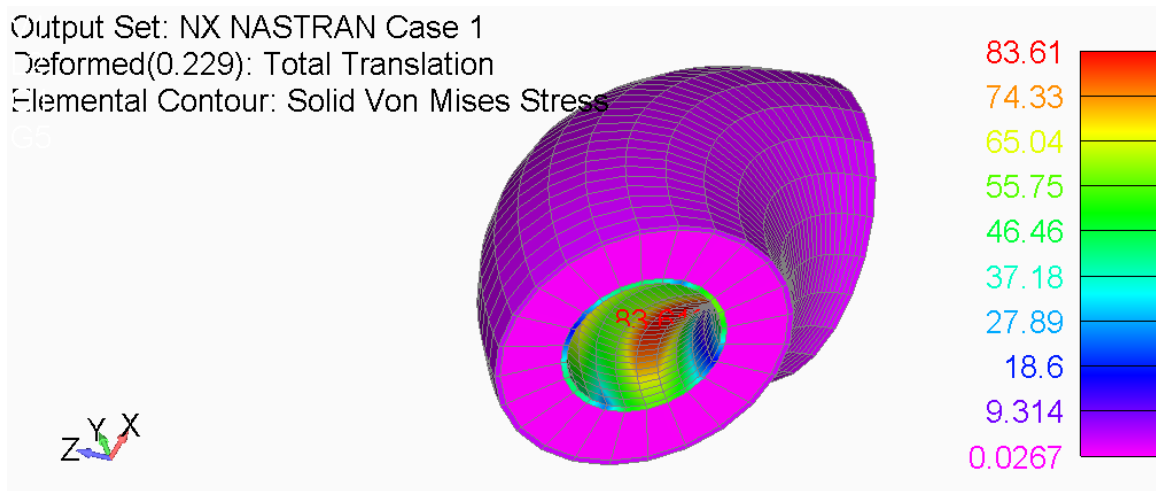


Слика 39. Поље еквивалентног напона колена1 компензатора

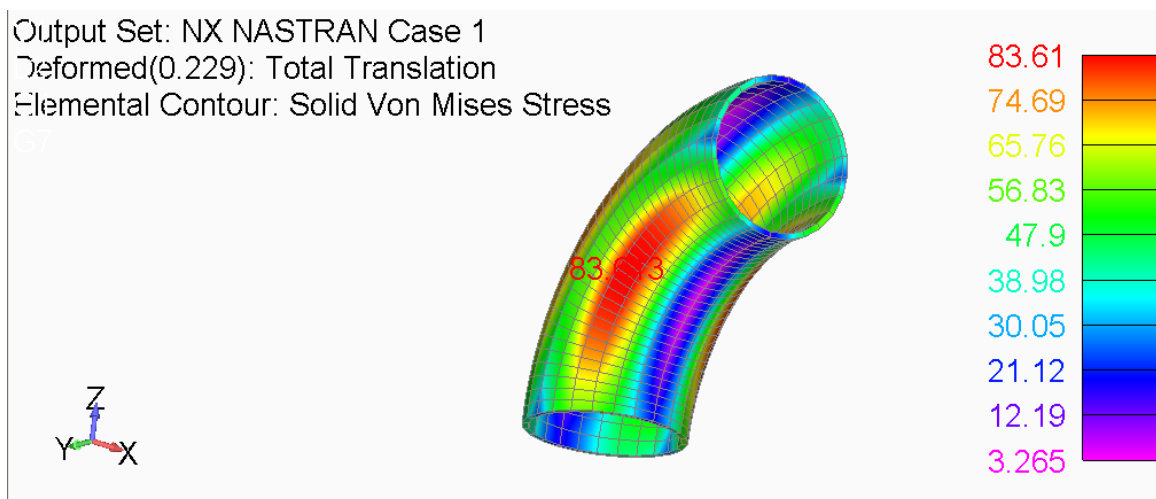


Слика 40. Поље еквивалентног напона у челичној цеви колена1 компензатора

На сликама 41 и 42 је приказано поље еквивалентног напона у колену2 компензатора које се налази између два крака компензатора. Напони у изолацији и обложној цеви су занемарљиви, док су у челичној цеви по бочним странама већих вредности, мада и даље испод прописаног максимума.

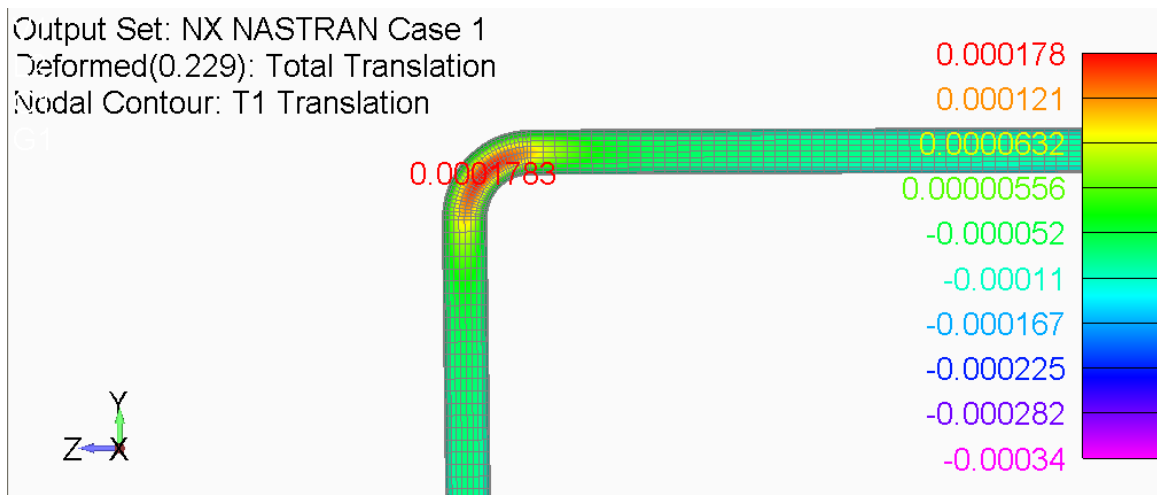


Слика 41. Поље еквивалентог напона у колелу2 компензатора

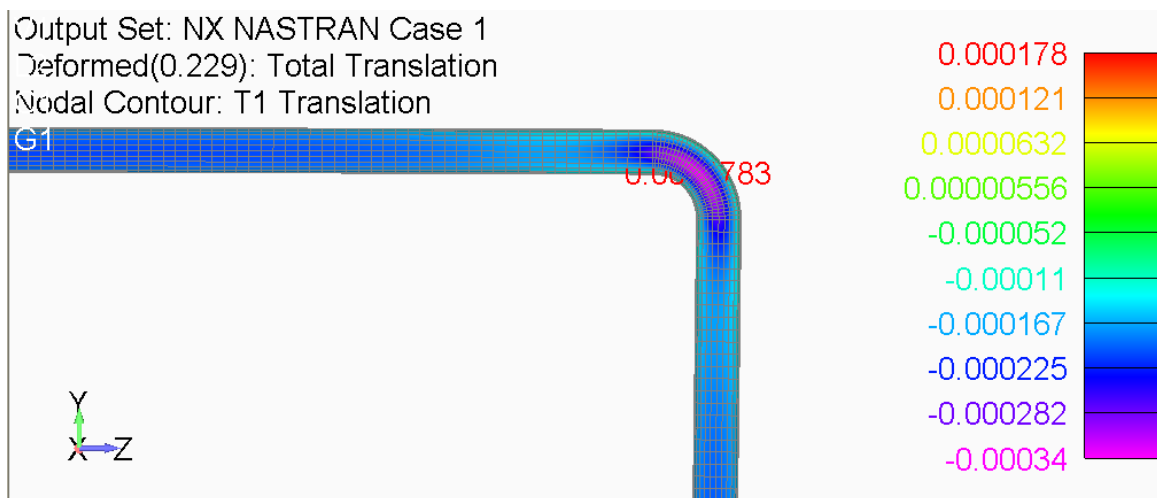


Слика 42. Поље еквивалентог напона у челичној цеви колелу2 компензатора

При температурном ширењу тела се у случају да је једна димензија тела знатно већа од осталих ширење своди на линеарно ширење. Провера ове тврдње јесте анализом померања челичне цеви по X оси (попречног ширења). На сликама 43 и 44 је приказано колелу2 цеви са обе бочне стране где су највеће вредности ширења. Може се констатовати да су та померања занемарљива, док на осталим деловима цеви померања скоро и да нема.



Слика 43. Поље померања у правцу X осе - Ширење пречника челичне цеви



Слика 44. Поље померања у правцу X осе - Ширење пречника челичне цеви

5. Закључак

Приликом избора између не малог броја програма за моделирање и анализу машинских конструкција који се у задње време појављују на тржишту увек је добро извршити, у мери у којој је то могуће, проверу и сагледавање предности и недостатака појединих програма. У овом раду је, без амбиције да се обухвате све могућности програма *Femap са NX Nastran* солвером, извршена оваква једна провера за конкретан случај „U“ самокомпензације температурних дилатација топловода. Програм *Femap* за пре и пост процесирање се показао као добро радно окружење за припрему модела, док су резултати добијени *NX Nastran*-ом веома корисни у инжењерској пракси.

Применом програма *Femap са NX Nastran* солвером пројектант је ослобођен мукотрпног поступка аналитичког прорачуна који је за сложеније конфигурације врло компликован.

Литература:

1. Милош Којић, Радован Славковић, Мирослав Живковић, Ненад Грујовић, Метод коначних елемената 1- Линеарна анализа, Крагујевац, 1998.
2. Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, *Linear static and dynamic structural analysis, Pre-andpost- processing examples in program Femap for program package PAK, Faculty for Mechanical Engineering, Kragujevac, University of Kragujevac*, 2013.
3. ISOPLUS, Предизоловане индустријске цеви – пројектни део
4. Мирко Петровић, Компензација температурних дилатација, писмени рад за стручни испит, Београд, 2012.
5. Бешавне челичне цеви за опрему под притиском- Технички захтеви за испоруку –Део 2: Цеви од нелегираног и легираног челика са особинама утврђеним за повишену температуру *SRPS EN 10216-2:2014*
6. Цеви за даљинско грејање *SRPS EN 253:2012*
7. *Polyethylene (PE) pipes, General quality requirements and testing, DIN8075*, 1999.
8. *Femap with NX Nastran*