

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Нелинеарна анализа

Број индекса: 410/2017

Никола Б. Јовић

**АНАЛИЗА НУМЕРИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА ТЕСТОВА
НАЛЕТАЊА ТЕРЕТНИХ ВАГОНА КОРИШЋЕЊЕМ
РАЗЛИЧИТИХ ТИПОВА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Мирослав Живковић, - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да изврши креирање мреже теретног вагона применом тетраедарских коначних елемената без међучворова, и припрему модела за даљу нумеричку симулацију. Прикаже поступак нумеричке симулације налетања теретних вагона, применом различитих типова коначних елемената. Дефинише контактне парове, ограничења и оптерећења у складу са описом проблема и пусти анализу у софтверу LS-DYNA. Упореди резултате анализе добијене применом 3Д коначних елемената и модела креираног применом коначног елемента љуске. Изведе закључке до којих се дошло приликом израде рада.

Препоручена литература:

- [1] Р. С. М. Ж. Н. Г. М. Којић, Метод коначних елемената 1 - Линеарна анализа, Крагујевац: Машински факултет, 2010.
- [2] К.-J. Bathe, Finite Elements Procedures, Second Edition, USA, 2016.
- [3] Т. J. R. Hughes, The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis, Prentice Hall , 1987.
- [4] J. Hallquist, LS-DYNA Theoretical Manual, California, California: Livemore CA, 1998.

Крагујевац, 17.05.2019

Ментор:

Др Мирослав Живковић, редовни професор

Резиме

Основни циљ овог рада је синтеза знања и података, која ће послужити новим корисницима да се што пре упознају са радом и могућностима примене софтвера LS-DYNA, као једним од најразвијенијих и најпримењенијих у свету. Нумеричка симулација налетања теретног вагона спроведена је применом комерцијалног софтвера LS-DYNA који је заснован на примени методе коначних елемената. Метода коначних елемената је данас најопштији нумерички метод, примењен готово у свим наукама, а посебно у инжењерским областима. На основу готовог CAD модела креирана је мрежа 3D коначних елемената без међучворова у софтверу FEMAP v12.0, а даља подешавања модела за динамичку анализу извршена су у софтверу LS-DYNA. Резултати анализе модела 3D коначних елемената без међучворова су поређени са резултатима анализе модела креираног применом четворочворних коначних елемената љуске.

Кључне речи: динамичка анализа конструкција, симулације судара, експлицитна анализа

Abstract

The main objective of this paper is the synthesis of knowledge and data, which will be useful to new user in order to get familiar with use and possibilities of usage LS-DYNA software, as one of the most developed and applied in the world. Numerical simulation of a freight wagon bumping was made with commercial LS-DYNA software which is based on the application of the finite element method. The finite element method is the most common numerical method applied in almost all sciences, and especially in the engineering fields. Based on the CAD model, a 3D finite element mesh without midside nodes was created in FEMAP v12.0 software, and further model adjustments for dynamic analysis were made in LS-DYNA software. The results of the analysis of the 3D finite element without midside nodes model are compared with the results of the model analysis created using the finite element four-nodes shell.

Key words: dynamic analysis of structures, crash simulation, explicit analysis

Садржај:

1. Увод.....	1
2. Теоријске основе	3
2.1. Једначине равнотеже коначних елемената	3
2.2. Диференцијалне једначине кретања	5
2.3. Интеграција диференцијалних једначина кретања.....	7
2.3.1. Експлицитна и имплицитна метода интеграције	7
2.4. Метода централних разлика.....	8
3. Софтверски пакет LS-DYNA	12
3.1. Структура улазне датотеке.....	12
3.2. Контакт у софтверу LS-DYNA	12
3.2.1. Контакт у софтверу LS-DYNA.....	13
3.2.2. Прорачун крутости контакта.....	13
3.2.3. Типови контакта коришћени у анализи	14
3.2.4. Излазни фајлови контакта	15
3.2.5. Параметри контакта	16
3.3. Компатибилност софтвера LS-DYNA и FEMAP	17
4. Примена софтвера за анализу налетања вагона.....	18
4.1. Поставка анализе модела	18
4.2. Симулација налетања вагона. Подешавање улазне датотеке LS-DYNA-е.....	18
4.3. Учитавање геометрије у LS-PrePost.....	19
4.4. Дефинисање контроле анализе и излазних параметара	20
4.5. Дефинисање геометрије модела, мреже и материјала.....	25
4.5.1. Дефинисање геометрије модела.....	25
4.5.2. Дефинисање материјала.....	28
4.6. Дефинисање контакта.....	35
4.7. Дефинисање граничних услова и оптерећења	44
4.7.1. Дефинисање граничних услова.....	44
4.7.2. Дефинисање почетне брзине и оптерећења	47
4.7.3. Дефинисање оптерећења	47
4.8. Пуштање анализе	48
5. Резултати анализе	51
5.1. Учитавање и упоредни приказ резултата анализе	51
6. Закључак	67
Литература.....	69

1. Увод

У савременој инжењерској пракси је реткост пронаћи пројекат који не захтева неку врсту симулације за анализу понашања модела под одређеним условима. Тестирање прототипова све се више замењује симулацијом, применом методе коначних елемената (МКЕ), јер то омогућава бржи и јефтинији начин за процену дизајнерских концепата и детаља дизајна модела. На пример, при развоју дизајна аутомобила, симулација судара применом МКЕ у великој мери замењује неекономична и дуготрајна експериментална испитивања, како за процену концепције раног дизајна, тако и за детаље коначног дизајна аутомобила. У многим областима производње примена МКЕ убрзава процес дизајнирања алата, омогућавајући симулацију процеса попут обликовања, истискивања и ливења делова. При томе у току развоја је могуће применом адекватних метода извршити и оптимизацију модела, и на тај начин остварити велику уштеду при изради модела, што је веома важно при серијској производњи.

У овом раду извршена је нумеричка симулација налетања теретних вагона. Постоји неколико софтверских пакета који се могу користити за испитивање судара возила, али један од најбољих је софтвер LS-DYNA.

LS-DYNA представља један од најпознатијих и најбољих софтвера за решавање мулти-физичких проблема, укључујући анализу конструкција, провођење топлоте и динамику флуида. При том, проблеме је могуће решавати било као спрегнуте или као одвојене феномене, нпр. анализа термичких напона или интеракција флуида и конструкције итд. У софтверу LS-DYNA постоје имплементирани алгоритми за имплицитну интеграцију, међутим при нелинеарној динамичкој анализи (као код тестова судара), углавном се користе експлицитне методе интеграције које су базиране на методи централних разлика. Поред тога, у LS-DYNA-и постоје многи развијени и имплементирани алгоритми за решавање контактних проблема. Из тог разлога софтвер LS-DYNA налази велику примену у аутоиндустрији, војној-индустрији, биоинжењерингу и многим другим дисциплинама. Како се ради о преобимној области примене софтвера, овај рад је посвећен само употреби софтвера за решавање контактних проблема, односно нумеричку симулацију налетања вагона.

На самом почетку овог рада дате су основе из теорије МКЕ, које се користе за извођење динамичких једначина. Први део садржи појмове и дефиниције које се користе и у статичкој и у динамичкој анализи, док су у другом делу дате методе интеграција нелинеарних диференцијалних једначина.

У трећем поглављу описан је принцип рада и област примене софтвера, као и структура улазне датотеке LS-DYNA-е, на основу које је извршено подешавање анализе. У наставку рада су дате методе за прорачун крутости контакта (*Soft Constraint* и *Penalty* приступ), као и типови контакта који су коришћени у анализи. На крају ове главе приказане су предности и недостаци компатибилности LS-DYNA-е са софтвером FEMAP.

Четврта глава представља суштину овог рада. У овом делу дат је поступак извођења модела из софтвера FEMAP, у коме је креирана мрежа коначних елемената модела, а

затим су приказане и детаљно објашњене картице и параметри који су коришћени за подешавање анализе налетања вагона.

У петој глави овог рада дат је поступак учитавања резултата и њихово приказивање у софтверу FEMAP. Дат је упоредни приказ резултата добијених применом 3D коначних елемената и коначних елемената љуске за најкритичнији корак анализе. Приликом визуализације резултата, приказано је поље расподеле ефективног Von-Miseses-овог напона, поље ефективне пластичне деформације и поља померања у вертикалном и подужном правцу.

2. Теоријске основе

Силе које делују на конструкције се у пракси често мењају у току времена па померања појединих тачака зависе од времена. Такође, на кретање конструкције утичу инерцијалне карактеристике, која се при израчунавању кретања морају узети у обзир. Из тог разлога уместо статичких услова равнотеже морамо да поставимо диференцијалне једначине кретања, чијом интеграцијом долазимо до померања, брзина и убрзања појединих тачака конструкције. Као и у статичкој анализи, метода коначних елемената има значајну примену у области динамике конструкција. Проблеме динамике конструкција срећемо веома често у машинству код, на пример, изучавања кретања возила, у ваздухопловству, затим у грађевинарству, при анализи утицаја земљотреса на објекте као што су зграде, мостови, бране и други значајни објекти, и у другим областима техничких и природних наука.

У оквиру ове главе прво изводимо једначине равнотеже коначних елемената на основу којих се изводе диференцијалне једначине кретања. Дефинишемо матрице маса коначних елемената, матрице крутости и матрице пригушења, а затим дајемо нумеричке поступке интеграције система диференцијалних једначина који се најчешће користе при анализи удара.

2.1. Једначине равнотеже коначних елемената

Једначину равнотеже коначног елемента извешћемо применом принципа виртуалног рада. Једнакост виртуалних радова спољашњих и унутрашњих сила се може исказати следећим изразом:

$$\int_V \delta \mathbf{e}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int_V \mathbf{F}_j^v \delta \mathbf{u}_j dV + \int_S \mathbf{F}_j^s \delta \mathbf{u}_j dS \quad (2.1)$$

Виртуални рад унутрашњих сила δA_u представља рад напона $\boldsymbol{\sigma}$ на виртуалним деформацијама $\delta \mathbf{e}$ тј.

$$\delta A_u = \int_V \delta \mathbf{e}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (2.2)$$

Виртуални рад спољашњих сила δA_s представља рад запреминских и површинских сила у које спадају и концентрисане силе [1]. Дакле, можемо писати:

$$\delta A_s = \int_V \mathbf{F}_j^v \delta \mathbf{u}_j dV + \int_S \mathbf{F}_j^s \delta \mathbf{u}_j dS + \sum \mathbf{F}_k^i \delta \mathbf{u}_k^i \quad (2.3)$$

где су $\mathbf{F}^v$ запреминске силе по јединици запремине, $\mathbf{F}^s$ површинске силе по јединици површине (притисак) и $\mathbf{F}^i$ концентрисане силе, а $\delta \mathbf{u}$ виртуална померања тачака у којима силе делују на тело.

На основу претходних релација, принцип виртуалног рада можемо да напишемо у облику:

$$\delta A_u = \delta A_s \quad (2.4)$$

Принцип виртуалног рада се изводи из једначина равнотеже и граничних услова, не узимајући у обзир материјалне карактеристике, па је применљив за било који тип конститутивних релација¹. Принцип виртуалног рада облика (2.4) важи за велика и мала померања, велике и мале деформације, статичку и динамичку анализу деформисања материјалног тела. У динамичкој анализи запреминским силама F^v додајемо инерцијалне силе.

Међутим, пре него што пређемо на извођење диференцијалних једначина кретања, дефинисаћемо још неке појмове, који представљају основе у методи коначних елемената. Погодност нумеричког решавања проблема у МКЕ постигнута је увођењем природног координатног система и интерполационих функција. Природни координатни систем је везан за елемент, његов координатни почетак се налази у средишту елемента, и координате узимају вредности у границама од -1 до 1. Интерполациона функција има вредност 1 у чвору на који се односи, а у осталим чворовима има вредност нула [1]. Ове функције фигуришу у изразима за интерполацију геометрије и померања, који се могу дати у матричном облику:

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{X} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}\mathbf{U} \quad (2.6)$$

У једначинама (2.5) и (2.6) $\mathbf{x}$ и $\mathbf{u}$ представљају векторе положаја и померања материјалних тачака унутар коначног елемента, $\mathbf{X}$ и $\mathbf{U}$ су вектори положаја и померања чворова елемента респективно, $\mathbf{H}$ је матрица интерполационих функција.

Вектор деформације $\mathbf{e}$ у материјалној тачки елемента одређен је релацијом

$$\mathbf{e} = \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (2.7)$$

где је $\mathbf{B}$ одговарајућа матрица која садржи изводе интерполационих функција и која даје везу између деформације и чворних померања елемената. Напон $\boldsymbol{\sigma}$ у материјалној тачки дефинише генералисани Хуков закон

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\mathbf{e} \quad (2.8)$$

где је $\mathbf{C}$ – еластична конститутивна матрица. Матрица $\mathbf{C}$ у зависности од врсте проблема може имати различити облик [1]. Применом матрице извода интерполационих функција и еластичне конститутивне матрице, могуће је изразити матрицу крутости $\mathbf{K}$ коначног елемента применом следећег израза:

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV \quad (2.9)$$

Најзад, силе у чворовима елемента, као резултат напона у коначном елементу, одређујемо из израза за виртуални рад, заменом (2.7) у једначину облика (2.2), односно

$$\delta A^u = \int_V \delta \mathbf{e}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \delta \mathbf{U}^T \int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{F}^u \quad (2.10)$$

¹ Конститутивне релације представљају везу између напона и деформације

одакле следи

$$\mathbf{F}^u = \int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (2.11)$$

Заменом тензора напона $\boldsymbol{\sigma}$ према (2.8) а затим и тензора деформације $\mathbf{e}$ према (2.7) у једначину (2.11) добијамо унутрашње силе елемента $\mathbf{F}^u$ у матричном облику:

$$\mathbf{F}^u = \mathbf{K}\mathbf{U} \quad (2.12)$$

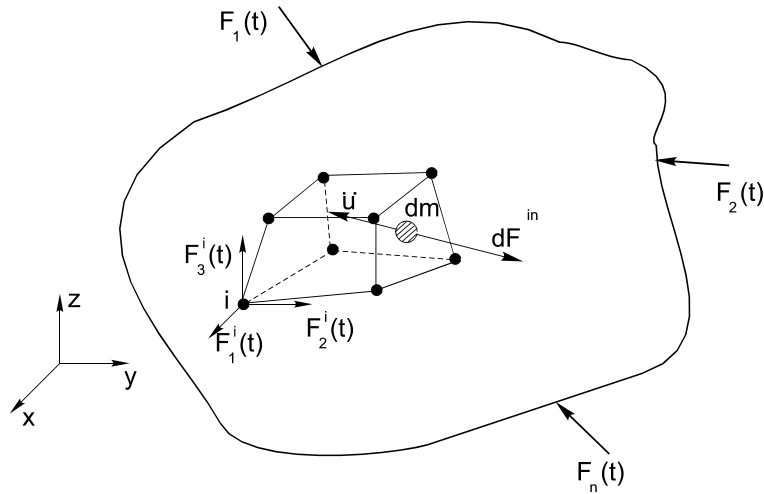
Претходна једначина представља једначину равнотеже коначног елемента.

Дати изрази важе за један коначни елемент, и користе се при дефинисању изопараметарских коначних елемената, у статичкој и динамичкој анализи.

Пошто су дате основне релације које се користе у МКЕ, можемо да пређемо на дефинисање диференцијалних једначина кретања, чијом интеграцијом, долазимо до померања, брзина и убрзања појединих тачака конструкције.

2.2. Диференцијалне једначине кретања

Овде ћемо диференцијалне једначине кретања континуума подељеног на коначне елементе, према Слици 2.2.1, да изведемо користећи принцип виртуалног рада (2.1) и поступке који се користе при извођењу основне једначине равнотеже коначног елемента.



Слика 2.2.1 Силе које делују на елементарну масу dm коначног елемента

Посматрамо тело, подељено на коначне елементе, које се креће под дејством спољашњих сила $\mathbf{F}_1(t), \mathbf{F}_2(t), \dots, \mathbf{F}_n(t)$ које се мењају у току времена. Такође, померања чворова елемената су функције времена. Поред запреминских и површинских сила, на тело делују и инерцијалне силе, тако да је у једначини равнотеже коначног елемента (2.3) потребно додати инерцијалне силе.

Елементарна запреминска инерцијална сила $d\mathbf{F}^{in}$ која одговара елементарној маси dm је

$$d\mathbf{F}^{in} = -\ddot{\mathbf{u}}dm = -\ddot{\mathbf{u}}\rho dV \quad (2.13)$$

где је $\ddot{\mathbf{u}}$ убрзање масе dm , ρ је густина, а dV елементарна запремина која одговара маси dm .

Једначине кретања коначног елемента изводимо применом принципа виртуалног рада (2.4). Узимањем у обзир израза (2.13) за инерцијалну силу, добијамо једначину:

$$\int_V \delta \mathbf{e}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int_V \delta \mathbf{u}^T (\mathbf{F}^V - \rho \ddot{\mathbf{u}}) dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}^s dS \quad (2.14)$$

Померање тачака унутар коначног елемента можемо одредити применом интерполационих функција (2.6). Диференцирањем једначине (2.6) добијамо релације за израчунавање брзине и убрзања тачака коначног елемента:

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{H} \dot{\mathbf{U}} \quad (2.15)$$

$$\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{H} \ddot{\mathbf{U}} \quad (2.16)$$

где су $\dot{\mathbf{u}}$ и $\ddot{\mathbf{u}}$ брзина и убрзање тачке.

Коришћењем израза (2.6) за $\delta \mathbf{u}$ једначина (2.14) може да се напише у облику

$$\delta \mathbf{U}^T \int_V (\mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV) \mathbf{U} + \delta \mathbf{U}^T \left(\int_V \mathbf{H}^T \rho \mathbf{H} dV \right) \ddot{\mathbf{U}} = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{F} \quad (2.17)$$

одакле следи

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (2.18)$$

Овде је уведена ознака $\mathbf{M}$ за матрицу маса коначног елемента, која се дефинише изразом

$$\mathbf{M} = \int_V \rho \mathbf{H}^T \mathbf{H} dV \quad (2.19)$$

Вектор $\mathbf{F}(t)$ представља вектор спољашњих сила које делују у чворовима коначног елемента, а обухвата површинске, запреминске и концентрисане силе, које у општем случају зависе од времена.

Често се у конструкцијама (материјалима) јављају силе отпора односно дисипације које су пропорционалне брзинама кретања тачака. Елементарна сила отпора $d\mathbf{F}^d$, која одговара елементарној запремини dV је

$$d\mathbf{F}^d = -b \dot{\mathbf{u}} dV \quad (2.20)$$

где b представља коефицијент отпора кретању, односно коефицијент пригушења. Заменом израза за силу отпора (2.20) у (2.14) као допунске запреминске силе, уз коришћење (2.15), добијамо једначину кретања коначног елемента [1]:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{B} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F}(t) \quad (2.21)$$

где је са $\mathbf{B}$ означена матрица пригушења,

$$\mathbf{B} = \int_V b \mathbf{H}^T \mathbf{H} dV \quad (2.22)$$

Матрица пригушења **B** и матрица маса **M**, имају исте димензије као и матрица крутости елемента **K**, па се примењује исти поступак за распоређивање чланова свих матрица при формирању матрице маса и матрице пригушења конструкције.

Једначинама (2.19) и (2.22) су дефинисане пуне – консистентне матрице маса и пригушења које се за све елементе изводе на исти начин - коришћењем интерполације **H** за померања. Међутим, због ефикасности рачунања, у пракси се често користе дијагоналне матрице маса и пригушења.

За изопараметарске коначне елементе матрицу маса одређујемо на основу општег израза (2.19) тако што заменимо одговарајуће интерполационе функције за поједине изопараметарске коначне елементе. Интеграли (2.19) се рачунају применом нумеричке интеграције, као и изрази за матрице крутости, при чему треба имати у виду напомене које се односе на ред нумеричке интеграције. Наиме, чланови под интегралом (2.19) за матрицу маса садрже чланове вишег реда у односу на чланове матрице крутости (2.9), пошто **H** представља интерполационе функције, а матрица **B** садржи изводе интерполационих функција.

2.3. Интеграција диференцијалних једначина кретања

Системи једначина (2.18) и (2.21) који описују кретање материјалног система представљају системе обичних диференцијалних једначина другог реда. Уколико се ради о линеарној анализи, коефицијенти матрица **K**, **M** и **B** су константни, док у нелинеарној анализи коефицијенти могу бити функције непознатих померања, брзина или убрзања. За решавање система једначина (2.18) и (2.21) постоји већи број класичних метода решавања које подразумевају одређивање аналитичких зависности померања, брзина и убрзања од времена. Класичне методе нису погодне за системе једначина какве се јављају у динамици конструкција.

2.3.1. Експлицитна и имплицитна метода интеграције

Знатно ширу примену у МКЕ имају приближне нумеричке методе директне интеграције система диференцијалних једначина, које уместо аналитичких решења за било који тренутак времена t , дају решење у појединим дискретним тренуцима времена $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t$. У циљу решавања нелинеарних диференцијалних једначина, неопходна је примена нумеричких метода. То су имплицитне и експлицитне методе интеграције. Наиме, сматрамо да смо укупан период времена T у коме нас интересује решење система диференцијалних једначина поделили на n интервала $\Delta t = T/n$. Поступак се састоји у томе што се на основу познатог решења у тренутку t на почетку интервала Δt тражи решење у тренутку $t + \Delta t$, на крају корака. Уводе се претпоставке за промену померања, брзине и убрзања унутар интервала Δt . У литератури се ове методе често називају методе корак по корак (*step by step*). За ове методе кажемо да представљају методе директне интеграције пошто се интеграција система (2.19) или (2.21) врши без икаквих додатних трансформација уз задавање одговарајућих почетних услова. Велики број аутора Bathe [2], Hughes [3] је истраживао применљивост појединих

метода, посебно тачност и стабилност решења, обзиром на дужину временског корака и друге параметре система.

Експлицитне методе се заснивају на задовољењу диференцијалних једначина кретања у тренутку t како би се одредиле величине у тренутку $t + \Delta t$. Ове методе захтевају знатно мањи корак интеграције Δt да би се добила стабилна решења и задовољавајућа тачност. Под стабилношћу се подразумева особина да промена почетних услова не може довести до дивергенције решења (увећања померања која не одговарају кретању система). **Имплицитне методе** подразумевају задовољење диференцијалних једначина кретања у тренутку $t + \Delta t$, тако да се на основу познатих решења у тренутку t одређују непозната решења у тренутку $t + \Delta t$ и омогућују њихово задовољење са унапред одабраном тачношћу. Избор временског корака Δt код имплицитних метода је везан за жељену тачност решења а мање за стабилност, пошто се код ових метода може постићи безусловна стабилност. Поступци директне интеграције имају општи карактер и примењују се при решавању нестационарних проблема теорије поља физичких величина, као што су и нестационарно провођење топлоте и нестационарно струјање флуида. У софтверу LS-DYNA развијени су алгоритми за нумеричку интеграцију који се заснивају на експлицитним методама, односно на методи централних разлика. Практично, LS-DYNA користи модификовану методу централних разлика, која је представљена у наставку овог рада.

2.4. Метода централних разлика

Посматрајмо динамичку једначину равнотеже линеарног система коначних елемената у тренутку времена t_n , према (2.21):

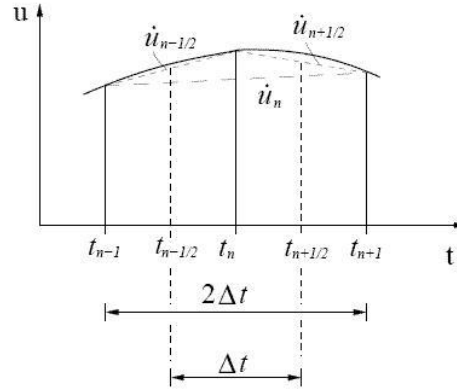
$$\mathbf{M}^n \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{B}^n \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}^n \mathbf{U} = {}^n \mathbf{F} \quad (2.23)$$

где су $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ и $\mathbf{K}$ матрице маса, пригушења и крутости; ${}^n \mathbf{F}$ је вектор спољашњих сила; и ${}^n \ddot{\mathbf{U}}$, ${}^n \dot{\mathbf{U}}$, ${}^n \mathbf{U}$ су вектори убрзања, брзине и померања целокупног система састављеног од коначних елемената. У једначини (2.23) величине $\mathbf{M}^n \ddot{\mathbf{U}}$, $\mathbf{B}^n \dot{\mathbf{U}}$, $\mathbf{K}^n \mathbf{U}$ су инерцијалне силе, силе пригушења и еластичне силе система.

Суштина методе директне интеграције заснива се на следећем:

- уместо да се једначина (2.23) задовољава у било ком времену t , тражи се да се она задовољава само у дискретним тренуцима времена $t_n = n \cdot \Delta t_{(n=0,1,2,\dots,m)}$ где је Δt интервал времена.
- промена померања, брзина и убрзања у оквиру временског интервала Δt се унапред претпоставља.
- Претпоставка је да су вектори померања, брзина и убрзања ${}^0 \ddot{\mathbf{U}}$, ${}^0 \dot{\mathbf{U}}$, ${}^0 \mathbf{U}$ у тренутку времена $t_0 = 0$ познати. Применом неког алгоритма могуће је добити решење у неком времену, ако је познато решење у неком претходном тренутку времена. Претпоставимо даље да је решење познато у времену $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ и да се тражи

решење у времену $t_{n+1} = t_n + \Delta t$. Дискретизација код методе централних разлика, приказана је на Слици 2.4.1.



Слика 2.4.1 Дискретизација методом централних разлика

Код методе централних разлика непозната функција у интервалу $[t_{n-1}, t_{n+1}]$ апроксимира се полиномом другог степена, тако да се брзине и убрзања могу одредити помоћу следећих израза:

$$\begin{aligned} {}^n\dot{u} &= \frac{1}{2\Delta t}({}^{n+1}u - {}^{n-1}u) \\ {}^n\ddot{u} &= \frac{1}{(\Delta t)^2}({}^{n+1}u - 2{}^nu + {}^{n-1}u) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Заменом израза (2.24) у једначину равнотеже (2.23), добијамо:

$$\mathbf{M}^* \cdot {}^{n+1}\mathbf{U} = {}^n\mathbf{F}^* \quad (2.25)$$

где су:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^* &= \frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{C} \\ {}^n\mathbf{F}^* &= {}^n\mathbf{F} - (\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2}\mathbf{M}) \cdot {}^n\mathbf{U} - (\frac{1}{\Delta t^2}\mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{C}) {}^{n-1}\mathbf{U} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Решавањем једначине (2.25), можемо одредити вектор ${}^{n+1}\mathbf{U}$ у тренутку времена t_{n+1} када су позната померања у тренуцима времена t_n и t_{n-1} . Ако су познате величине ${}^0\mathbf{U}$ и ${}^0\dot{\mathbf{U}}$ у тренутку времена $t = 0$, следи:

$$\mathbf{M}^0\ddot{\mathbf{U}} = {}^0\mathbf{F} - \mathbf{B}^0\dot{\mathbf{U}} - \mathbf{K}^0\mathbf{U} \quad (2.27)$$

одакле је могуће одредити вектор ${}^0\ddot{\mathbf{U}}$, а затим из једначина (2.24) за $n=0$ добијамо:

$${}^{-1}\mathbf{U} = {}^0\mathbf{U} - \Delta t {}^0\dot{\mathbf{U}} + \frac{\Delta t^2}{2} {}^0\ddot{\mathbf{U}} \quad (2.28)$$

Ако је матрица $\mathbf{M}$ дијагонална, тада из (2.25) непосредно следи решење:

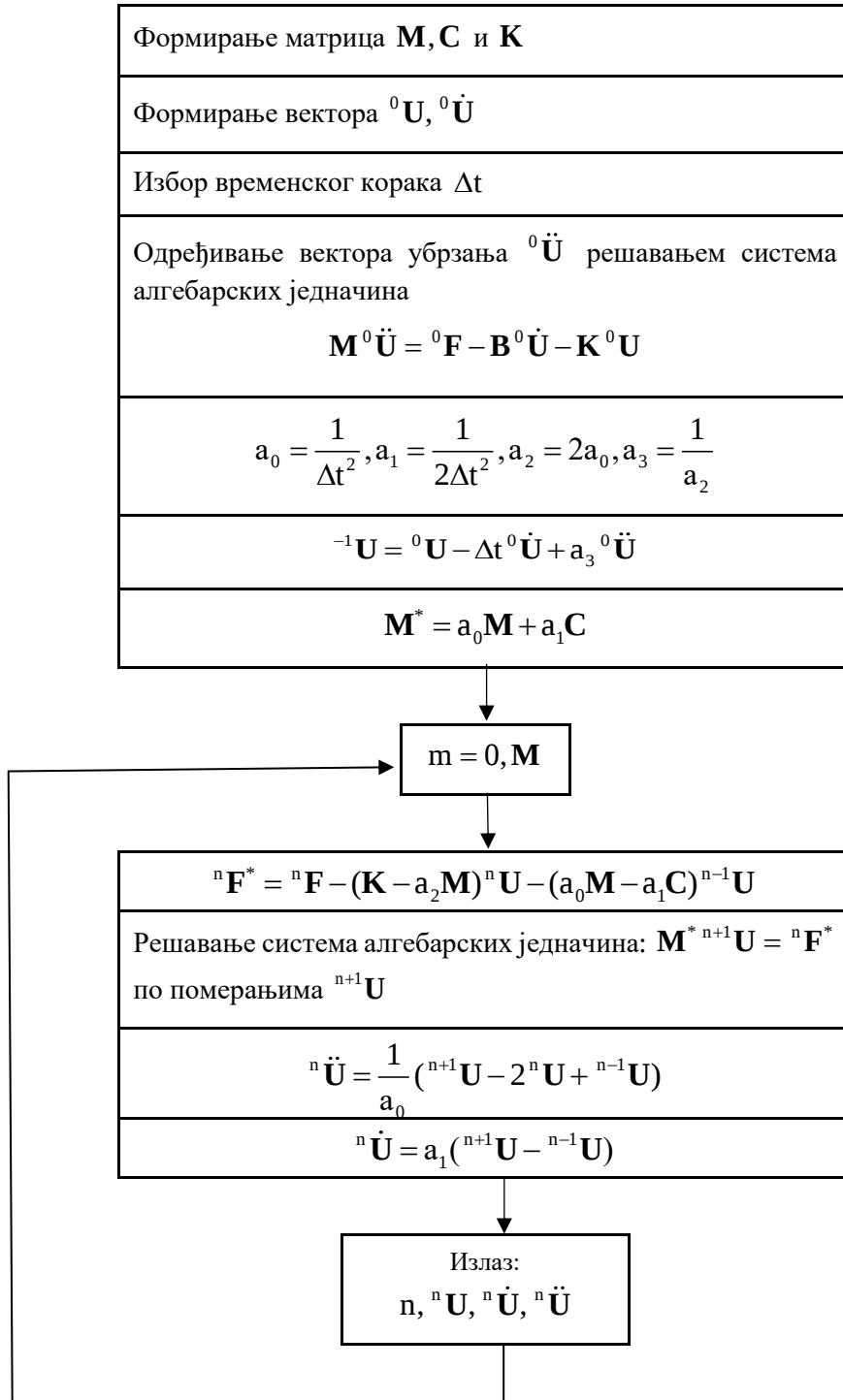
$${}^{n+1}\mathbf{U}_i = \frac{{}^n\mathbf{F}_i^* \cdot \Delta t^2}{M_{ii}}, M_{ii} > 0 \quad (2.29)$$

где је могуће формирање вектора ${}^n\mathbf{F}_i^*$ на нивоу елемента, без формирања матрица укупног система, тј.

$${}^n\mathbf{F}^* = {}^n\mathbf{F} - \sum_k \mathbf{K}^{(k)} {}^n\mathbf{U} - \sum_k a_0 \mathbf{M}^{(k)} ({}^{n-1}\mathbf{U} - 2 {}^n\mathbf{U}) \quad (2.30)$$

У Табели 2.4.1 је дат алгоритам за експлицитну интеграцију коришћењем методе централних разлика.

Табела 2.4.1 Алгоритам за експлицитну интеграцију



Не постоје прецизно дефинисани услови стабилности за интеграцију нелинеарних проблема. LS-DYNA користи стандардну методу централиних разлика за апроксимацију граничне величине временског корака. Због тога LS-DYNA користи величину временског корака као [4]:

$$\Delta t = 0.9 \Delta t_{\text{critical}} \quad (2.31)$$

LS-DYNA временски корак одређује на основу најмањег елемента, према једначини (2.32):

$$\Delta t_{\text{critical}} = \frac{l}{c} \quad (2.32)$$

где је l дужина елемената, а c брзина простирања таласа за коришћени материјал. Изрази за конкретне типове елемената могу се наћи у литератури [5].

3. Софтверски пакет LS-DYNA

LS-DYNA је вишенаменски софтвер за експлицитну и имплицитну нумеричку интеграцију нелинеарних динамичких анализа конструкција.

Проблем сматрамо нелинеарним ако модел садржи бар једну (понекад и све) од наведених компликација:

- Промена граничних услова (као што је контакт између делова који се са временом мења)
- Велике деформације (као што је деформација лимова)
- Нелинеарни материјали који не показују идеално еластично понашање
- Анализа догађаја великих брзина и кратког трајања, у којима су важне инерцијалне силе, као што су:
 - Аутомобилски судар (деформација шасије, надувавање ваздушних јастука, затезање сигурносног појаса итд.)
 - Експлозије (подводних мина, ракета итд.)

Софтвер налази примену у аутомобилској, ваздухопловној, грађевинској, војној, производној и биоинжењерској индустрији.

3.1. Структура улазне датотеке

Улазна датотека за софтвер LS-DYNA је ASCII датотека са екстензијом ***.dyn**, ***.d**, ***.dat**, ***.key** или ***.k**. При подешавању анализе модела, користићемо **Keyword** формат. Овај формат обезбеђује флексибилну и логички организовану базу. Сличне функције су груписане под истим “кључем”. Тако на пример под кључем ***ELEMENT**, налазе се 3D коначни елементи, гредни елементи и елементи љуске. Команде у датотеци **Keyword** формата могу се задавати произвољним редом, ради једноставности, препоручује се општа структура на основу које је извршено подешавање улазне датотеке за анализу у овом раду.

Општа структура може бити приказана следећим блоковима:

- Дефинисање контроле решења и излазних фајлова
- Дефинисање геометрије модела, мреже и материјала
- Дефинисање контакта
- Дефинисање граничних услова и оптерећења.

3.2. Контакт у софтверу LS-DYNA

Велику групу нелинеарних проблема чине и контактни проблеми, па су зато овде дате неке основе везане за моделирање контакта у софтверу LS-DYNA. Анализа контакта чини интегрални део многих проблема у области великих деформација. Прецизно моделирање контактеног пара између тела је кључна ствар у смислу могућности симулације методом коначних елемената [5].

У LS-DYNA-и постоји велики број развијених типова контакта, од којих се неки типови примењују у специфичним проблемима, као што су *airbag* контакти, ивични контакти и др., али и типови који се користе у општим случајевима. У овом одељку дат је опис само оних контакта који су коришћени у овом раду.

3.2.1. Контакт у софтверу LS-DYNA

У LS-DYNA софтверу, контакт је дефинисан идентификовањем локација *slave* сегмента које потенцијално продиру у *master* сегмент. Идентификација се врши преко делова, сетова сегмената, сетова чворова итд. Провера пенетрације, коришћењем једног од многих алгоритама, врши се у сваком временском кораку.

Контакт се интерно представља као линеарна опруга између *slave*-чворова и најближег *master* сегмента. Крутост ових опруга одређује силу која ће бити примењена на *slave* чворове и *master* чворове. Тренутно постоје две методе прорачуна крутости контакта које ће овде укратко бити представљене [5]. Некада је згодно и ефикасно дефинисати један контакт који ће управљати било којим потенцијалним контактима у моделу. Препорука је да се избегава дефинисање сувишних контаката, што може изазвати нумеричку нестабилност. Како би се обезбедила флексибилност у моделирању контакта, LS-DYNA има развијен велики број типова контакта и параметара, који ће даље укратко бити описани.

3.2.2. Прорачун крутости контакта

Penalty-based приступ

Ово је препоручена метода и подразумева да у картици **CONTACT_(option)* буде *SOFT=0*, Слика 3.2.1. Ова метода користи величину контактеног сегмента и његова материјална својства да би се одредила крутост опруга и коришћена је приликом дефинисања контакта у анализираном моделу.

The image shows a 'Keyword Input Form' window. At the top, there are buttons: 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The main area contains a table of parameters for the contact type **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (0)*. The parameters are: *SOFT* (value 0, highlighted with a red box), *SOFSL* (value 1), *LCIDAB* (value 0), *MAXPAR* (value 1.025), *SBOPT* (value 2.0), *DEPTH* (value 2), *BSORT* (value 1), and *FRCFRQ* (value 1). At the bottom, it shows 'Total Card: 0', 'Smallest ID: 0', 'Largest ID: 0', and 'Total deleted card: 0'.

Слика 3.2.1 Дефинисање методе прорачуна крутости опруга

Ова метода зависи од константи материјала и величине сегмената и због тога налази примену када су параметри карактеристика материјала између додирних површина величине истог реда. Крутост у опругама се апроксимативно узима као минимум крутости *slave* и *master* сегмента.

У случају контакта материјала са доста различитим материјалним карактеристикама контакт може пући, јер је крутост веома мала. Ово се често дешава код контакта меке густе пене и метала. Зато се овај метод не препоручује за анализу судара, уколико претходна искуства нису показала да нема проблема [6].

Soft Constraint-based приступ

Ово није основни метод прорачуна крутости контакта, а одговара случају када је у команди `*CONTACT(option)` задато `SOFT=1` или `SOFT=2`. Овде се крутост линеарних контактних опруга рачуна на основу чворних маса које долазе у контакт и величине глобалног временског корака. Добијена крутост контакта не зависи од материјалних константи, па овај метод налази примену у анализи контакта различитих материјала. Крутост је одређена узимањем чворне масе, која се дели квадратом временског корака са фактором који обезбеђује стабилност [7].

Уопште, у случају контакта два метала, резултујућа крутост опруга код *penalty* - методе и *constraint* - методе, односно када је `SOFT=0` и `SOFT=1`, је слична. За случај контакта пене и метала, када је `SOFT=1` добија се крутост која је за један или два реда величине већа у односу на `SOFT=0`. Опција `SOFT=1` се препоручује код анализе удара два различита материјала [7].

Опција `SOFT=2` користи временски корак као и у случају `SOFT=1`. Овде се користи контактни алгоритам који се заснива на сегментима, а који потиче од *pinball* контакта који је развио Belytschko [8]. У овом алгоритму узима се контакт између сегмената, за разлику од уобичајене анализе контакта чворови-сегмент. Када два четворочворна елемента дођу у контакт, сила продирања се примењује на осам чворова, што је много реалније и ефектније код многих контактних проблема [6]. Контакт греда не ради са `SOFT=2` опцијом. Даље, овај тип контакта је доступан само за *surface-to-surface* и *single surface* контакт, али не и за *nodes-to-surface* контакт.

3.2.3. Типови контакта коришћени у анализи

Као што је већ речено, LS-DYNA садржи велики број развијених и имплементираних алгоритама за симулацију контакта, али због концизности рада, овде ће бити описани само они контакти који су коришћени у анализи модела. У анализи судара може доћи до појава великих деформација, и веома је тешко проценити место где ће се контакт остварити. Према [5], препоручује се *automatic* контакт, код кога се не дефинише оријентација елемента. Међутим код аутоматског дефинисања контакта, постоје нека ограничења која могу угрозити тачност анализе. Типови контакта који су коришћени у анализи су:

`*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`

Овај тип контакта омогућава преношење силе притиска између чворова *slave* и *master* сегмента. Тангенцијална оптерећења се такође преносе ако се догоди релативно клизање, када је контактано трење активно. Трење клизања заснива се на Кулоновој формулацији са експоненцијалном интерполацијском функцијом за прелазак из

статичког у динамичко трење. Овај прелаз захтева да се дефинишу коефицијенти статичког и динамичког трења.

Потпрограма овог контакта проверава продирање *slave* чворова у *master* сегмент, а затим се позива поново и проверава продирања *master* чворова у *slave* сегмент. У овом случају није битно који смо сегмент дефинисали као *master*, а који као *slave*, пошто је процес симетричан [5]. Време рачунања у овом случају готово је двоструко веће, што је последица поновног позивања потпрограма.

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE

Код овог типа контакта, *slave* чворови су ограничени да се крећу са *master* површином. На почетку симулације, налази се најближи *master* сегмент за сваки *slave* чвор на основу ортогоналне пројекције *slave* чвора на *master* сегмент [7].

Ако је *slave* чвор много близу *master* сегменту, на основу утврђених критеријума, онда се *slave* чвор помера на *master* површину. На тај начин се може почетна геометрија мало изменити без позивања на било какву појаву напона.

Према [6] препоручује се да везани (*tied*) контакти не буду дефинисани преко PART ID већ преко команди node/segment set. Овај тип контакта углавном треба користити само са 3D елементима, јер степени ротације *slave* чворова нису ограничени. Употреба овог типа контакта за елементе љуске може произвести нереално меко понашање.

Уопште, када се користи *tied* контакт између сличних материјала, онда *master* сегмент мора имати грубљу мрежу. Међутим, ако је један материјал знатно мекши, онда ће *master* бити најтврђи материјал.

Подела у оквиру *tied* контакта је извршена на основу степена слободе, затим да ли је укључен *offset* или не, да ли је дефинисан критеријум лома итд. На пример, ако је ограничена само транслација, без дефинисаног *offset* и критеријума лома (*failure*), онда такав тип контакта можемо користити код 3D елемента, пошто ти елементи немају ротацију. Код овог типа контакта позиција *slave* чворова у односу на *master* сегмент се одржава константном на основу кинематских једначина [5]. Уколико је дефинисан критеријум лома, такав контакт се може користити за моделирање заварених спојева.

3.2.4. Излазни фајлови контакта

Постоје бројни излазни фајлови који се могу записати од стране LS-DYNA софтвера. Најчешће коришћени излазни фајл код анализе контакта је **RCFORC**, који се креира активирањем картице *DATABASE_RCFORC. У улазној датотеци RCFORC је ASCII датотека која садржи резултујућу силу контакта за *slave* и *master* стране сваког контакта. Сила се записује у глобалном координатном систему. Треба нагласити да се ова команда не користи у случају *single-surface* контакта. Поред овог излаза, командом *DATABASE_NCFORC генерише се **NCFORC** ASCII излазна датотека, у коју се записује сила у сваком чвору.

3.2.5. Параметри контакта

Постоје бројни параметри контакта у LS-DYNA софтверу, који се могу поставити како би се модификовало, односно у многим случајевима побољшало понашање контакта. Многи параметри се користе са својим предефинисаним вредностима, али често је потребно додатно подесити параметре како би се постигло одговарајуће понашање контакта. У овом делу обрађени су неки од параметара, где су дате и препоруке за њихово подешавање.

Параметри контакта се могу подешавати коришћењем картица *CONTROL_CONTACT, *CONTACT и *PART_CONTACT. У команди *CONTROL_CONTACT дефинишу се све препоручене вредности параметара контакта и оне важе за све контакте у датом примеру. Параметри дефинисани у команди *CONTACT ће редефинисати предефинисане вредности које се односе на индивидуални контакт. На крају у картици *PART_CONTACT дефинишу се параметри који се односе на одређени део у контакту.

Thickness Offset. Параметар који се односи на *offset* је SHLTHK, и може се подешавати у картици *CONTACT_(option), Слика 3.2.2.

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window. At the top, there are buttons: 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The main area displays the keyword '*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE(ID/TITLE/MPP)(THERMAL) (0)'. Below this, there are two rows of parameters. The first row (ID 9) includes SOFT, SOFSC, LCIDAR, MAXPAR, SBOPT, DEPTH, BSORT, and FRCFRQ. The second row (ID 10) includes PENMAX, THKOPT, SHLTHK, ENLOG, ISYM, ID3D, SLDTHK, and SLDSTF. The SHLTHK parameter is highlighted with a red box. At the bottom, there is a summary line: 'Total Card: 0 Smallest ID: 0 Largest ID: 0 Total deleted card: 0'.

Слика 3.2.2 Подешавање *offset* параметра

Када се у контакту налазе елементи љуске, *offset* служи за пројектовање средње површине љуске да би се формирала површина контакта. Ако је SHLTHK=0, користи се инкрементална техника за одређивање најближег *master* сегмента и *offset* није укључен. Ако је SHLTHK=1 онда се узима *offset* само деформабилних делова али не и код крутих тела. У случају SHLTHK=2, *offset* је укључен и за деформабилна и за крута тела. У последња два случаја, користи се *bucket* техника идентификовања контактеног пара. Када се успостави контакт, онда се користи инкрементална техника за одређивање позиције *slave* чвора на *master* површини. Предност ове технике је што *master* и *slave* могу бити раздвојени. Код инкременталне технике, полази се од претпоставке да су *master* и *slave* већ у пуном контакту. *Automatic* и *single surface* контакт обавезно узимају у обзир *offset*. Аутоматски тип контакта је бољи и због чињенице да нема захтеве у смислу оријентације нормале елемената у контакту, за разлику од неаутоматских контакта.

Трење клизања у контакту. Заснива се на Кулоновој формулацији и користи еквивалентне еласто-пластичне опруге. Трење клизања се узима у обзир постављањем статичког и динамичког коефицијента трења, који се налазе у картици

*CONTACT_(option), Слика 3.2.3. Често се статички и динамички коефицијент трења код анализе судара, подешавају тако да имају исту вредност.

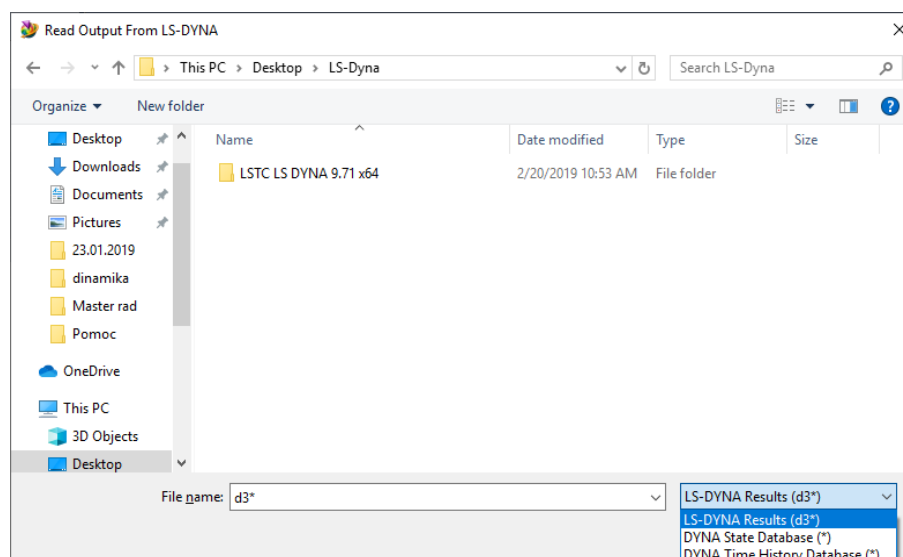
ID	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.0E+20
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	1.0	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0

Слика 3.2.3 Подешавање статичког и динамичког коефицијента трења

У картици *CONTROL_CONTACT може се активирати команда FRCENG, у циљу записивања енергије трења контакта у бинарну базу (*DATABASE_BINARY_INTFOR). Препорука је да се параметри трења задају у картицама *PART_CONTACT, односно посебно за сваки део.

3.3. Компатибилност софтвера LS-DYNA и FEMAP

Софтвер за пре и пост процесирање FEMAP v12.0 је компатибилан са софтвером LS-DYNA. Међутим та компатибилност има одређена ограничења. Избором опције **File>Import>Analysis Model...** у FEMAP окружењу, могуће је учитати само резултате анализе, односно следећи тип датотека: **LS-DYNA3D Results (d3*)**, **DYNA State Database (*)** и **DYNA Time History Database (*)**, Слика 3.3.1.



Слика 3.3.1 Учитавање излазних фајлова LS-DYNA у FEMAP

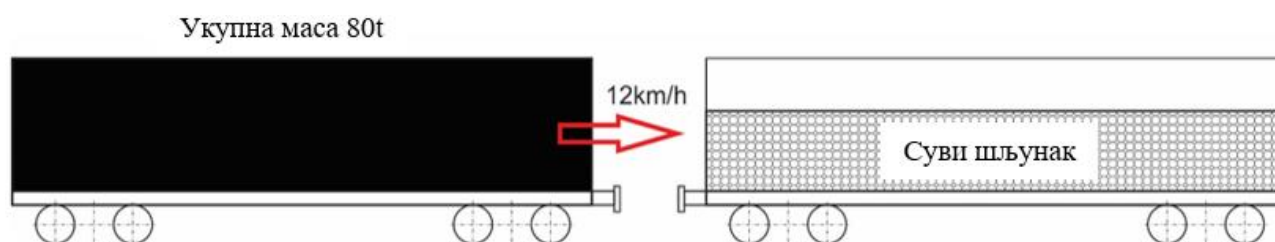
У FEMAP-у није могуће учитати улазну датотеку за LS-DYNA-у, која има екстензију ***.dyn**, ***.d**, ***.k**, ***.key**. Уколико се покуша, FEMAP ће избацити грешку и прекинуће учитавање.

4. Примена софтвера за анализу налетања вагона

Пошто смо се упознали са основним карактеристикама софтвера и са структуром улазне датотеке у претходном одељку, прелазимо на конкретан пример примене софтвера LS-DYNA-е. Овде је дат пример налетања вагона, на којем ће бити описана структура улазне датотеке, затим картице које се користе за подешавање анализе, као и параметри који у њима фигуришу.

4.1. Поставка анализе модела

У овом раду извршена је симулација удара покретног вагона укупне масе 80t и брзине 12km/h у непокретни вагон напуњен сувим шљунком. Шема модела је приказана на Слици 4.1.1.



Слика 4.1.1 Шема модела

Тежина празног и оптерећеног непокретног вагона дата је у Табели 4.1.1.

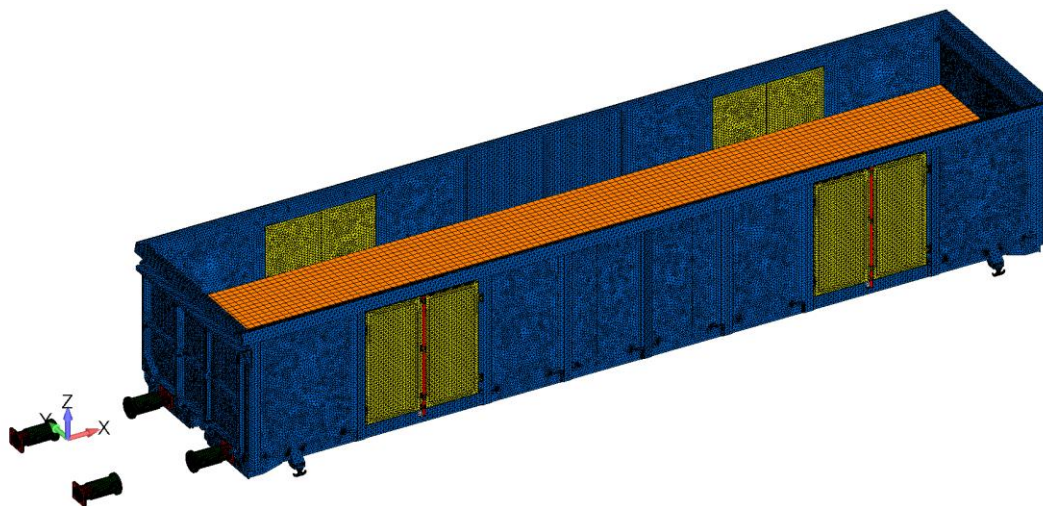
Табела 4.1.1 Тежина вагона са и без терета

Случајеви оптерећења	Маса [t]
Празан вагон	22
Вагон напуњен са сувим шљунком	80

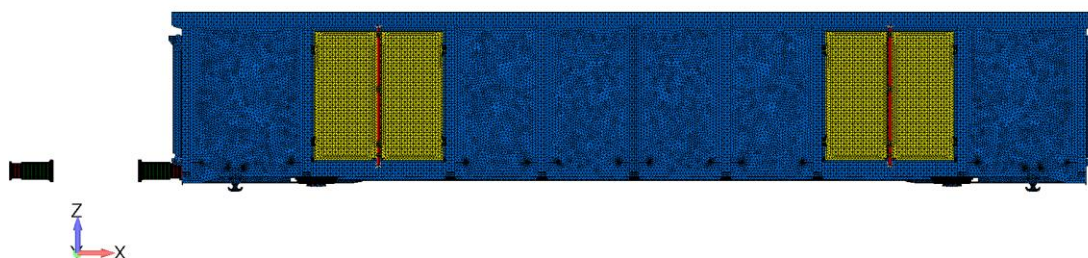
4.2. Симулација налетања вагона. Подешавање улазне датотеке LS-DYNA-е

У овом делу приказан је поступак подешавања картица улазне датотеке за анализу налетања вагона. Вагон масе 80t који удара у непомицни вагон, апроксимиран је одбојником. Време трајања симулације је 0.35 секунди.

Полазимо од модела (Model_3D.modfem), односно мреже коначних елемената која је креирана у софтверу FEMAP v12.0 [9]. Мрежа 3D коначних елемената вагона приказана је на Сликама 4.2.1 и 4.2.2. Цео модел се састоји од 370618 чворова, 875604 тетраедарских коначних елемената без међучворова, 60336 хексаедарских осмочворних коначних елемената, 1574 гредних коначних елемената и 240 коначних елемената опруге. Због симетричности модела у односу на раван XZ, за анализу удара у LS-DYNA-и користићемо половину модела.



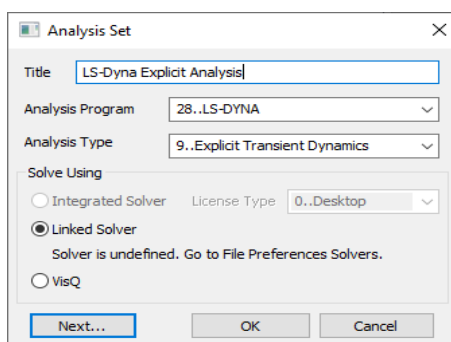
Слика 4.2.1 Мрежа 3D коначних елемената вагона, изометријски поглед



Слика 4.2.2 Мрежа 3D коначних елемената вагона, ZX поглед

4.3. Учитавање геометрије у LS-PrePost

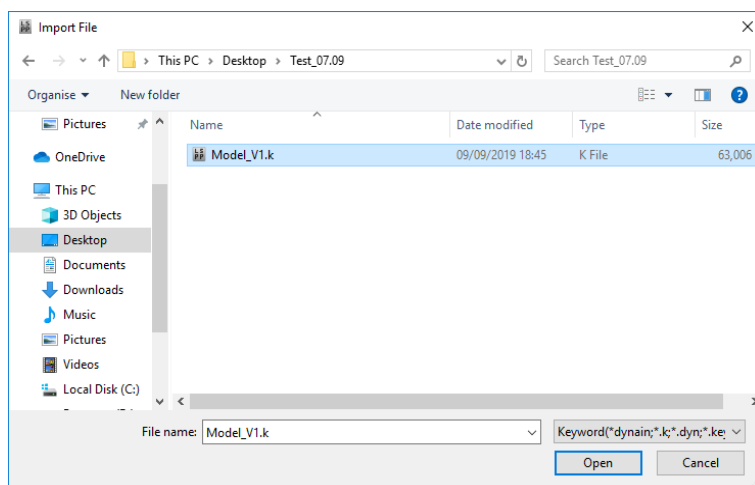
Након припреме геометрије у софтверу FEMAP v12.0, потребно је извести улазну датотеку за LS-DYNA-у. Применом команде **Model>Analysis>New...**, у FEMAP окружењу, отвара се прозор као на Слици 4.3.1, где је потребно у оквиру **Analysis Program** изабрати LS-DYNA, а у делу **Analysis Type** изабрати **Explicit Transient Dynamics**.



Слика 4.3.1 Припрема улазне датотеке за LS-DYNA-у

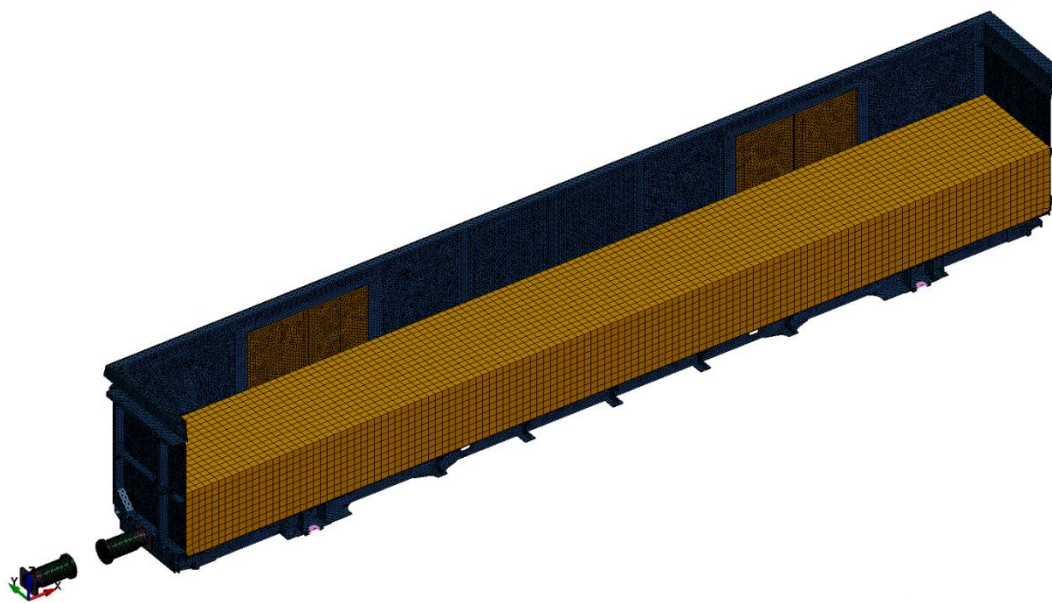
Одабиром команде **ОК**, па затим **Export**, отвара се прозор у коме је потребно изабрати директоријум где ће улазна датотека LS-DYNA-е бити сачувана.

Стартовањем LS-PrePost-а [10] и применом команде **File>Import>LS DYNA Keyword File**, отвара се прозор приказан на Слици 4.3.2, у коме је потребно изабрати излазну датотеку из FEMAP-а.



Слика 4.3.2 Учитавање модела у LS-PrePost

Након учитавања датотеке, на Слици 4.3.3 дат је приказ модела у LS-PrePost-у.

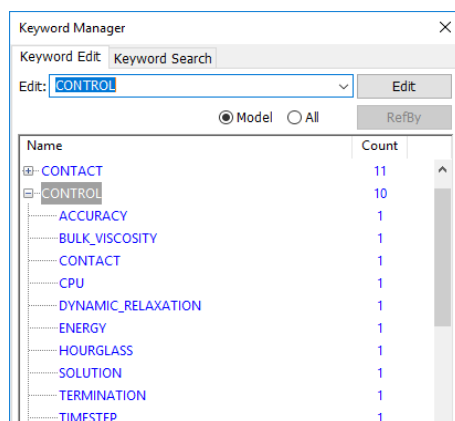


Слика 4.3.3 Модел вагона у LS-PrePost-у

4.4. Дефинисање контроле анализе и излазних параметара

Улазна датотека се може креирати произвољним редом, али ми ћемо овде картице подешавати према блоковима дефинисаним у одељку 3.1. У првом делу је потребно подесити картице за контролу анализе, са циљем задавања времена трајања анализе, временског корака итд. Поред тога, овде се задају и картице које дефинишу записивање резултата у излазним фајловима, где је потребно подесити интервал записивања

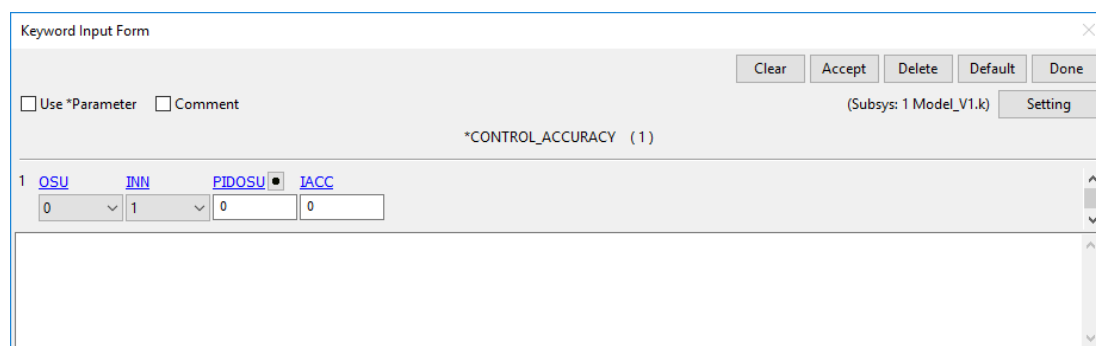
результата, величине које ће бити записане у излазном фајлу итд. У оквиру **Keyword** формата, потребно је изабрати картицу *CONTROL_(option), а затим унутар ње дефинисати одговарајуће картице за контролу анализе, Слика 4.4.1.



Слика 4.4.1 Картице за подешавање контроле анализе

CONTROL_ACCURACY

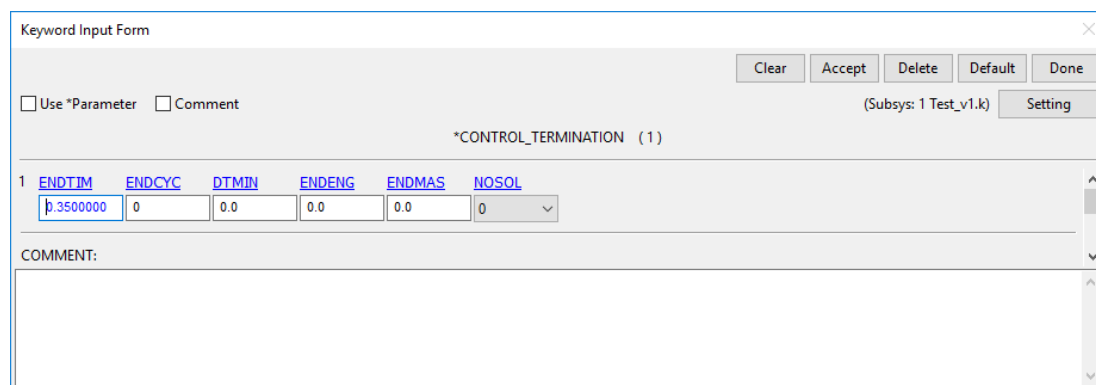
Овом картицом дефинише се прецизност прорачуна. Параметре у овој картици је потребно подесити као на Слици 4.4.2.



Слика 4.4.2 Подешавање прецизности прорачуна

*CONTROL_TERMINATION

У овој картици потребно је дефинисати време трајања анализе постављањем вредности параметра ENDTIM. У овом случају дужина трајања симулације је 0.35 секунди. На Слици 4.4.3 је приказана картица са дефинисаним параметрима.



Слика 4.4.3 Подешавање времена завршетка анализе

Након постављања времена трајања симулације, потребно је дефинисати временски корак. У оквиру **Keyword** отварамо картицу *CONTROL_TIMESTEP. Прва променљива, DTINIT представља задати временски корак. Уколико је 0, програм сам бира временски корак према алгоритму описаном у одељку 2.4. Величина SCFT преставља фактор множења, који је по предефинисаној вредности 0.9. На Слици 4.4.4, приказана је картица са подешеним параметрима.

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

(Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTROL_TIMESTEP (1)

1	DTINIT	TSSFAC	ISDO	TSLIMIT	DT2MS	LCTM	ERODE	MS1ST
	0	0.9000000	0	0.0	0.0	0	0	0
2	DT2MSF	DT2MSLC	IMSCL	UNUSED	UNUSED	RMSCL		
	0.0	0	0	0	0	0.0		

DTINIT:=Initial time step size:
EQ.0.0: LS-DYNA determines initial step size (default).

Слика 4.4.4 Подешавање временског корака анализе

*CONTROL_HOURLASS

Постоје две променљиве у овој картици које имају предефинисане вредности. Уколико је $INHQ < 4$ користи се вискозна форма која се базира на Belytschko-Tsay формулацији за елементе љуске.

Уколико је $INHQ = 4, 5$ или 6 , онда се ради о *stiffness* формулацији. Препоручује се да се за веће брзине користи вискозна форма, а за мање *stiffness* форма. Све препоруке се односе на велике деформације. У нашем моделу коришћена је *stiffness* форма, где је $INHQ = 5$, Слика 4.4.5.

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

(Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTROL_HOURLASS (1)

1	INHQ	QH
	5	0.1000000

Слика 4.4.5 Подешавање типа формулације

*CONTROL_BULK_VISCOSITY

У овој картици дефинишу се квадратни и линеарни коефицијент вискозности. Команда се користи у анализи ударних таласа. На Слици 4.4.6 дат је приказ картице са постављеним предефинисаним вредностима параметра, који се рачунају према обрасцима датим на страни 7.12 [6].

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

(Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTROL_HOURLASS (1)

	HQ	OH
1	1	0.1000000

Слика 4.4.6 Дефинисање линеарних и квадратних коефицијената вискозности

*CONTROL_CONTACT

У картици приказаној на Слици 4.4.7, потребно је подесити параметре контакта. Сви параметри задржавају своје предефинисане вредности у овој анализи. SLSFAC је параметар којим се дефинише фактор скалирања клизања код продирања. Параметар ISLCHK се поставља када се жели провера иницијалног продирања. Уколико се појави продирање, записује се у излазном фајлу. У посматраном примеру, овај параметар има вредност 1, што значи да нема провере.

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

(Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTROL_CONTACT (1)

	SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN	ENMASS
1	1.1000000	0.0	1	1	1	0	1	0
	USRSTR	USRFRS	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDT	TJEDPRJ
2	0	0	0	0	4.0000000	0	0	0

Слика 4.4.7 Подешавање параметара контакта

*CONTROL_ENERGY

Ова картица дефинише контролу енергије дисипације и величине свих параметара задржавају предефинисане вредности. Израчуната енергија дисипације се записује у ASCII датотеку GLSTAT. На Слици 4.4.8 је приказана картица са подешеним параметрима.

Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

(Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTROL_ENERGY (1)

	HGEN	RWEN
1	2	2

Слика 4.4.8 Контрола енергије дисипације

*CONTROL_CPU

Овом картицом ограничава се CPU време завршетка прорачуна. У овом примеру параметар CPUTIM има вредност 0, Слика 4.4.9 - што значи да нема ограничења времена.

Слика 4.4.9 Подешавање CPU времена трајања анализе

*CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION

Овом картицом дефинишемо динамичку релаксацију, односно слегање модела што је веома важно код иницијализације напона. Параметар IDRFLG је потребно поставити на 1, што значи да је динамичка релаксација активирана, Слика 4.4.10. Остале величине параметара у овој картици задржавају предефинисане вредности [5].

Слика 4.4.10 Подешавање динамичке релаксације

*DATABASE

У оквиру картице *DATABASE потребно је изабрати ASCII_option у којима је потребно селектовати тип података који ће бити записани у излазним бинарним датотекама, Слика 4.4.11. У овом примеру записују се датотеке DEFORC, GLSTAT, MATSUM, NCFORC и RCFORC, које садрже глобалне податке. Временски корак записивања резултата дефинише параметар DT који је у овом случају 0.001 секунди.

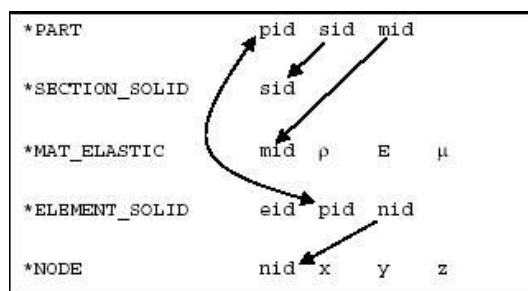
Слика 4.4.11 Дефинисање излазних фајлова

*DATABASE_BINARY_option

У овој картици се дефинишу типови бинарних излазних датотека које ће бити записане. На месту option потребно је дефинисати тип датотеке, које су у овом случају D3PLOT, DTHTDT и D3DRLF. Временски корак записивања резултата дефинише параметар DT који је у овом случају 0.001 секунди.

4.5. Дефинисање геометрије модела, мреже и материјала

На почетку овог одељка, дефинишемо геометрију модела у оквиру картице *PART, која је повезана са картицама за дефинисање материјала, типа коначних елемената. Структура овог блока приказана је на Слици 4.5.1.



Слика 4.5.1 Структура дела улазне датотеке у коме се дефинише мрежа

4.5.1. Дефинисање геометрије модела

*PART.

Ова картица садржи податке којима се позивају други атрибути тог дела као што су картице за дефинисање материјала и типа коначног елемента. Модел који је приказан на Слици 4.2.1 састоји се од укупно једанаест делова. У делу TITLE команде PART дефинише се назив дела. Као пример повезивања картица узет је део чији је ID=1, Слика 4.5.2.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*PART_(TITLE) (11)

1 TITLE
Vrata

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADPOPT TMID
1 1 3 0 0 0 0 0

Total Card: 11 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 Vrata
2 Vagon
3 Beam_D20
4 Beam_D40
5 Rod_D20_(sarke)
6 Rod_D40_(sarke)
7 Rod_300
8 Odbojnik_unutrasnji deo
9 Odbojnik_opruge
10 Odbojnik_kapa
11 Teret

PID

Називи делова

Слика 4.5.2 Дефинисање делова модела

Следи картица у којој се дефинише тип коначног елемента дела, картица *SECTION_{option}. На месту option дефинише се тип елемента. Прва променљива је SECID која одговара SECID величини у картици *PART и мора бити јединствен број, Слика 4.5.3. Сваки део је повезан са својим типом коначног елемента.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*SECTION_SOLID_(TITLE) (5)

TITLE
Vrata

1 SECID ELFORM AET
1 10 0

Total Card: 5 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 Vrata
2 Vagon
8 Odbojnik_unutrasnjost
10 Odbojnik_kapa
11 Teret

Слика 4.5.3 Дефинисање типа коначног елемента

У картици *MAT_option (где option представља различити тип материјала) дефинисани су параметри материјала, а величина MID мора одговарати истој у картици *PART, Слика 4.5.4.

Keyword Input Form

NewID Draw MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
Vagon

1 MID RO E PR SIGY ETAN FAIL TDEL
1 7.830e-09 2.068e+05 0.2900000 350.00000 0.0 0.5640000 0.0

2 C P LCSS LCSR VP
2 0.0 0.0 2 0 0.0

Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

3 Vagon

Слика 4.5.4 Дефинисање материјала

У картици *ELEMENT_option дефинисани су елементи који одговарају делу. Веза између картица *PART и *ELEMENT_option је остварена преко величине PID у картици *ELEMENT_option, Слика 4.5.5.

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*ELEMENT_SOLID (10968)

1 EID PID N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8
1 438381 8 146217 146088 146089 146090 144868 144739 144740 144741

Total Card: 10968 Smallest ID: 438381 Largest ID: 449348 Total deleted card: 0

438381_438486
438487_438592
438593_438698
438699_438804
438805_438910
438911_439016
439017_439122
439123_439228
439229_439334
439335_439440

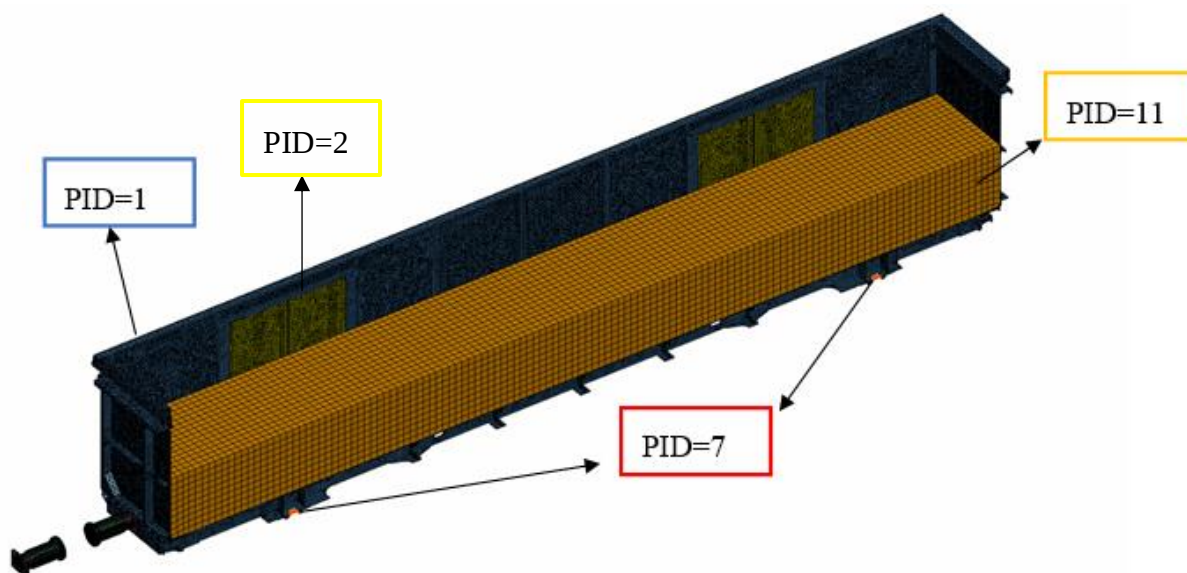
Слика 4.5.5 Дефинисање елемената

Сваки елемент унутар *ELEMENT_option има свој јединствени број EID. Променљива NID у картици *ELEMENT_option позива картицу *NODE, где су дефинисани чворови који припадају елементу.

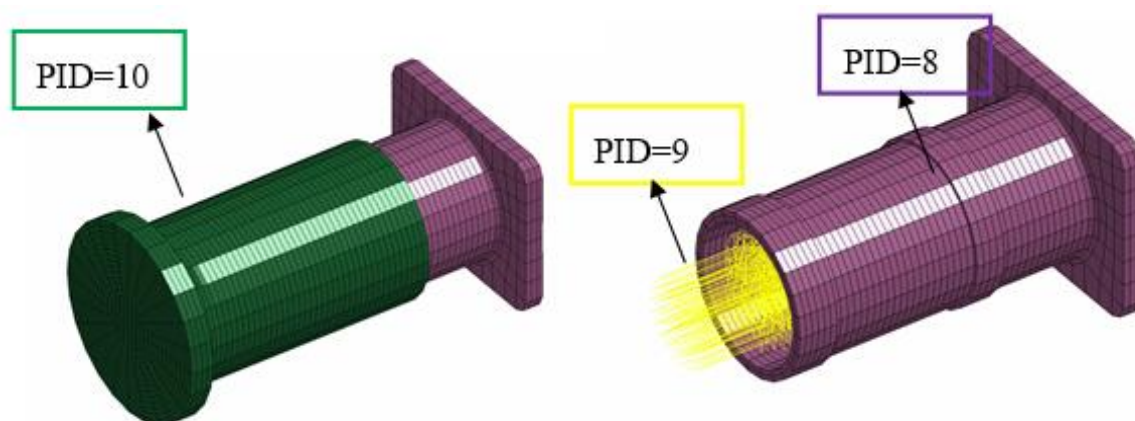
Делови са бројем PID-а 1 и 2 моделирани су са тетраедарским четворочворним коначним елементима, делови са редним бројем PID-а 8, 10 и 11 са хексаедарским осмочворним коначним елементима.

Делови са PID-ом од 3-7 моделирани су са гредним коначним елементима, а са бројем 10 моделиране су опруге одбојника.

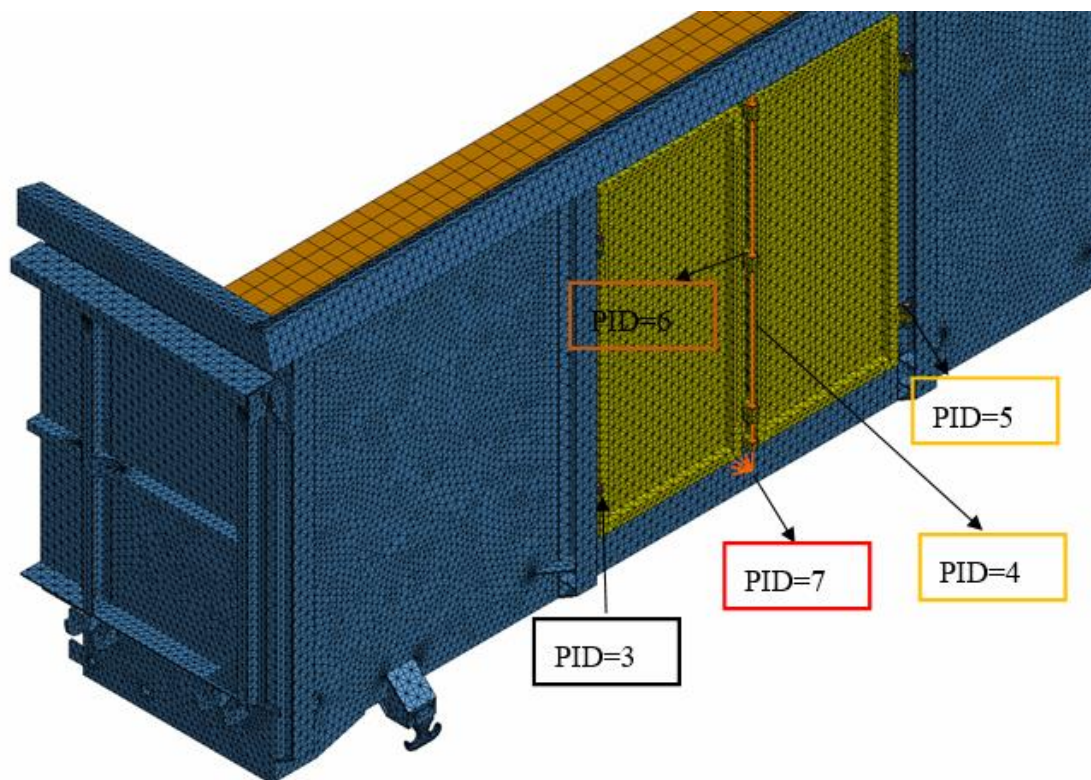
На Сликама од 4.5.6 до 4.5.8 су приказани делови модела са назначеним PID-ом, у складу са називима на Слици 4.5.2.



Слика 4.5.6 Приказ вагона са назначеним деловима (изометријски приказ)



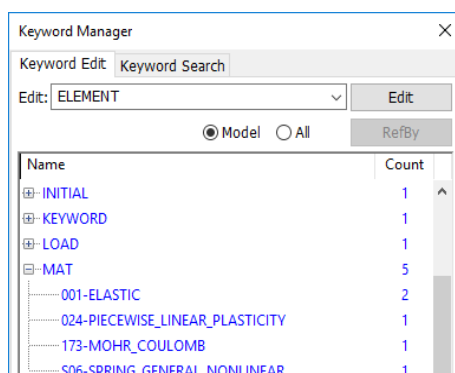
Слика 4.5.7 Приказ одбојника са назначеним деловима



Слика 4.5.8 Приказ модела са назначеним деловима

4.5.2. Дефинисање материјала

У циљу креирања материјала, потребно је отворити картицу *МАТ у којој је потребно изабрати одговарајући тип материјалног модела, а затим поставити параметре материјала. У овом примеру коришћена су четири типа материјалних модела, Слика 4.5.9.



Слика 4.5.9 Типови материјала коришћених у анализи

*MAT_ELASTIC

У оквиру ове картице дефинише се еластични материјал гредних коначних елемената у моделу. Као што се у примеру може видети на Слици 4.5.10, за овај модел дефинисана је густина, Јангов модул еластичности и Поасонов коефицијент.

Слика 4.5.10 Материјал гредних коначних елемената, материјал ID=1

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

Овом картицом дефинише се еласто-пластични материјал коме се може дефинисати произвољна крива зависности напон-деформација у области пластичности, односно произвољан коефицијент деформације.

Као што се у примеру може видети на Слици 4.5.11, за овај материјал поред густине, Јанговог модула еластичности, Поасоновог коефицијента и напона течења, дефинисана је и крива течења у области пластичности.

Карактеристике материјала којим су моделирани вагон и одбојник преузети су из литературе [11] и приказане су у Табели 4.5.1.

Табела 4.5.1 Материјал вагона и одбојника; материјал ID=3

Јангов модул еластичности	2.068E+05 MPa
Поасонов коефицијент	0.29
Напон течења	350 MPa
Густина материјала	7.83E-09 [t/mm ³]
Карактеристике материјала у области пластичности	
Ефективна деформација	Ефективна вредност напона, [MPa]
0.000E+00	350
0.102E-01	381
0.490E-01	431
0.106E+00	459
0.206E+00	485
0.382E+00	505
0.502E+00	522
0.564E+00	527

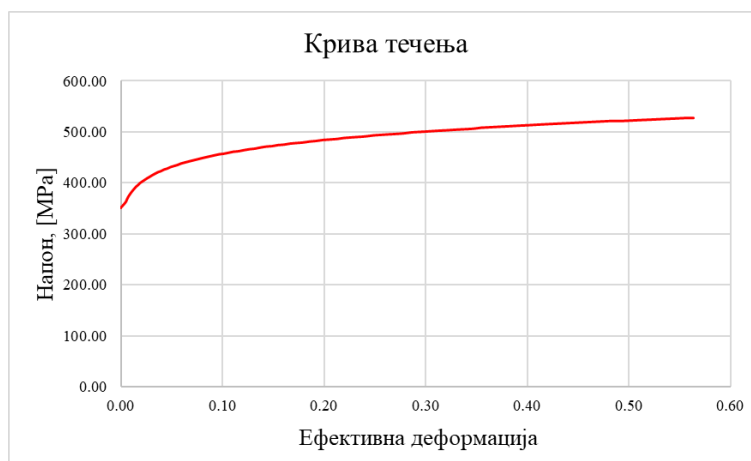
У оквиру LCSS дефинисан је ID криве која дефинише зависност ефективног напона од ефективне пластичне деформације. Преко LCSR може се дефинисати ID криве која одређује фактор множења напона течења.

Слика 4.5.11 Прозор за дефинисање материјала вагонске конструкције и одбојника; ID=2

Крива течења за посматрани материјал дефинисана је у картици *DEFINE_CURVE. У прозору приказаном на Слици 4.5.12, задаје се назив криве, а парове вредности из Табеле 4.5.1 је потребно унети у поља A1 и Q1. Јединствени број ове криве мора одговарати величини LCID у картици *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

Слика 4.5.12 Дефинисање функције криве течења у зони пластичности

Облик криве зависности напон-деформација у области пластичности за посматрани материјал дат је на Слици 4.5.13.



Слика 4.5.13 Крива зависности напон-деформација у области пластичности [11]

*MAT_MOHR_COULOMB

Модел грануларних материјала заснован је на *Mohr-Coulomb* материјалном моделу [11]. Карактеристике материјала којим је моделиран терет (у овом случају суви шљунак) преузете су из литературе [12] и дате су у Табели 4.5.2.

Табела 4.5.2 Материјалне карактеристике грануларних материјала

Грануларни материјал	E[MPa]	ν [-]	μ [-]	Ψ [°]	ϕ [°]	c[Pa]
Суви шљунак	6000	0.3	0.84	0	22	100

На Слици 4.5.14, приказана је картица за дефинисање материјала сувог шљунка, подешена према Табели 4.5.2.

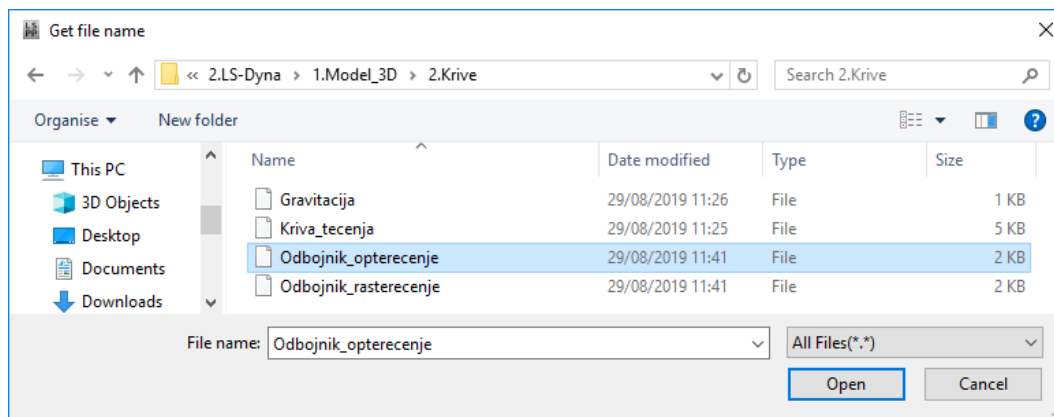
Слика 4.5.14 Прозор за дефинисање материјала терета; ID=3

MAT_SPRING_GENERAL_NONLINEAR

У оквиру ове картице дефинисан је материјал опруга одбојника. Потребно је у оквиру LCDL и LCDU поставити одговарајући ID криве оптерећења и растерећења одбојника респективно.

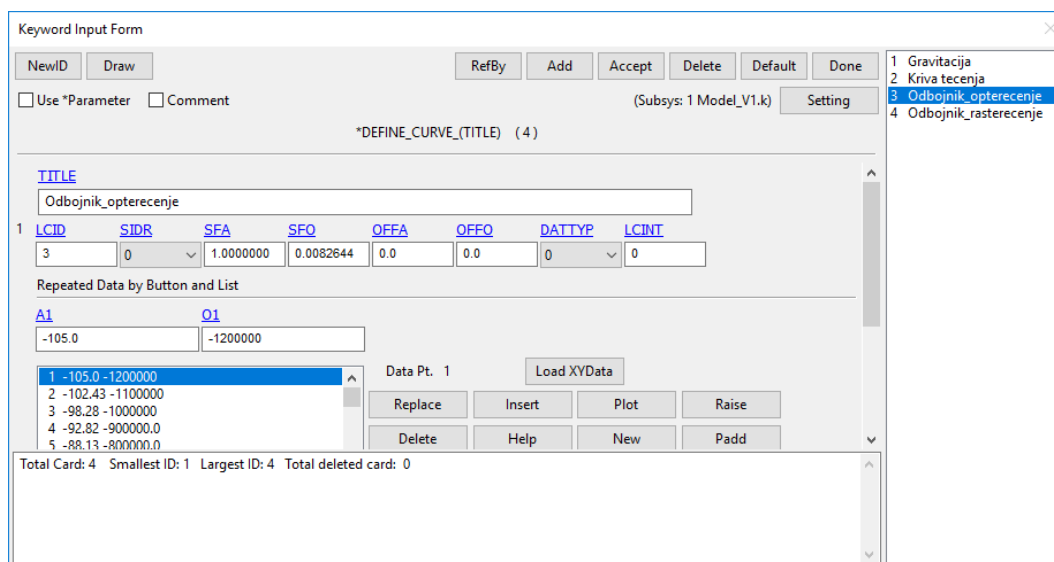
Слика 4.5.15 Прозор за дефинисање материјала опруга одбојника; ID=4

Криве оптерећења и растерећења одбојника дефинисане су у картици *DEFINE_CURVE. Користимо команду **Load XYData** у оквиру картице *DEFINE_CURVE, и бирамо одговарајући фајл са подацима, Слика 4.5.16.



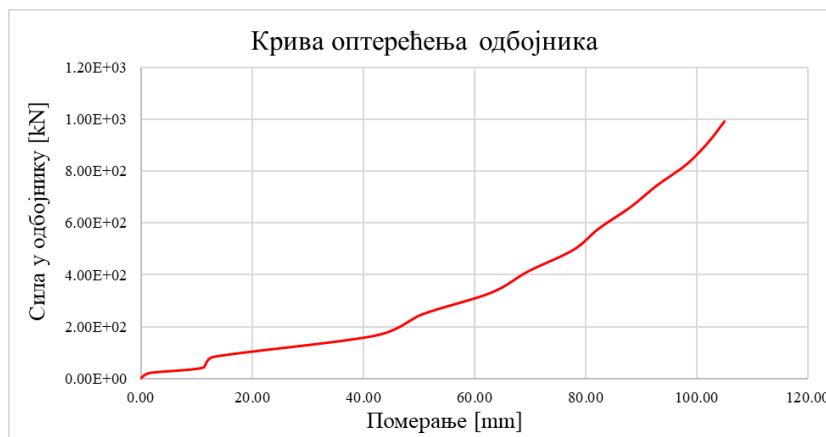
Слика 4.5.16 Учитавање података оптерећења одбојника

Овим поступком, учитани су подаци за креирање криве оптерећења одбојника, као што се може видети на Сlici 4.5.17.

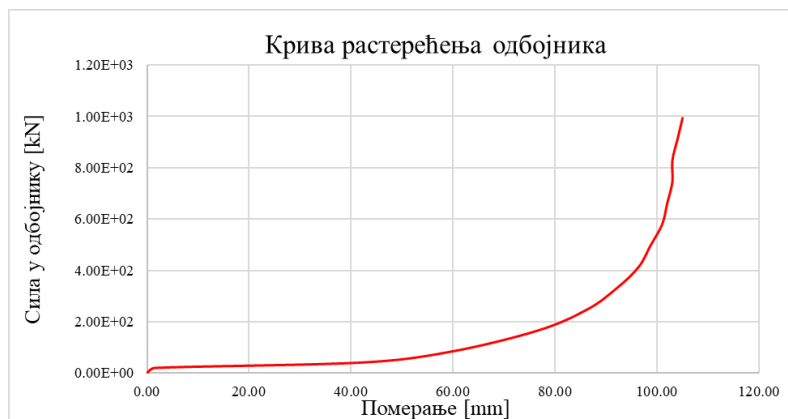


Слика 4.5.17 Дефинисање криве оптерећења одбојника

Аналогним поступком потребно је учитати податке и дефинисати криву растерећења одбојника. Облици креираних крива оптерећења и растерећења одбојника приказани су дијаграмима на Сликама 4.5.18 и 4.5.19, респективно.



Слика 4.5.18 Крива оптерећења одбојника



Слика 4.5.19 Крива растерећења одбојника

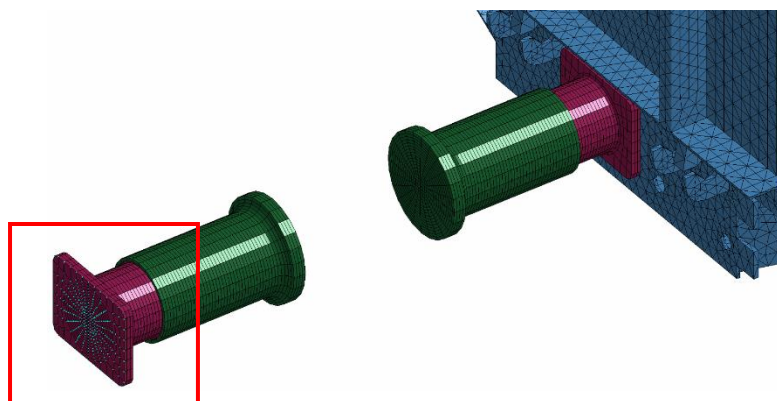
*NODE

У оквиру ове картице дефинисани су чворови коначних елемената у моделу. Као што се може видети на Сlici 4.5.20, унутар ове картице дефинисан је ID сваког чвора и три његове координате. У примеру има 185309 дефинисаних чворова.

Слика 4.5.20 Дефинисање координата чворова

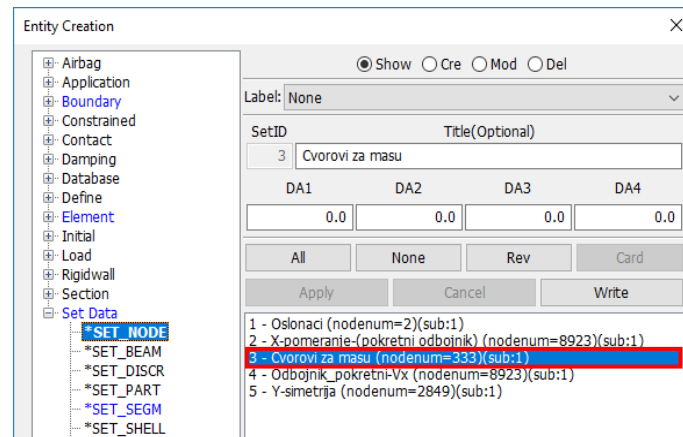
*ELEMENT_option

У оквиру картице *ELEMENT_option дефинисани су типови коначних елемената. Приликом учитавања модела из FEMAP-a, транслатор у LS-DYNA-и аутоматски генерише типове елемената. Међутим, оно што је додатно потребно поставити у овој картици је маса вагона од 40t, коју узимамо за чворове покретног одбојника. Задавање масе вагона се врши преко креиране групе у којој се налазе чворови означени на Сlici 4.5.21.



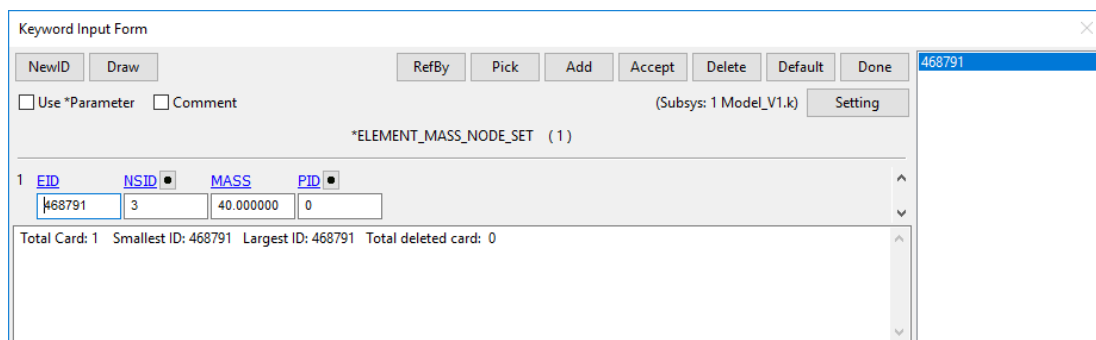
Слика 4.5.21 Приказ селектованих чворова за формирање групе

Креирамо групу чворова у оквиру **Entity Creation**, у картици *SET_NODE, селекујемо чворове и задајемо назив групе у делу TITLE (Optional), при чему свака група има јединствени број SetID, Слика 4.5.22.



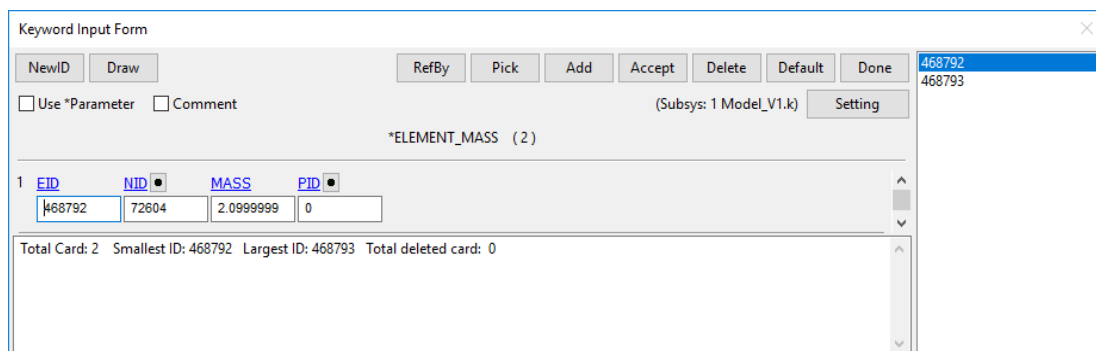
Слика 4.5.22 Креирање групе чворова за задавање масе

Формираној групи чворова (SetID=3), потребно је задати масу. Отварамо картицу *ELEMENT_MASS_NODE_SET и селекујемо ID креиране групе чворова у оквиру NSID, а затим постављамо параметар MASS на 40, Слика 4.5.23. Напоменимо да је због симетрије модела узета у обзир половина масе вагона, Табела 4.1.1.



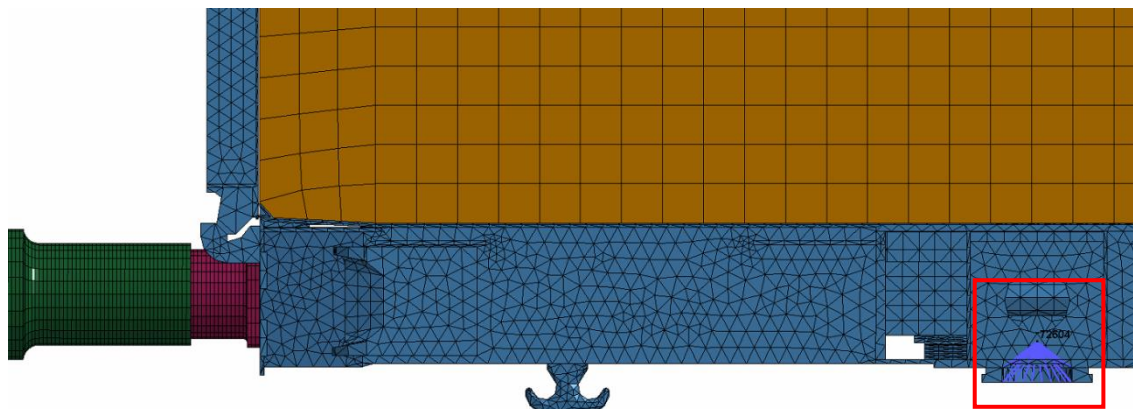
Слика 4.5.23 Задавање масе покретног вагона

У овом раду, креиран је вагон без обртних постоља, али при извршавању симулације налетања, потребно је њихову масу узети у обзир. Масу постоља задајемо у оквиру картице ELEMENT_MASS. У конкретном примеру, потребно је селекувати ID чворова 72604 и 144680 и поставити коефицијент MASS на 2,09, Слика 4.5.24.

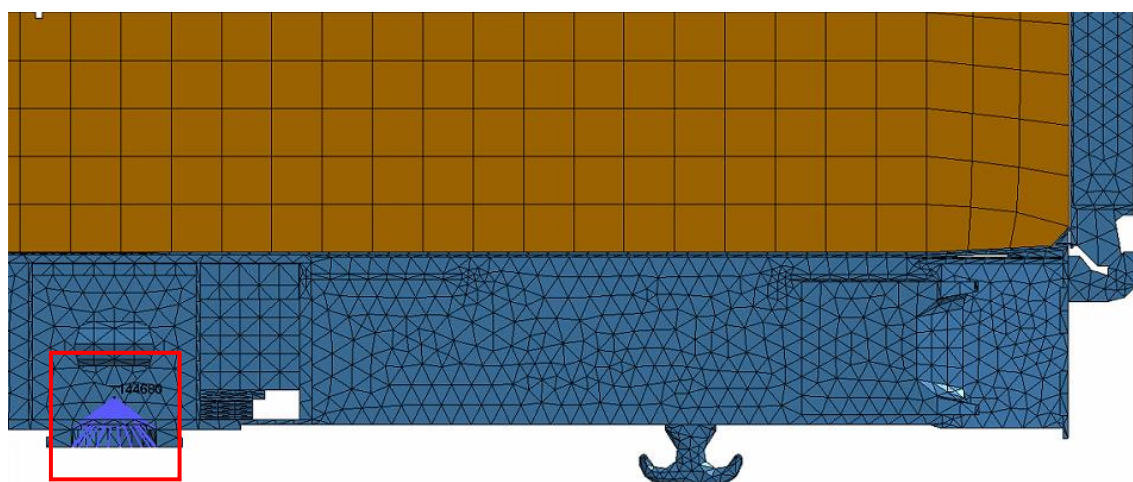


Слика 4.5.24 Задавање масе постоља

Позиције наведених чворова предњег и задњег ослонца у којим се задаје маса постоља приказане су на Сликама 4.5.25 и 4.5.26, респективно.



Слика 4.5.25 Позиција чвора предњег ослонца у коме се задаје маса постоља



Слика 4.5.26 Позиција чвора задњег ослонца у коме се задаје маса постоља

4.6. Дефинисање контакта

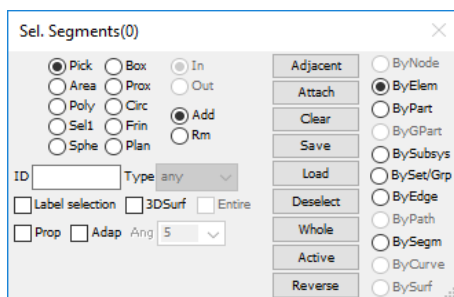
У овом примеру потребно је дефинисати укупно једанаест контаката. Према препорукама [5], [6], пожељно је код симулације налетања користити аутоматске контактне алгоритме. У оквиру картице *CONTACT, потребно је дефинисати типове контакта. У овом раду, коришћена су два типа контакта:

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE који се користи за дефинисање контакта унутар и између одбојника, као и за контакт између врата и конструкције вагона.

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE се користи за спојене делове, у овом случају за контакт између плоче непокретног одбојника и конструкције вагона.

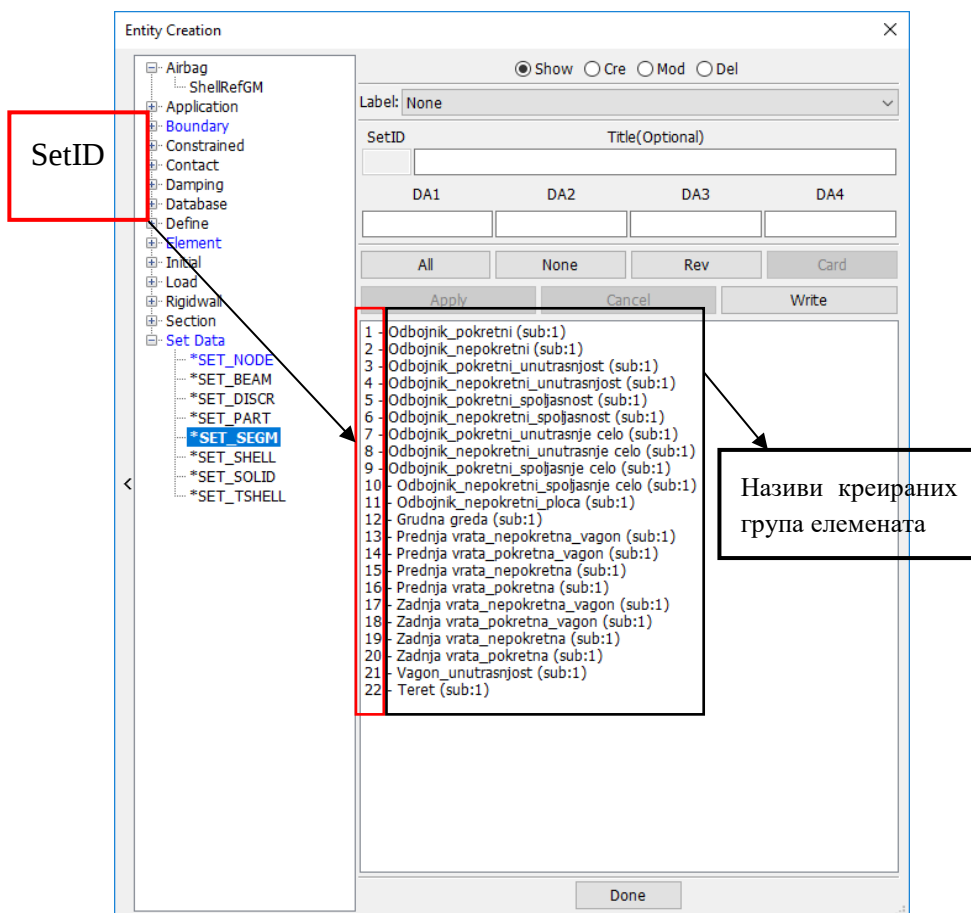
Да би поставили контакте између делова конструкције, неопходно је дефинисати контактне површине, односно креирати групе елемената који долазе у контакт. Креирање групе елемената се врши у оквиру **Entity Creation**, у картици *SET_SEGМ. Да бисмо креирали нову групу, потребно је кликнути на дугме Cre у картици **Entity**

Creation, након чега се отвара прозор као на Слици 4.6.1 у коме је потребно изабрати одговарајуће опције за одабир елемената који долазе у контакт.



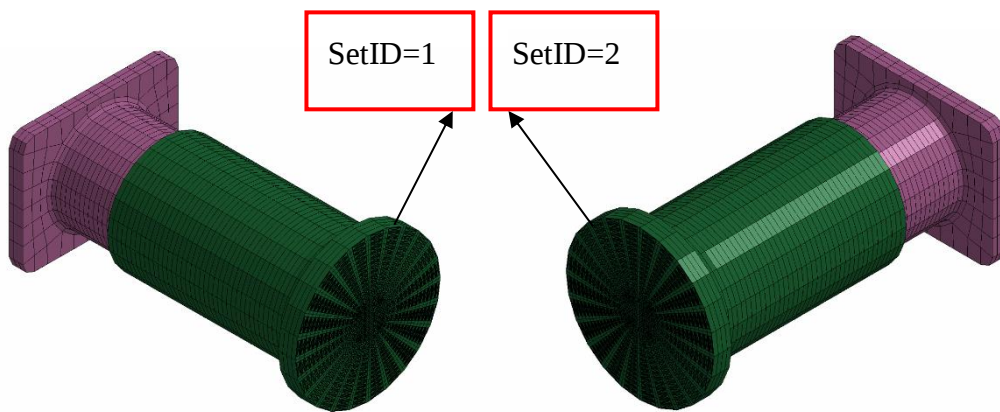
Слика 4.6.1 Прозор са опцијама за одабир елемената

Након одабира елемената, потребно је кликнути на опцију **Apply** у картици **Entity Creation**, након чега је формирана група. Свакој групи је потребно дати одговарајући назив у пољу Title (Optional) . Као што је приказано на Слици 4.6.2, дефинисане су укупно двадесет две контактне површине, од којих свака има јединствени број SetID, који мора одговарати *slave* (SSID) или *master* сегменту (MSID) у картици *CONTACT .

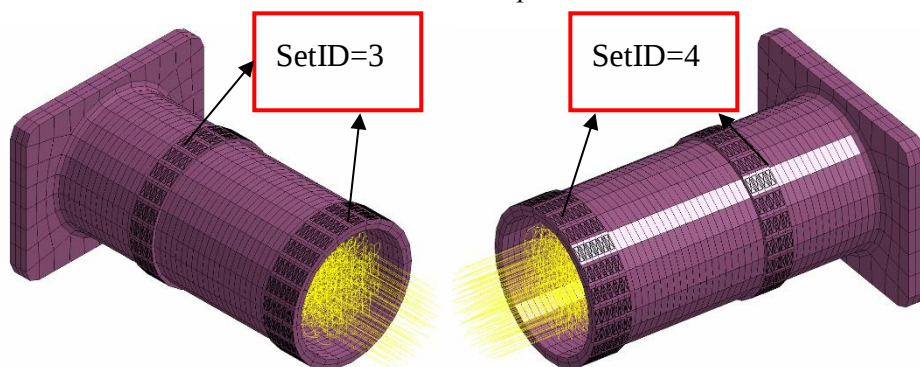


Слика 4.6.2 Дефинисање контактних парова

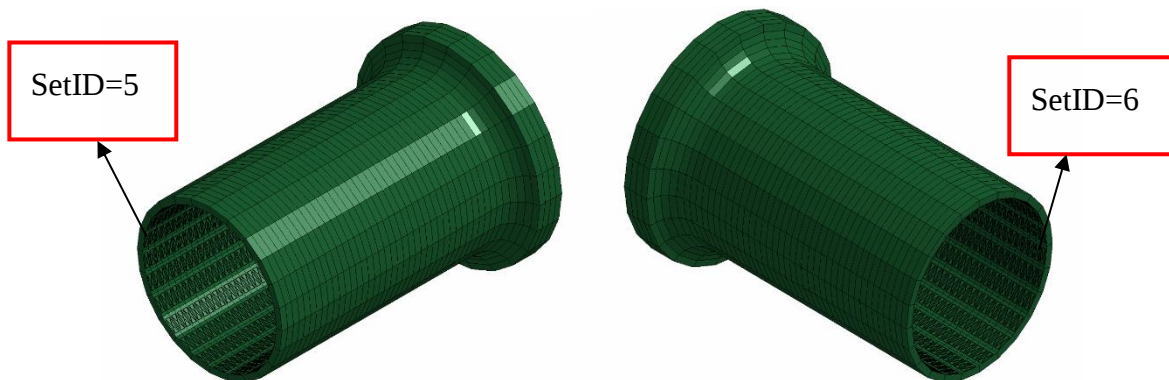
На Сликама 4.6.3 - 4.6.14 приказане су дефинисане контактне површине (означене црном бојом) са назначеним ID, у складу са називима група елемената приказаним на Слици 4.6.2.



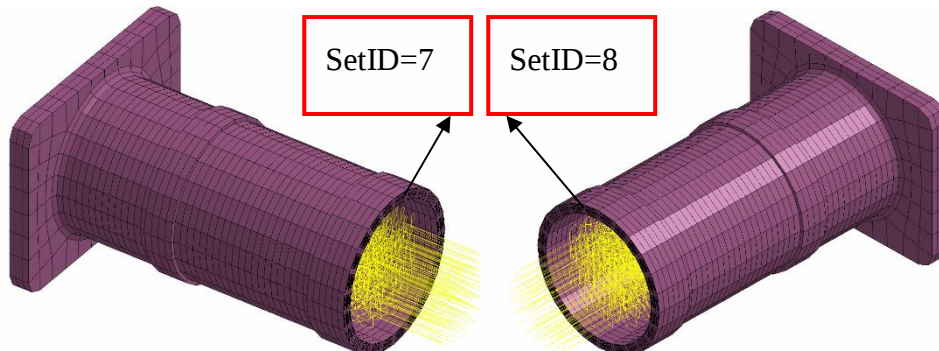
Слика 4.6.3 Контактна површина SetID=1,2



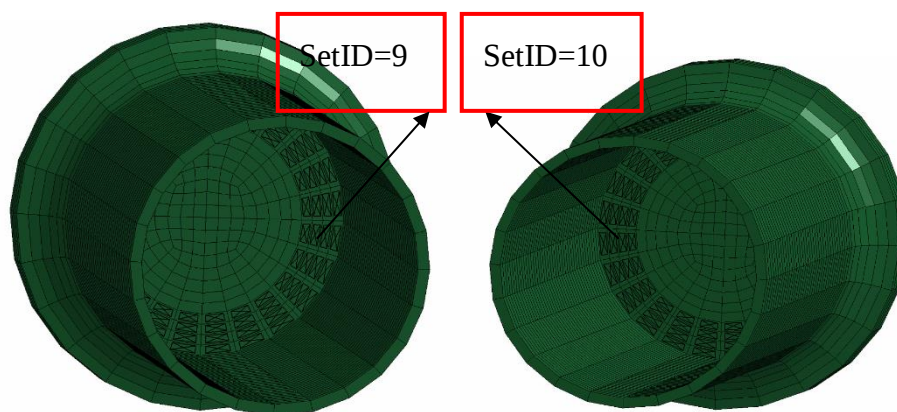
Слика 4.6.4 Контактна површина SetID=3,4



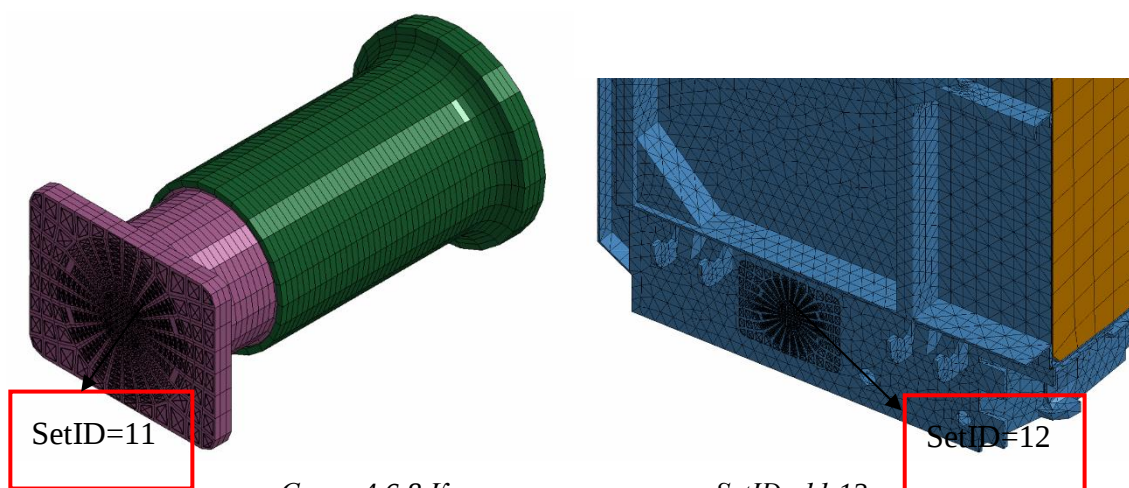
Слика 4.6.5 Контактна површина SetID=5,6



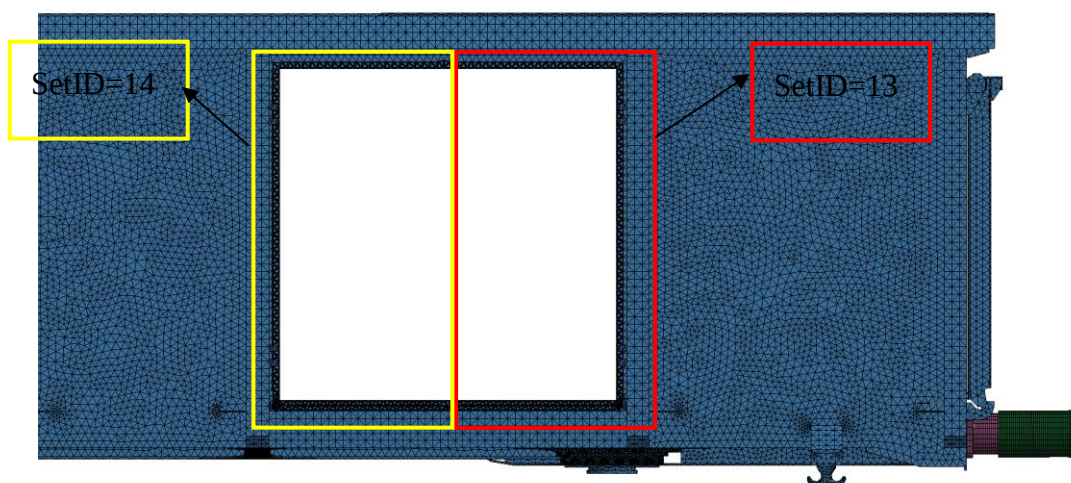
Слика 4.6.6 Контактна површина SetID=7,8



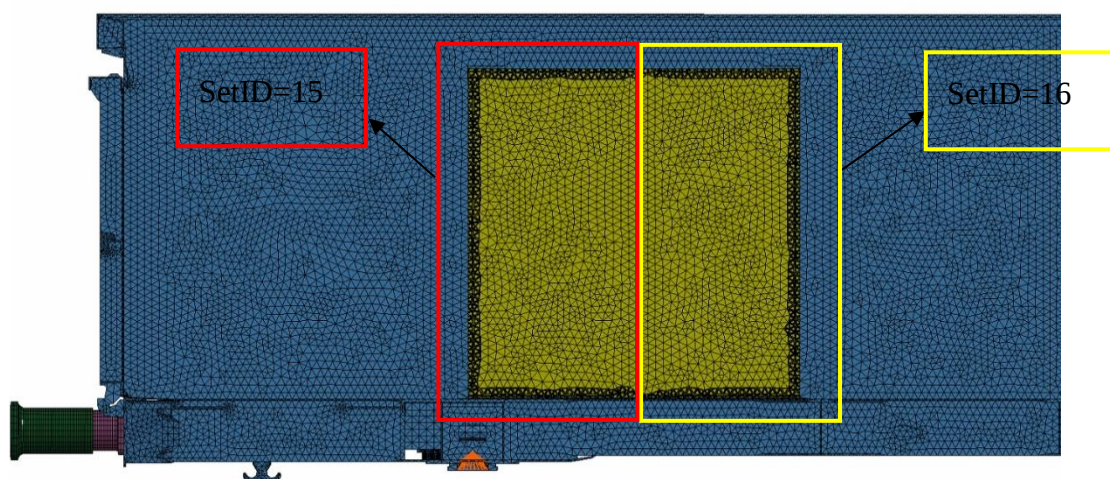
Слика 4.6.7 Контактна површина SetID=9,10



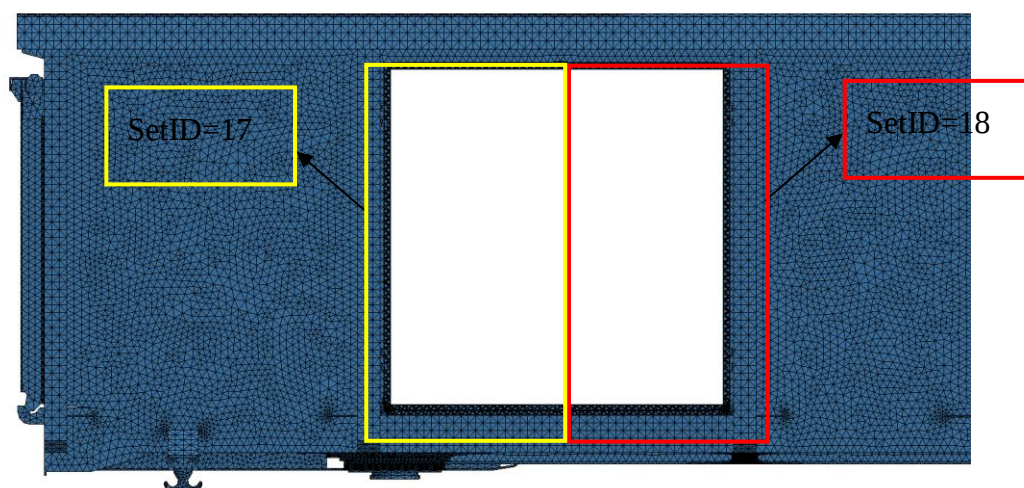
Слика 4.6.8 Контактна површина SetID=11,12



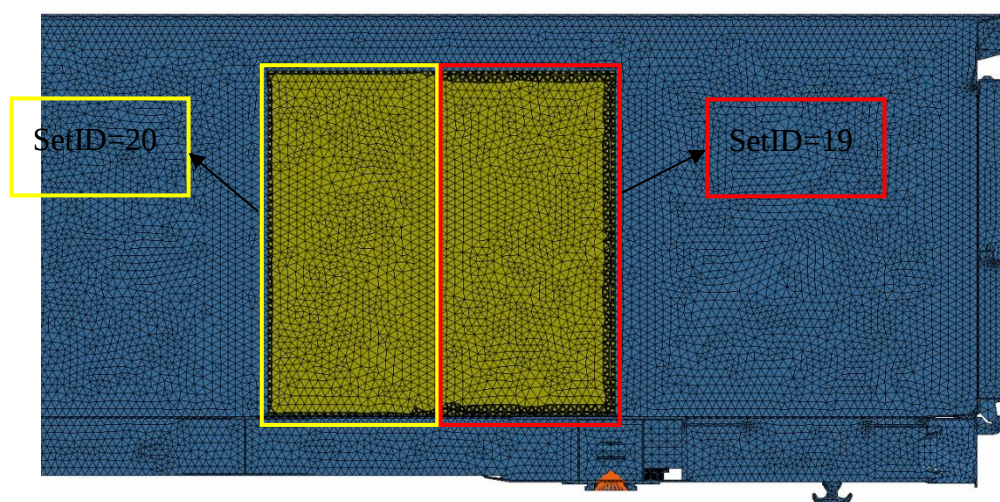
Слика 4.6.9 Контактна површина SetID=13,14



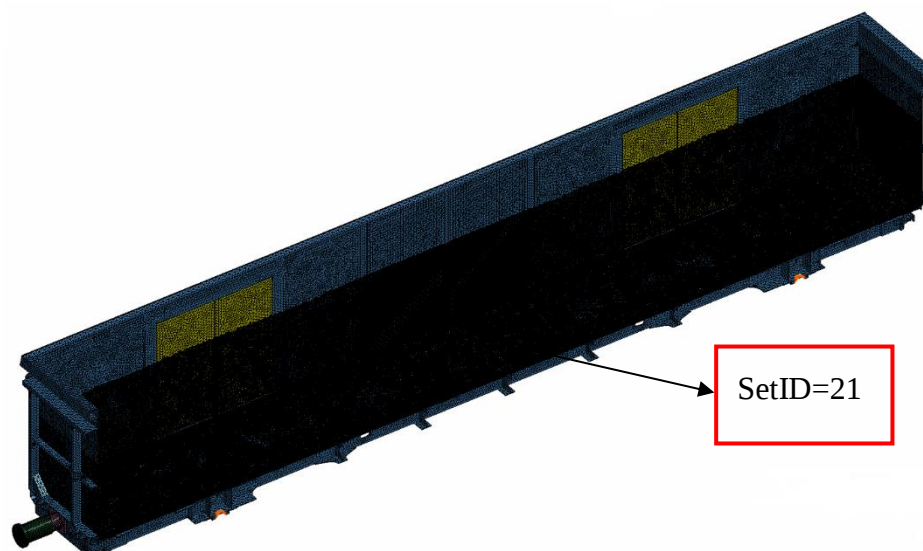
Слика 4.6.10 Контактна површина SetID=15,16



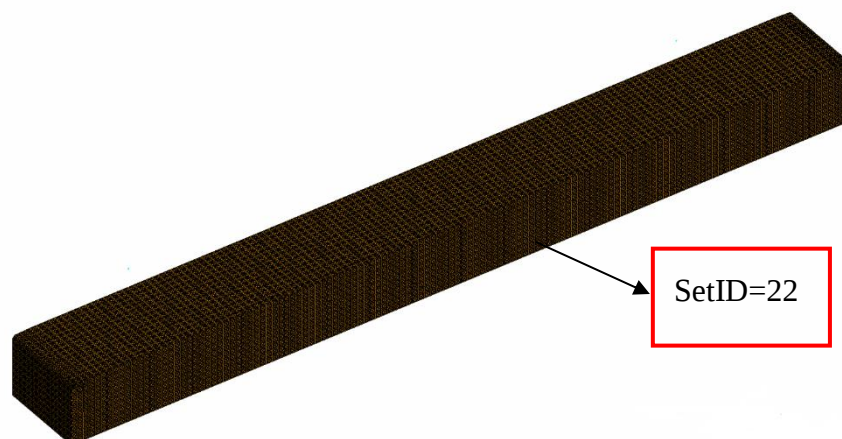
Слика 4.6.11 Контактна површина SetID=17,18



Слика 4.6.12 Контактна површина SetID=19,20



Слика 4.6.13 Контактна површина SetID=21



Слика 4.6.14 Контактна површина SetID=22

Након креираних контактних површина, потребно је поставити одговарајући тип контакта између њих. У картици `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`, потребно је поставити одговарајући ID *slave* сегмента у SSID и *master* сегмента у MSID. При одабиру *master* и *slave* сегмената треба се држати препорука из одељка 3.

Такође, у оквиру картица `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` и `*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE`, је потребно подесити параметре FS² и DS³ за сваки контактни пар.

На Слици 4.6.15 приказан је дефинисан контакт између одбојника, где је за *slave* сегмент постављена контактна површина SetID=1, која одговара покретном одбојнику, а за *master* сегмент контактна површина SetID=2, која одговара непокретном одбојнику.

² Статички коефицијент трења

³ Динамички коефицијент трења

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
1	2	0	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20	

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 (1) Odbojnik_Odbojnik
2 (2) Odbojnik_pokretni
3 (3) Odbojnik_nepokretni
4 (4) Odbojnik_pokretni_un
5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
6 (6) prednja vrata nepokretni
7 (7) prednja vrata pokretni
8 (8) zadnja vrata nepokretni
9 (9) zadnja vrata pokretni
11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.15 Контакт између одбојника, CID=1

На Слици 4.6.16 је дефинисан контакт унутар покретног одбојника, између контактних површина 3 и 5 које су приказане на Сликама 4.6.4 и 4.6.5 респективно.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
3	5	0	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20	

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 (1) Odbojnik_Odbojnik
2 (2) Odbojnik_pokretni
3 (3) Odbojnik_nepokretni
4 (4) Odbojnik_pokretni_un
5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
6 (6) prednja vrata nepokretni
7 (7) prednja vrata pokretni
8 (8) zadnja vrata nepokretni
9 (9) zadnja vrata pokretni
11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.16 Контакт унутар покретног одбојника

На Слици 4.6.17 дефинисан је контакт унутар непокретног одбојника између контактних површина 4 и 6, које су приказане на сликама 4.6.4 и 4.6.5 респективно.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
4	6	0	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20	

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 (1) Odbojnik_Odbojnik
2 (2) Odbojnik_pokretni
3 (3) Odbojnik_nepokretni
4 (4) Odbojnik_pokretni_un
5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
6 (6) prednja vrata nepokretni
7 (7) prednja vrata pokretni
8 (8) zadnja vrata nepokretni
9 (9) zadnja vrata pokretni
11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.17 Контакт унутар непокретног одбојника

На Слици 4.6.18 је дефинисан контакт који се јавља у покретном одбојнику при удару, између чела капе и унутрашњег дела. Као *slave* сегмент дефинисани су елементи који припадају капи покретног одбојника (SetID=7, Слика 4.6.6), а као *master* сегмент узети су елементи унутрашњег дела (SetID=9, Слика 4.6.7)

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP)_THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	7	9	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.18 Контакт између сегмената 7 и 9

На Слици 4.6.19 је дефинисан контакт који се јавља при удару покретног одбојника, између капе и унутрашњег дела непокретног одбојника. У овом случају за *slave* сегмент узимамо елементе капе непокретног одбојника, зато што при дејству покретног одбојника, капа удара у унутрашњи део који је дефинисан као *master* сегмент. На Сликама 4.6.6 и 4.6.7 приказани су сегменти 8 и 10 респективно.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP)_THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	10	8	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.19 Контакт између сегмената 7 и 9

На Сликама 4.6.20 и 4.6.21, дефинисан је контакт између предњих врата и конструкције вагона, између контактних површина 15-13 и 14-16, који су приказани на Сликама 4.6.9 и 4.6.10.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP)_THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	15	13	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_un
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.20 Контакт између сегмената 15 и 13

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	16	14	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.21 Контакт између сегмената 16 и 14

На Сликама 4.6.22 и 4.6.23, дефинисан је контакт између задњих врата и конструкције вагона, између контактних површина 19-17 и 20-18, који су приказани на Сликама 4.6.11 и 4.6.12.

Као *slave* сегменти, узети су елементи конструкције вагона, а као *master* сегмент дефинисани су елементи задњих врата.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	19	17	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.22 Контакт између сегмената 19 и 17

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID/TITLE/MPP(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	20	18	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

- 1 (1) Odbojnik_Odbojnik
- 2 (2) Odbojnik_pokretni
- 3 (3) Odbojnik_nepokretni
- 4 (4) Odbojnik_pokretni_un
- 5 (5) Odbojnik_nepokretni_
- 6 (6) prednja vrata nepokretni
- 7 (7) prednja vrata pokretni
- 8 (8) zadnja vrata nepokretni
- 9 (9) zadnja vrata pokretni
- 11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.23 Контакт између сегмената 20 и 18

На Слици 4.6.24 дефинисан је контакт између терета и унутрашњег дела вагона, где је за *slave* сегмент узета контактна површина SetID=21, Слика 4.6.13, а за *master* сегмент контактна површина SetID=22, Слика 4.6.14

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (10)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	21	22	0	0	0	0	0	0

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.8400000	0.8400000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 10 Smallest ID: 1 Largest ID: 11 Total deleted card: 0

1 (1) Odbojnik_Odbojnik
2 (2) Odbojnik_pokretni
3 (3) Odbojnik_nepokretni
4 (4) Odbojnik_pokretni_un
5 (5) Odbojnik_nepokretni
6 (6) prednja vrata nepokretni
7 (7) prednja vrata pokretni
8 (8) zadnja vrata nepokretni
9 (9) zadnja vrata pokretni
11 (11) Vagon_teret

Слика 4.6.24 Контакт између терета и вагона

За дефинисање контакта између контактних површина SetID=11 и SetID=12, користимо *CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE, Слика 4.6.8.

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 Model_V1.k) Setting

*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL) (1)

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	11	12	0	0	0	0	0	2

5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+20

Total Card: 1 Smallest ID: 10 Largest ID: 10 Total deleted card: 0

10 (10) Odbojnik_grudna q

Слика 4.6.25 Дефинисање контакта између одбојника и вагона

4.7. Дефинисање граничних услова и оптерећења

У последњем делу улазне датотеке задају се гранични услови, почетни услови и оптерећења.

4.7.1. Дефинисање граничних услова

Гранични услови су дефинисани преко група чворова који су креирани помоћу:

Entity Creation>Set Data>*Set_NODE

Свака група чворова има свој јединствени број SetID, који мора одговарати величини NSID у картици *BOUNDARY_SPC_SET, унутар које је потребно поставити одговарајуће граничне услове за сваку групу чворова.

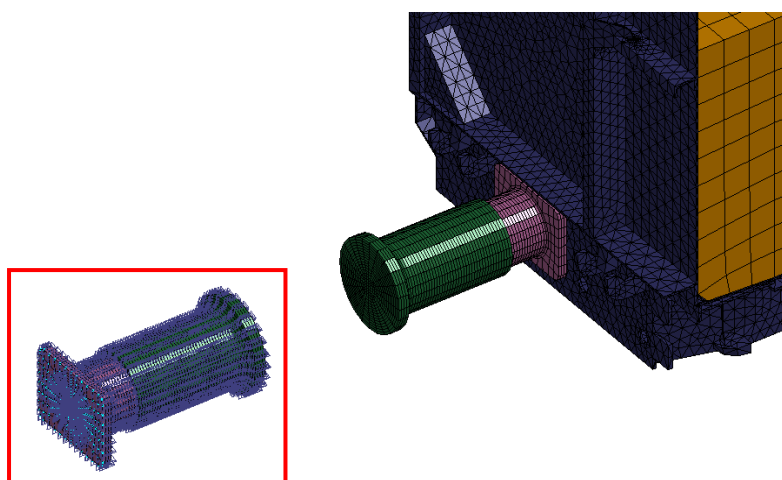
Креиране су три групе чворова, које су коришћене за постављање граничних услова, чији је SetID=1, 2 и 5, Слика 4.7.1.

Слика 4.7.1 Креирање група чворова за дефинисање граничних услова

У групу чији је SetID=1, потребно је убацити чворове чији је ID у конкретном примеру 72604 и 144680. Овим чворовима потребно је ограничити померање у правцу осе Z (DOFZ=1) у картици *BOUNDARY_SPC_SET, Слика 4.7.2.

Слика 4.7.2 Ограничење ослонаца

У групу SetID=2, потребно је убацити чворове покретног одбојника. На Слици 4.7.3 дат је приказ селектованих чворова.



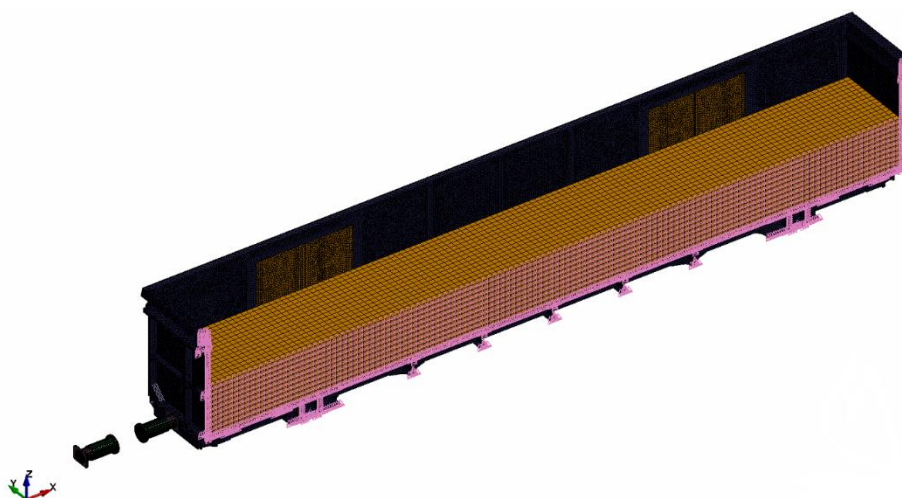
Слика 4.7.3 Група чворова; SetID=2

Пошто је кретање покретног одбојника дозвољено само у правцу осе X, потребно је поставити граничне услове за сва остала померања у картици *BOUNDARY_SPC_SET, Слика 4.7.4.

ID	TITLE	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
0	Odbojnik_pokretni_x-pomeranje	2	0	0	1	1	1	1	1
1	Y-simetrija				1		1		1

Слика 4.7.4 Задавање граничних услова покретног одбојника

Последње ограничење се односи на задавање граничних услова симетрије модела. У групи SetID=5, постављени су селектовани чворови на Слици 4.7.5.



Слика 4.7.5 Група чворова; SetID=5

Гранични услови за симетрију модела у односу на раван XZ су: translација у правцу осе Y (DOFY=1), спречене ротације око оса X и Z (DOFRX=1 и DOFRZ=1), Слика 4.7.6.

ID	TITLE	NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
0	Y-simetrija	5	0	0	1	0	1	0	1
1	Y-simetrija				1		1		1

Слика 4.7.6 Дефинисање граничних услова симетрије модела

4.7.2. Дефинисање почетне брзине и оптерећења

*INITIAL_VELOCITY_NODE

Картица која служи за задавање почетне брзине у чворовима. Као што је речено на почетку овог одељка задата је брзина 12km/h, односно 3333mm/s. Креирамо групу чворова SetID=4, где селекујемо све чворове покретног одбојника, а затим им задајемо брзину у правцу осе X. На Слици 4.7.7 је приказана картица где се NSID односи на групу чворова покретног одбојника, а Vx је задата брзина.

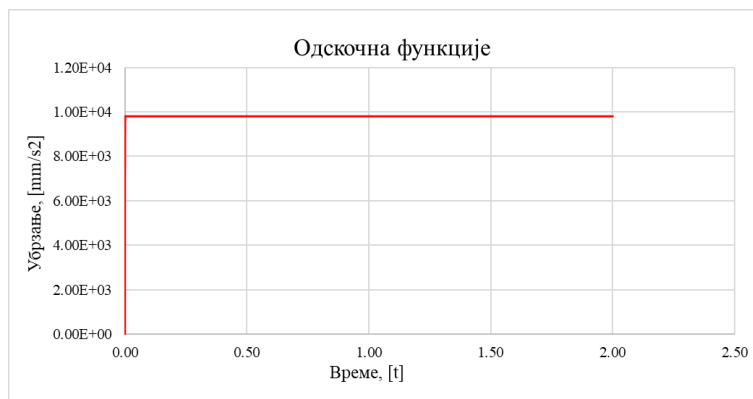
Слика 4.7.7 Дефинисање брзина чворова

4.7.3. Дефинисање оптерећења

На крају је потребно дефинисати и оптерећења. На посматрани модел не делују никаква спољашња оптерећења, већ је модел оптерећен само услед сопствене тежине и терета. Из тог разлога бирамо картицу *LOAD_BODY_Z, унутар које је потребно дефинисати убрзање Земљине теже. Убрзање Земљине теже задајемо преко одскочне функције креиране у картици *DEFINE_CURVE, чији је ID=1, Слика 4.7.8.

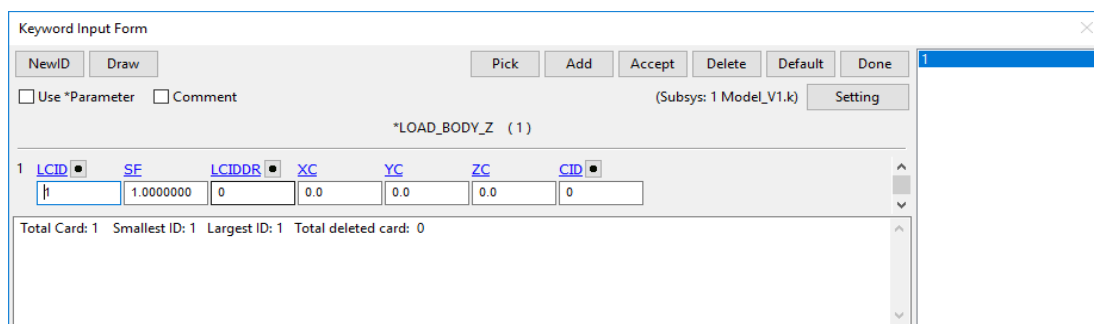
Слика 4.7.8 Дефинисање одскочне функције

Облик креиране криве, приказан је на Слици 4.7.9.



Слика 4.7.9 Одскачна функција

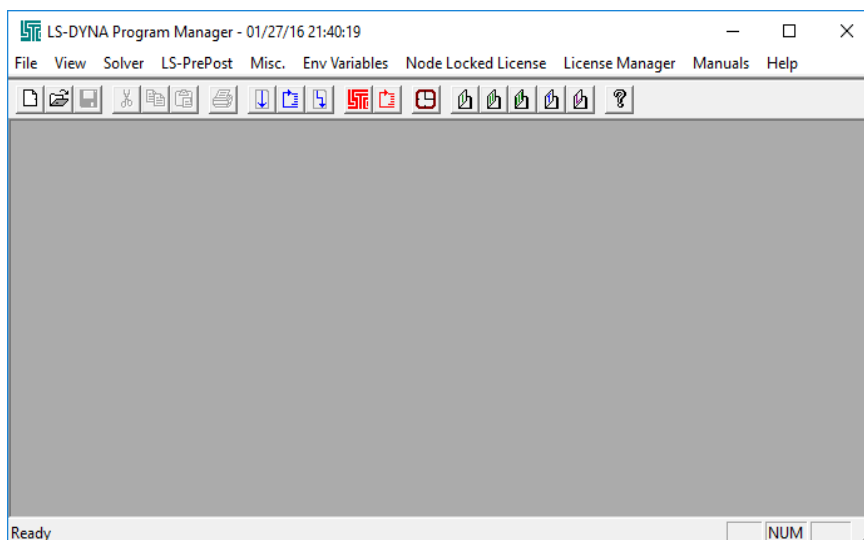
Након тога, отварамо картицу `*LOAD_BODY_Z` где је унутар поља `LCID`, потребно унети ID криве, а затим подесити фактор скалирања криве (`SF`) на 1.



Слика 4.7.10 Дефинисање убрзања Земљине теже

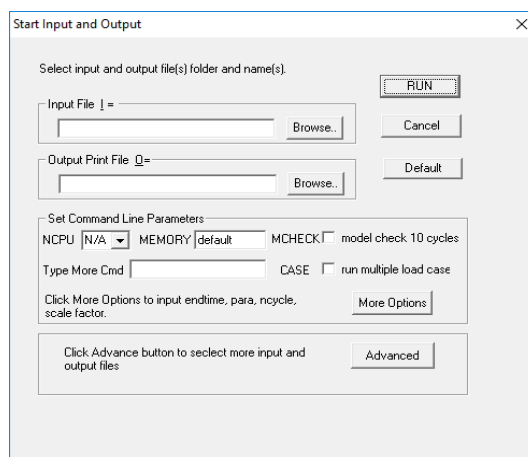
4.8. Пуштање анализе

Да бисмо пустили анализу, потребно је отворити **LS-Dyna Program Manager**, Слика 4.8.1.



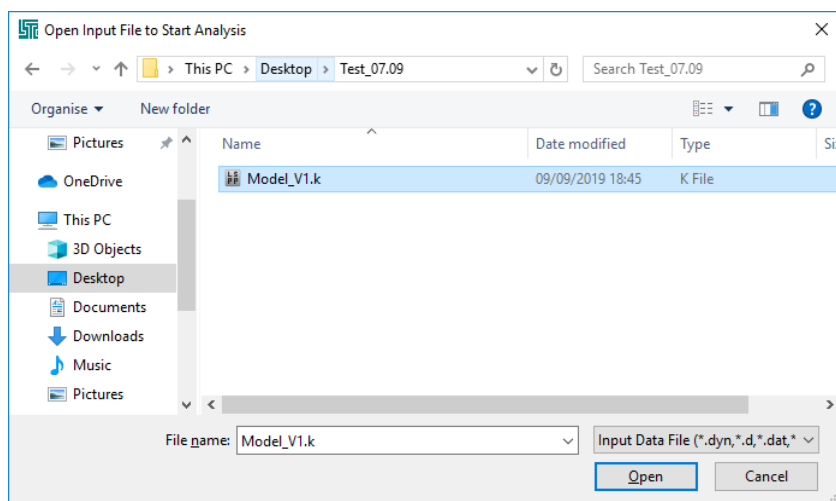
Слика 4.8.1 LS-DYNA Program Manager

Одабиром опције  у *toolbar*-у или коришћењем команде **Solvers>Start LS/DYNA Analysis**, отвара се прозор приказан на Слици 4.8.2.

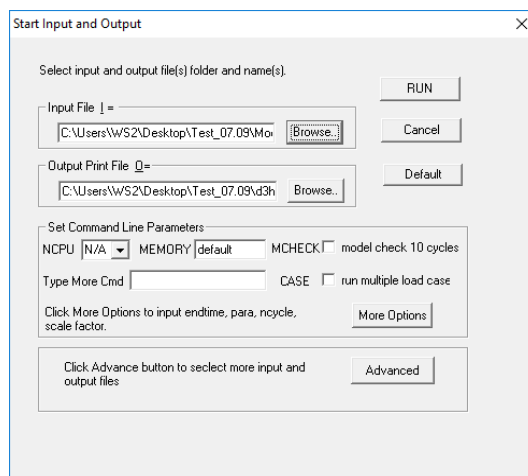


Слика 4.8.2 Задавање улазне датотеке

У оквиру **Input File I=** треба одабрати дугме **Browse** и одабрати путању где се налази улазна датотека коју желимо да анализирамо. Када се селекује улазна датотека (Model_V1.k, у овом случају) потврдом на опцију **Open** у прозору **Open Input File to Start Analysis**, Слика 4.8.3, у прозору **Start Input and Output** аутоматски се дефинише и излазна датотека у истом директоријуму где се налази и улазна датотека, Слика 4.8.4

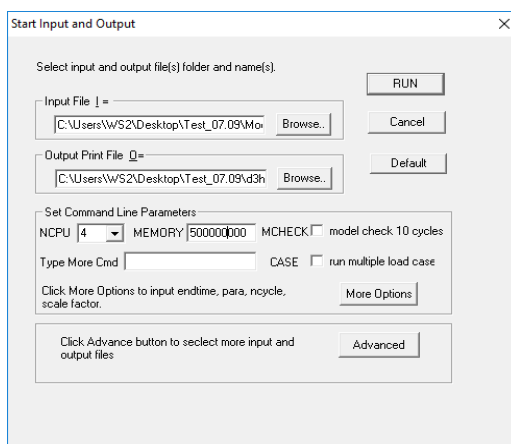


Слика 4.8.3 Импортовање улазне датотеке



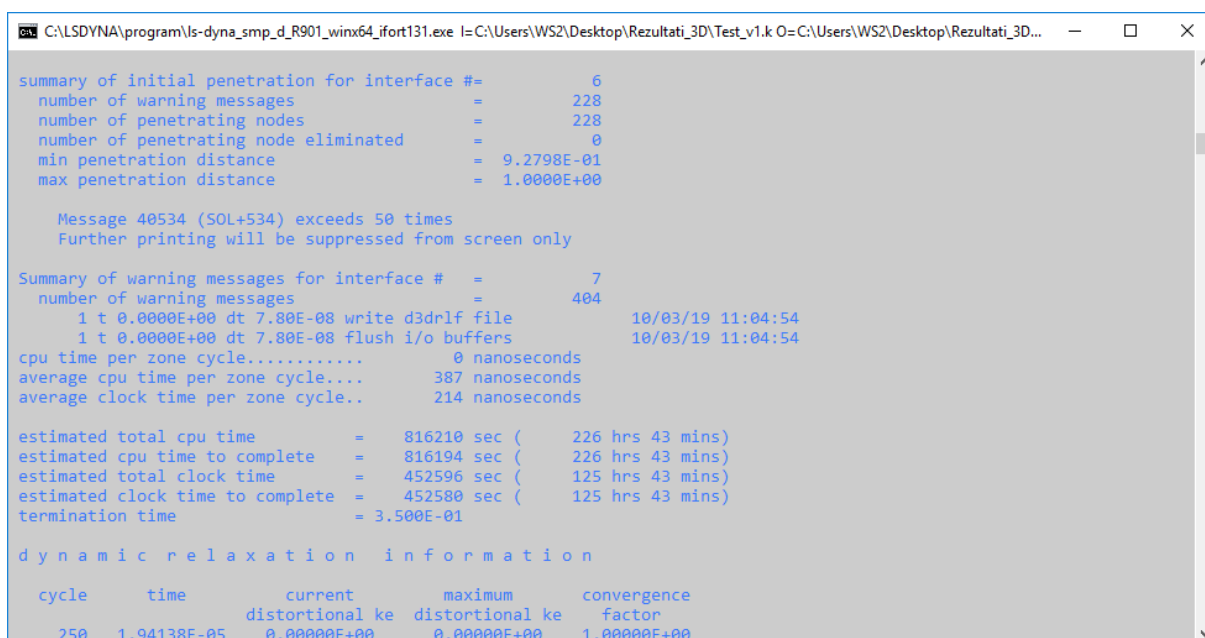
Слика 4.8.4 Задавање улаза и излаза на почетку анализе

На крају је потребно у делу **Set Command Line Parameters**, дефинисати број коришћених процесора (NCPU), као и радну меморију (MEMORY). За ову анализу, коришћена су четири процесора, а дефинисана радна меморија је 500000000, Слика 4.8.5.



Слика 4.8.5 Подешавање броја коришћених процесора и радне меморије

Избором опције **RUN**, започиње анализа. Отвара се **DOS** прозор приказан на Сlici 4.8.6.



Слика 4.8.6 LS-DYNA DOS прозор

Када се покрене анализа, у директоријуму где се налази улазна датотека, записују се излазни фајлови без екстензије. Излазни фајлови који се генеришу дефинисани су одељку 4.4.

За постпроцесирање резултата, приказ поља напона, деформација и др, у зависности од подешених параметара излаза у улазној датотеци, учитава се **d3plot**, без обзира који постпроцесор користимо.

У LS DYNA Program Manager-у може се рестартовати анализа, одабиром опције у *toolbar*-у (), или задавањем команде из менија **Solvers > Restart LS/DYNA Analysis**.

5. Резултати анализе

У овом поглављу извршено је поређење резултата динамичке анализе вагона добијених применом четворочворних коначних елемената љуске и 3D коначних елемената без међучворова.

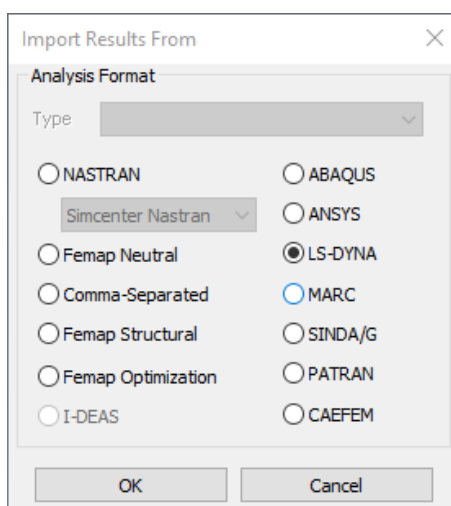
Резултати динамичке анализе вагона који је креиран помоћу четворочворног коначног елемента љуске већ постоје [14], тако да је циљ овог рада био да се исти модел креира применом 3D коначних елемената без међучворова, а затим под истим граничним условима и оптерећењима примењеним на модел коначних елемената љуске, а који су описани у оквиру четврте главе овог рада, спроведе динамичка анализа у софтверу LS-DYNA.

Идеја за овим радом настала је пре свега због упоређивања времена које је потребно за креирање мреже коначних елемената модела. Креирање модела применом 3D коначних елемената захтева далеко мање времена од креирања истог модела применом коначног елемента љуске. За креирање мреже 3D коначних елемената у софтверу FEMAP, постоје већ развијени и имплементирани алгоритми за аутоматско креирање мреже на основу модела.

Применом коначног елемента љуске, потребно је далеко више времена за креирање мреже, где је прво потребно креирати средње површине, а затим креирати мрежу коначних елемената различитих дебљина, где корисник мора већи део да ради ручно.

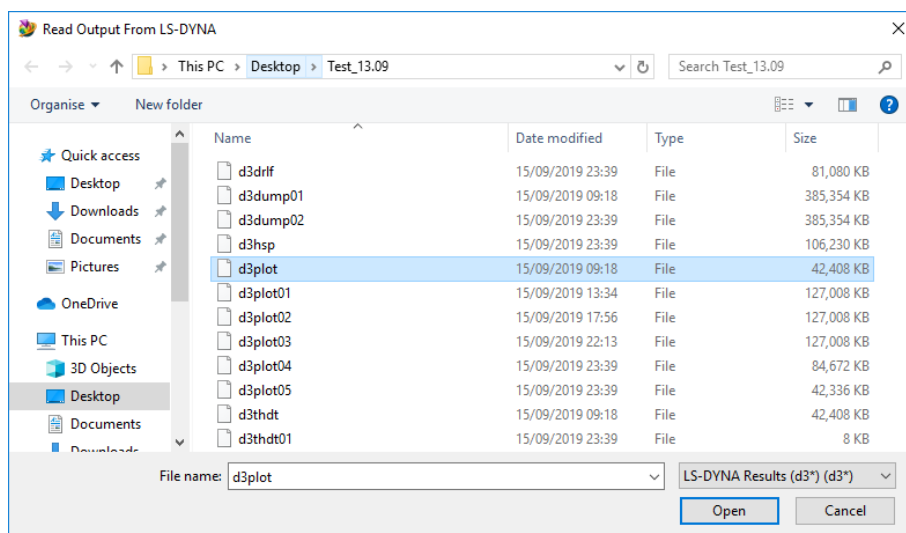
5.1. Учитавање и упоредни приказ резултата анализе

Добијени резултати динамичке анализе приказани су у софтверу FEMAP. Применом команди **Import > Analysis Results...** у падајућем менију **File** у FEMAP окружењу, отвара се прозор приказан на Слици 5.1.1.



Слика 5.1.1 Учитавање резултата анализе

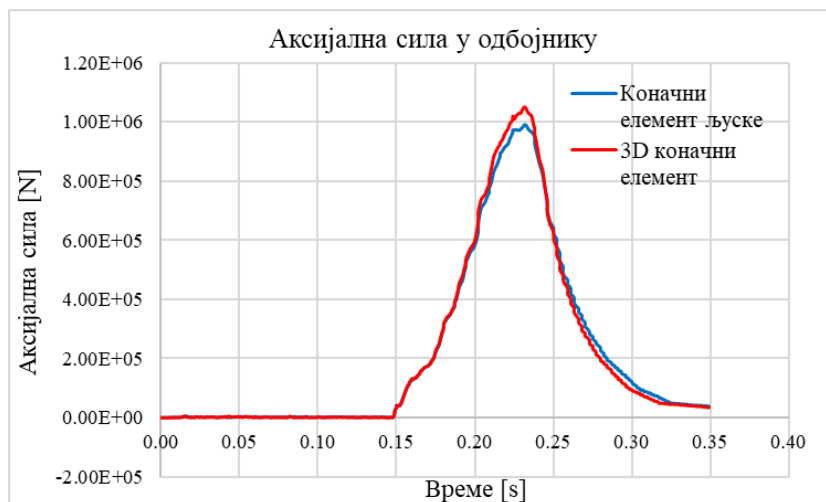
У оквиру прозора **Import Results From**, бирамо LS-DYNA, дефинишемо путању радног директоријума где се налазе записани резултати и бирамо датотеку **d3plot**, Слика 5.1.2.



Слика 5.1.2 Учитавање датотеке са резултатима анализе

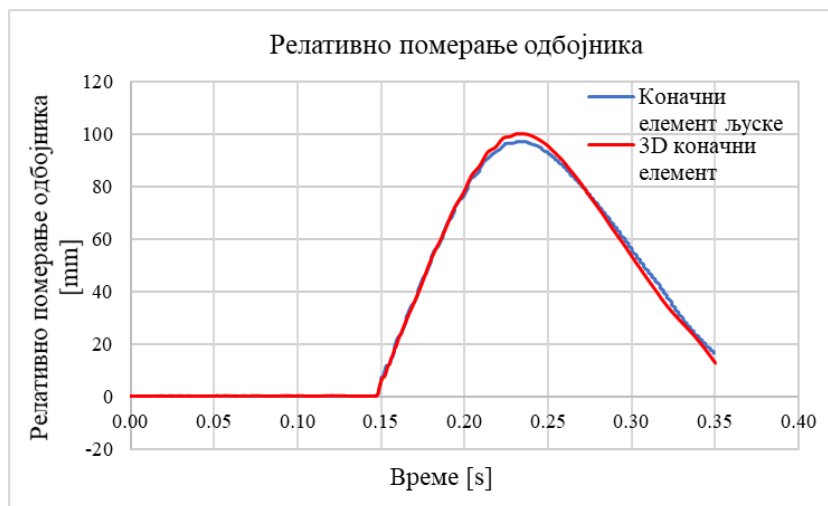
Избором опције **Open**, извршено је учитавања резултата.

На Слици 5.1.3 приказан је график који илуструје аксијалну силу унутар одбојника током анализе. Максималне вредности аксијалних сила за модел 3D коначних елемената и модел коначних елемената љуске, остварене су после 0.23 секунди анализе и износе 1060 kN и 988kN, респективно. Због веће крутости 3D коначних елемената у односу на четворочворне коначне елементе љуске, максимална вредност аксијалне силе добијене приликом анализе модела 3D коначних елемената је нешто већа у односу на модел коначних елемената љуске.



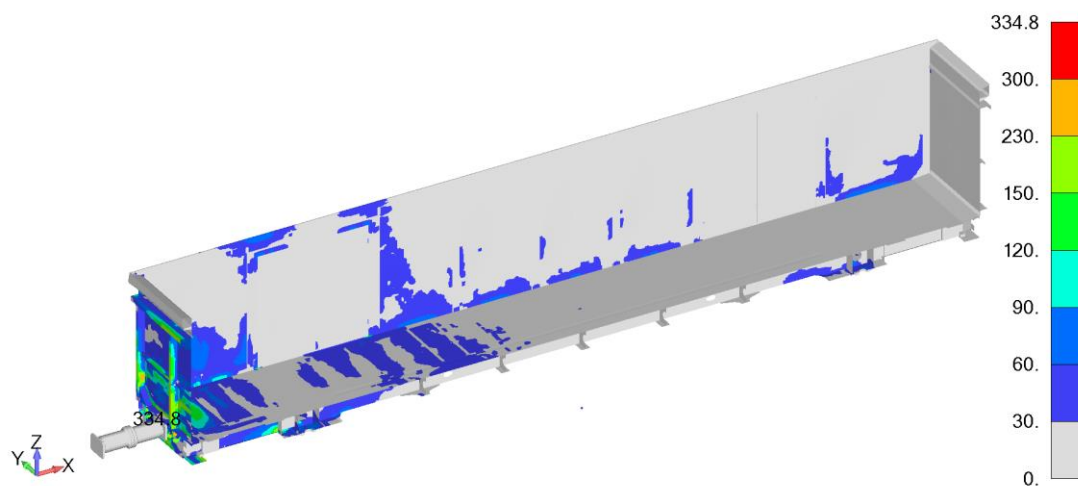
Слика 5.1.3 Аксијална сила у одбојнику

На Слици 5.1.4 приказан је график који илуструје релативно померање одбојника у подужном правцу током анализе. Максималне вредности релативних померања у подужном правцу за модел 3D коначних елемената и модел коначних елемената љуске, остварене су после 0.23 секунди анализе и износе 100,01mm и 97.77mm, респективно.

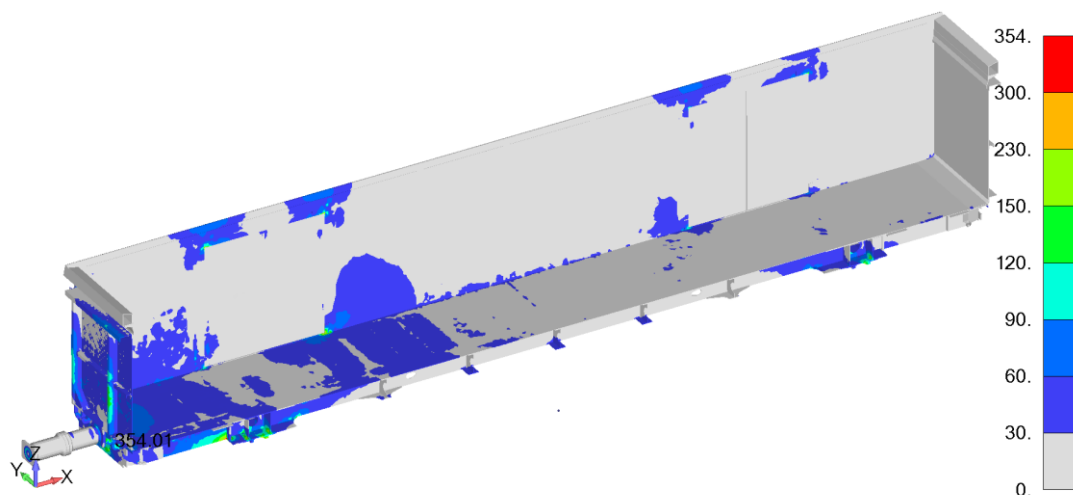


Слика 5.1.4 Релативно померање одбојника у подужном правцу

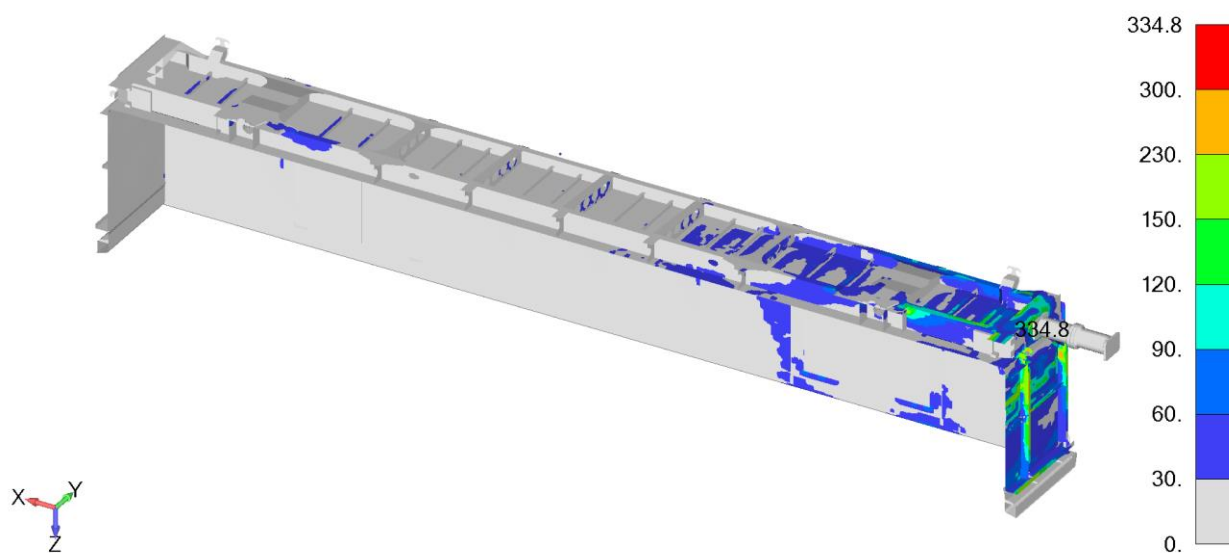
На Сликама 5.1.5 – 5.1.14 су приказана поља расподеле Von Mises-овог еквивалентног напона за најкритичнији корак анализе применом четворочворних коначних елемената љуске и 3D коначних елемената без међучворова.



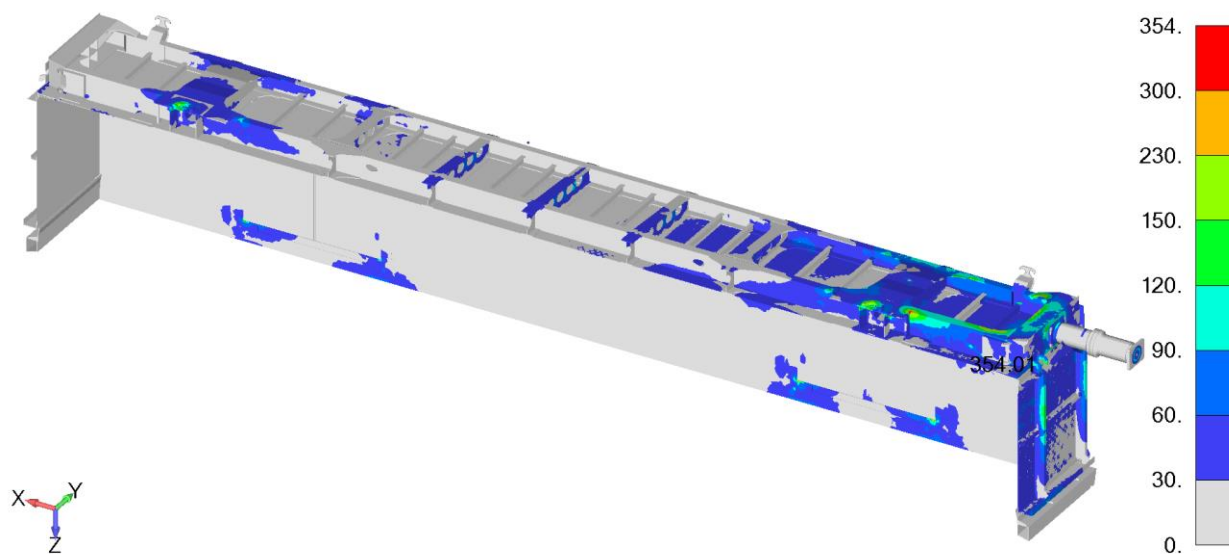
Слика 5.1.5 Поље расподеле Von-Mises-овог еквивалентног напона (коначни елемент љуске)



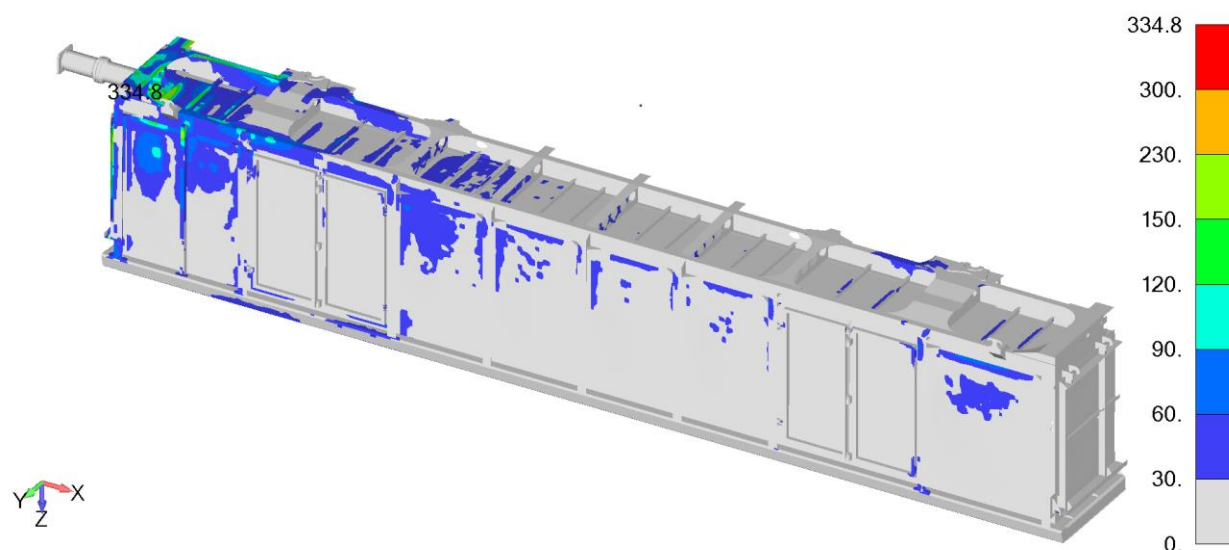
Слика 5.1.6 Поље расподеле Von-Mises-овог еквивалентног напона (3D коначни елемент)



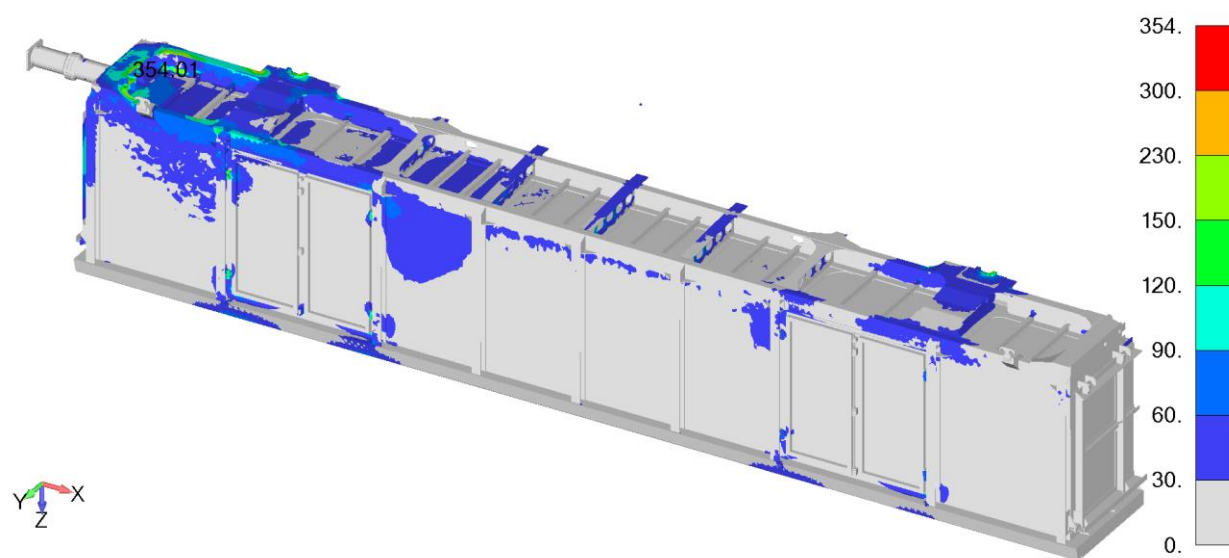
Слика 5.1.9 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (коначни елемент љуске)



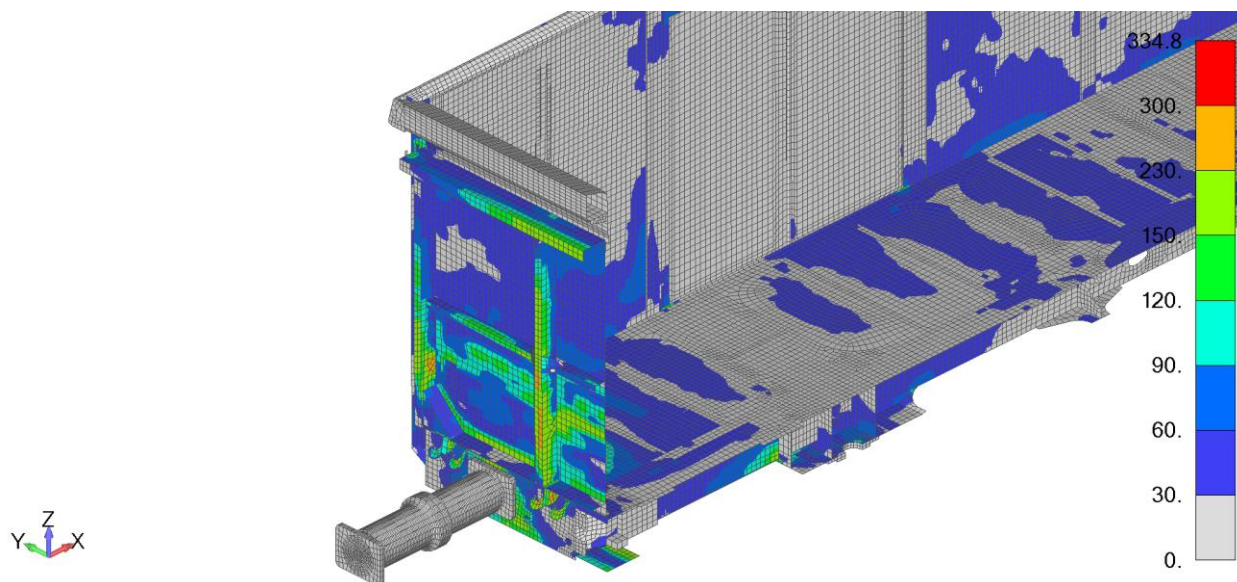
Слика 5.1.10 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (3D коначни елемент)



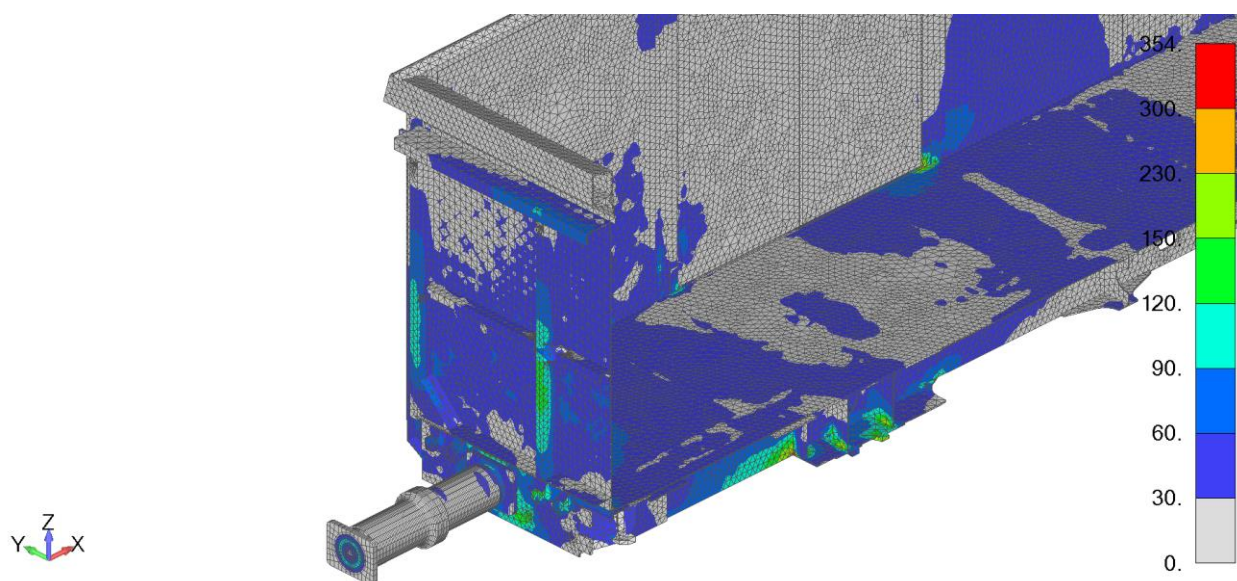
Слика 5.1.11 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (коначни елемент љуске)



Слика 5.1.12 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (3D коначни елемент)



Слика 5.1.13 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (коначни елемент љуске)



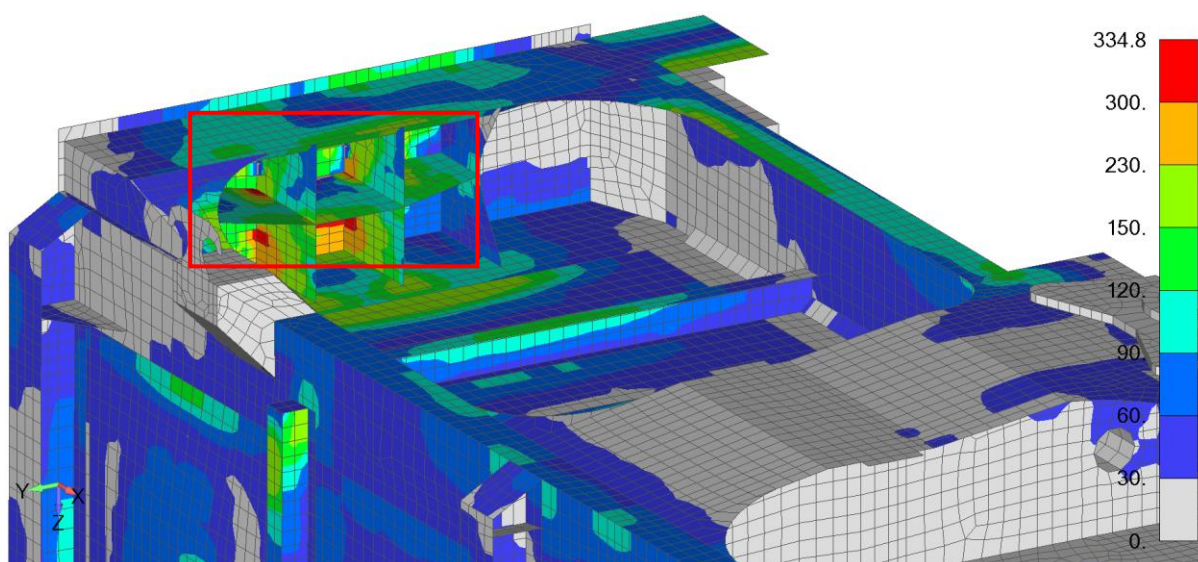
Слика 5.1.14 Поље расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона (3D коначни елемент)

Упоредивањем резултата расподеле Von-Misses-овог еквивалентног напона приказаним на претходним сликама можемо приметити да се резултати симулације модела 3D коначних елемената не поклапају у потпуности са резултатима анализе модела коначних елемената љуске. Разлог овог одступања је већа крутост 3D коначних елемената без међучворова који се користе у овој нумеричкој симулацији. Да би се резултати нумеричке симулације модела 3D коначних елемената ускладили са резултатима анализе модела коначних елемената љуске, неопходно је користити 3D коначне елементе са међучворовима.

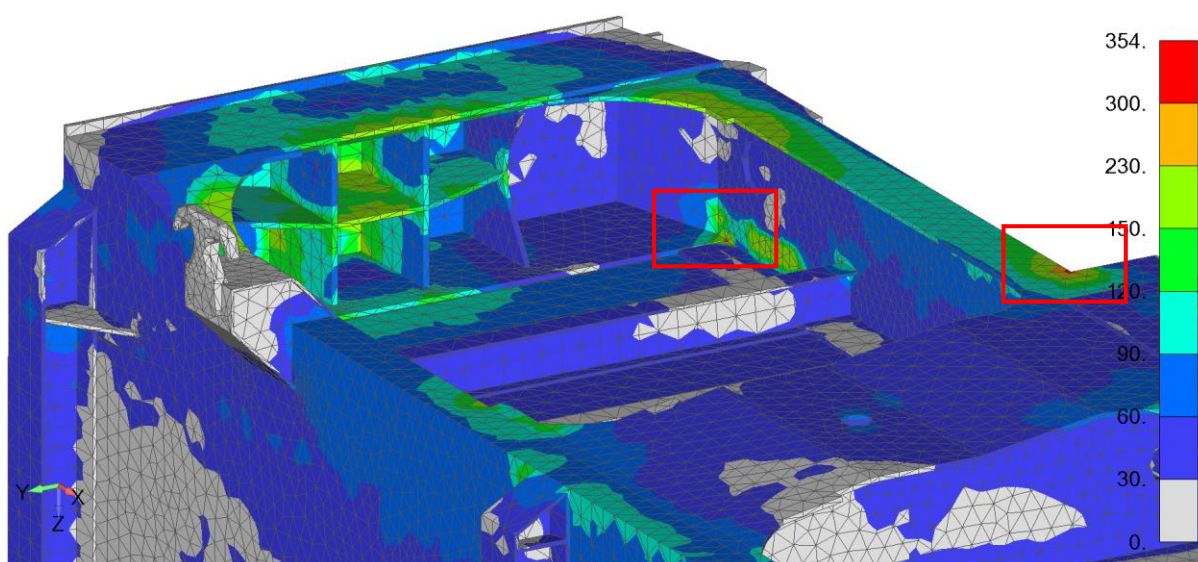
Зоне са повишеним вредностима напона, приказане су на Сликама 5.1.15 и 5.1.16. Максималне вредности Von Mises-овог еквивалентног напона за мрежу модела креираних применом коначних елемената љуске и 3D коначних елемената дате су у Табели 5.1.1. Места максималних вредности напона за модел коначних елемената љуске и 3D коначних елемената приказани су на Сликама 5.1.17 и 5.1.18, респективно.

Табела 5.1.1 Максимална вредност еквивалентног Von-Mises-овог напона

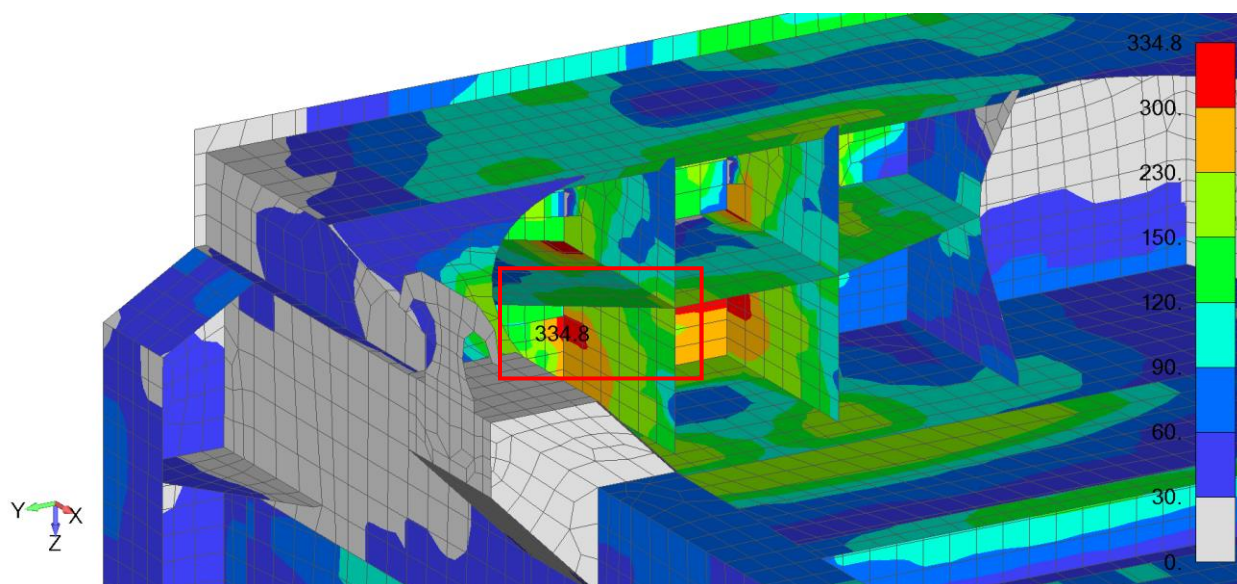
Слика	Максимални прорачунати напон [MPa]
5.1.17	334.80
5.1.18	354.01



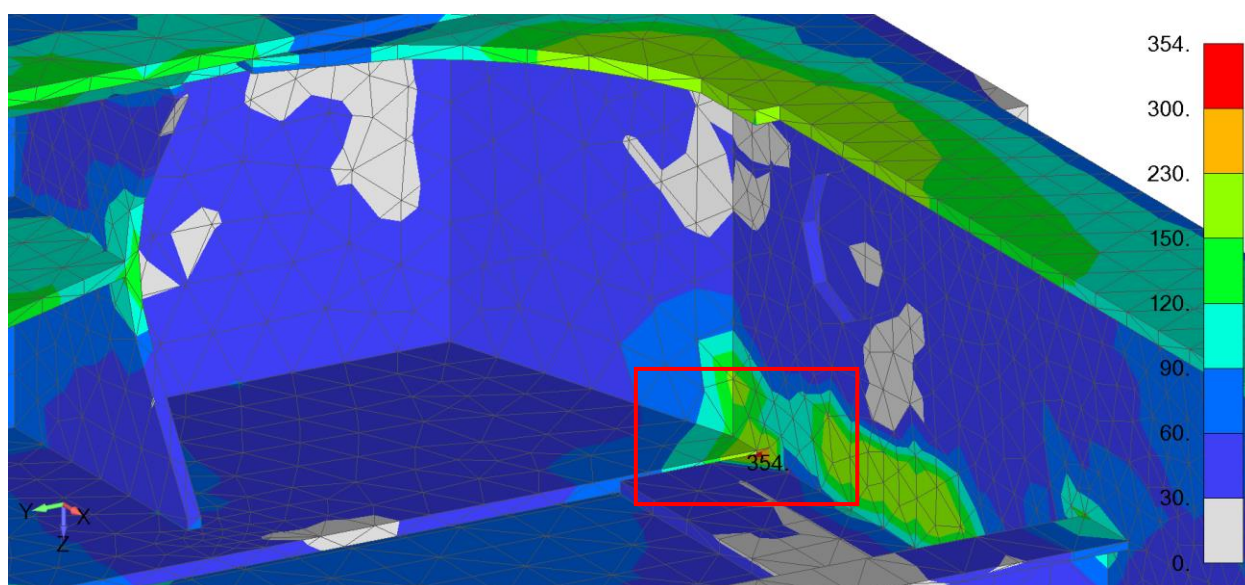
Слика 5.1.15 Зоне са повишеном концентрацијом напона (коначни елемент љуске)



Слика 5.1.16 Зоне са повишеном концентрацијом напона (3D коначни елемент)

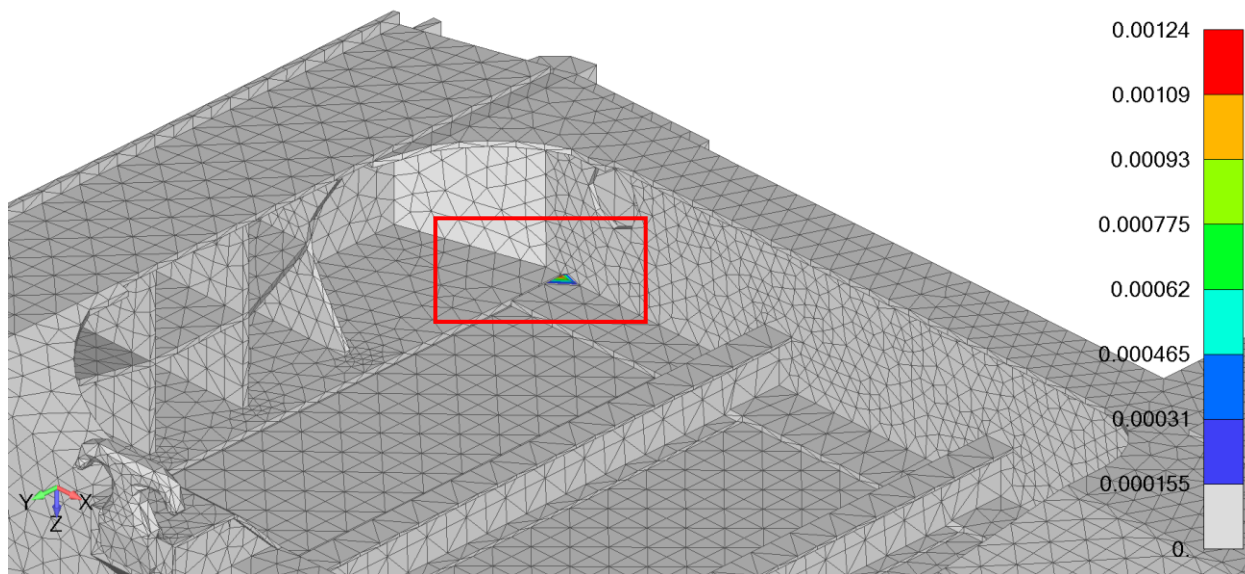


Слика 5.1.17 Зона максималног *Von Mises*-овог еквивалентног напона (коначни елемент љуске)

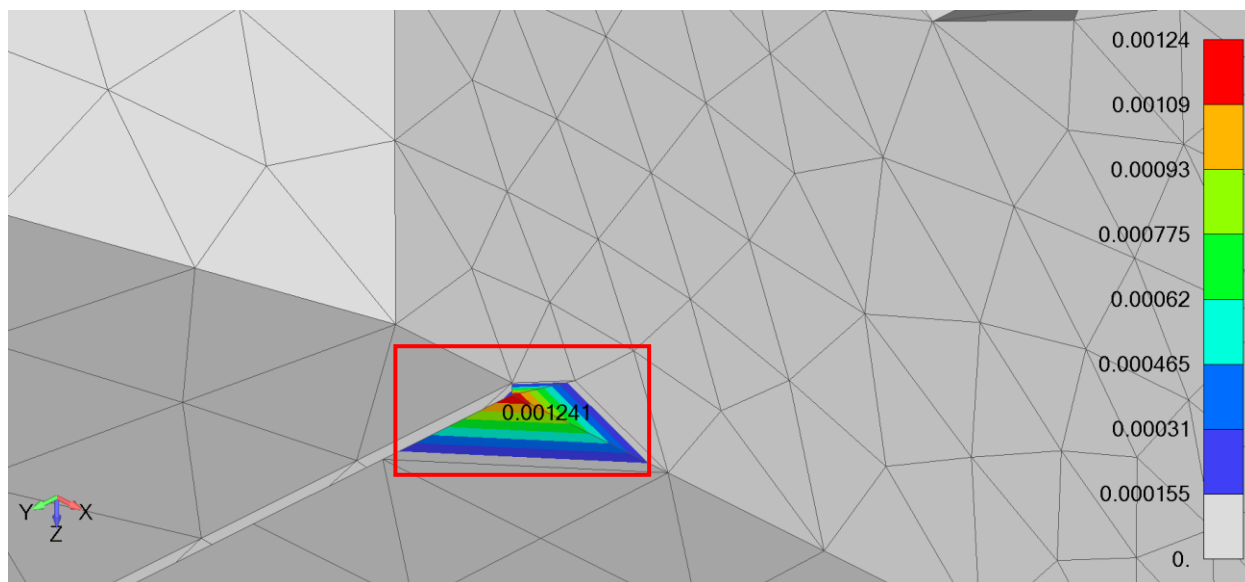


Слика 5.1.18 Зона максималног *Von Mises*-овог еквивалентног напона (3D коначни елемент)

Вредност добијеног напона при анализи модела 3D коначних елемената изазива пластично деформисање које је испод дозвољене вредности пластичне деформације од 2 %, у складу са EN 12663: 2010, Табела 22 [13]. На Сликама 5.1.19 и 5.1.20 су приказана поља пластичних деформација.



Слика 5.1.19 Зона пластичне деформације (3D коначни елемент)

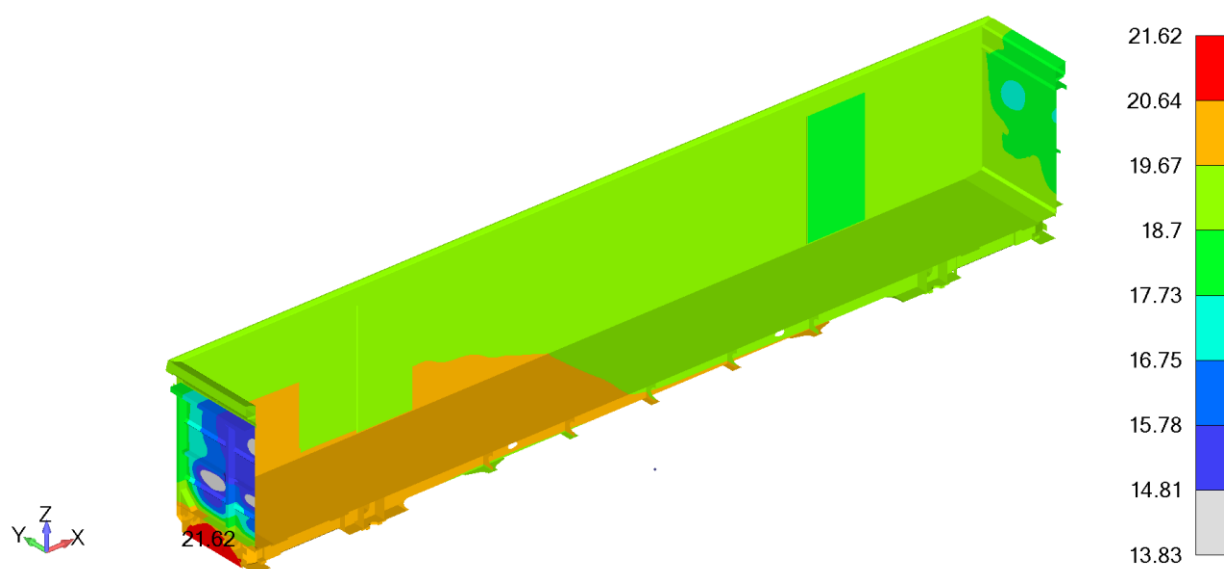


Слика 5.1.20 Максимална вредност пластичне деформације (3D коначни елемент)

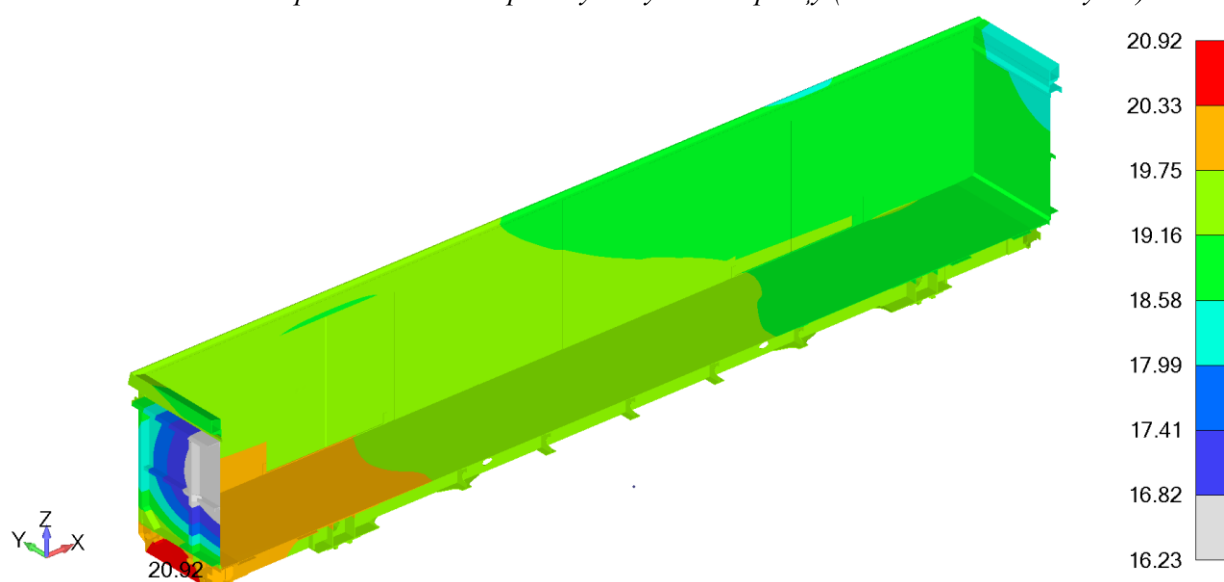
На Сликама 5.1.21 – 5.1.24 приказана су поља релативних померања вагонске конструкције у подужном правцу, најкритичнијег корака анализе за 3D модел коначних елемената и модел коначних елемената љуске. Место максималних релативних померања модела креираних применом коначних елемената љуске и 3D коначних елемената приказани су на Сликама 5.1.25 и 5.1.26, респективно, а њихове вредности су дате у Табели 5.1.2.

Табела 5.1.2 Релативна померања у подужном правцу; максималне вредности

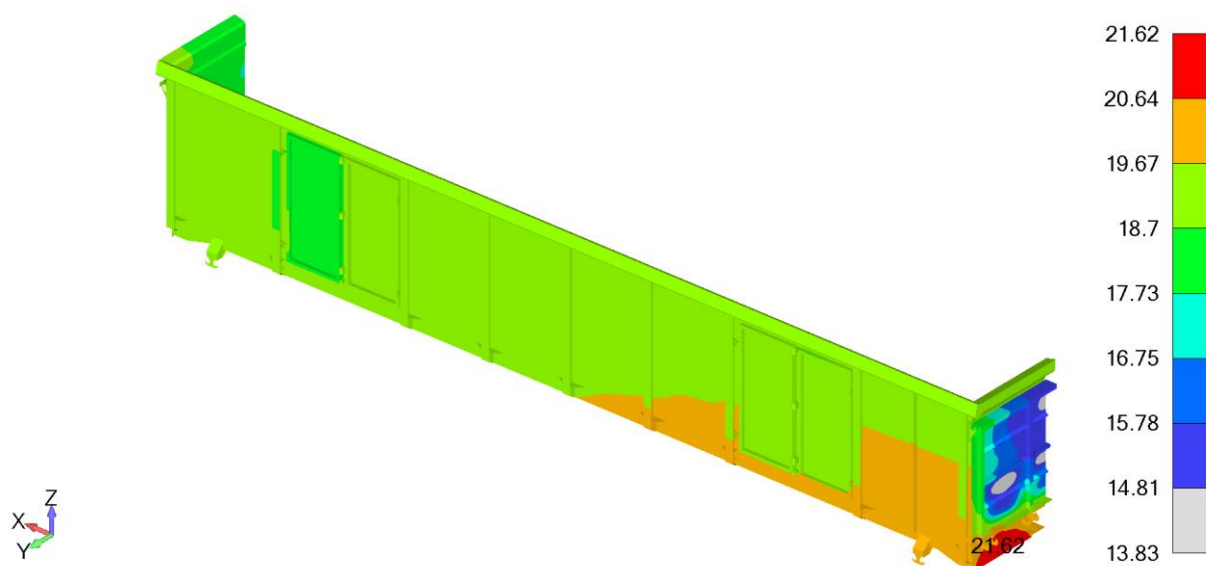
Слика	Максимално померање у подужном правцу [mm]
5.1.25	20.62
5.1.26	20.92



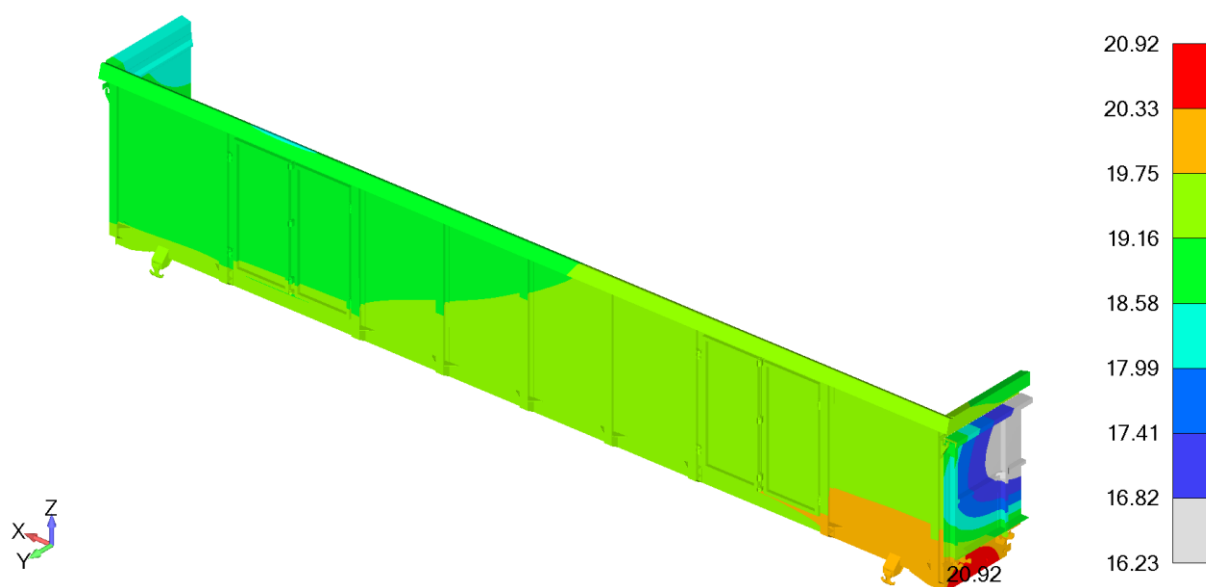
Слика 5.1.21 Поље релативног померања у подужном правцу (коначни елемент љуске)



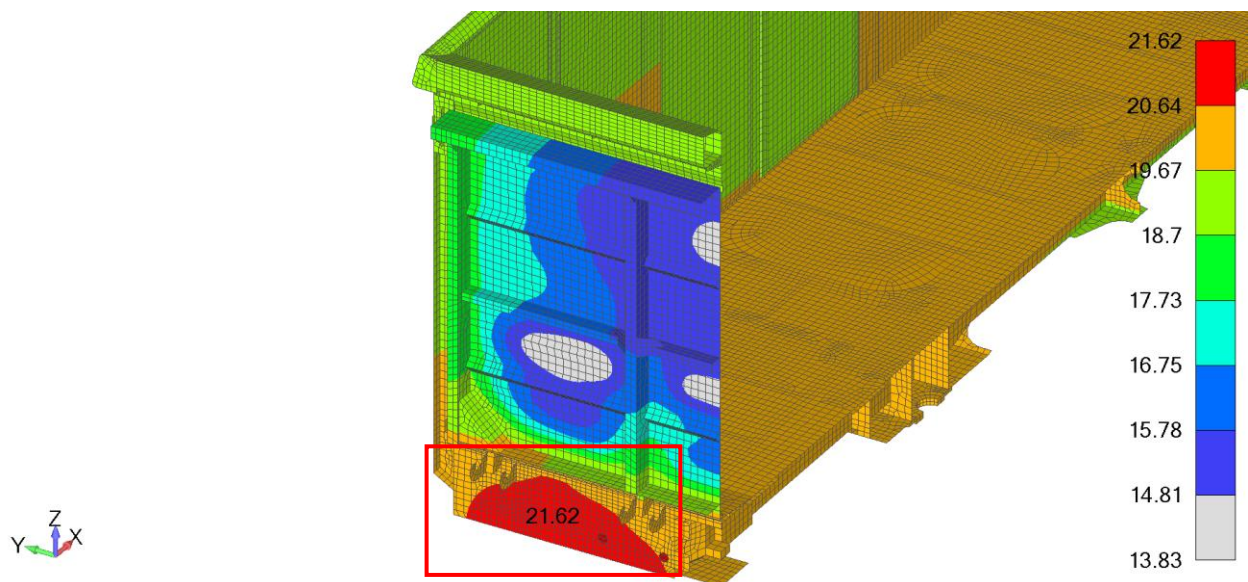
Слика 5.1.22 Поље релативног померања у подужном правцу (3D коначни елемент)



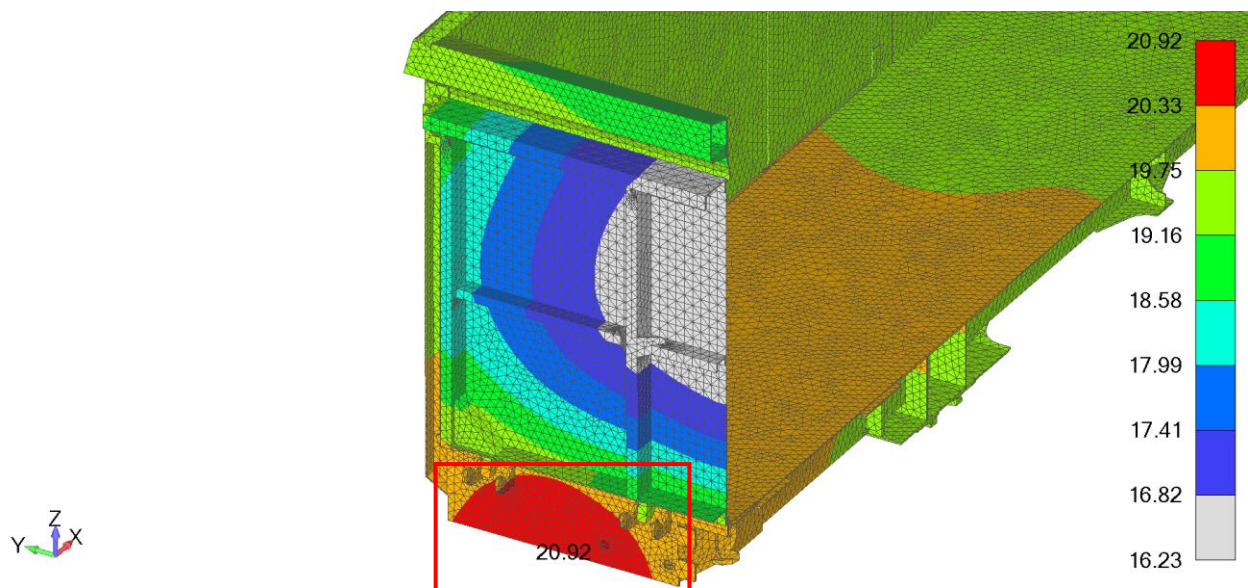
Слика 5.1.23 Поље релативног померања у подужном правцу (коначни елемент љуске)



Слика 5.1.24 Поље релативног померања у подужном правцу (3D коначни елемент)



Слика 5.1.25 Место максималног релативног померања у подужном правцу (коначни елемент љуске)



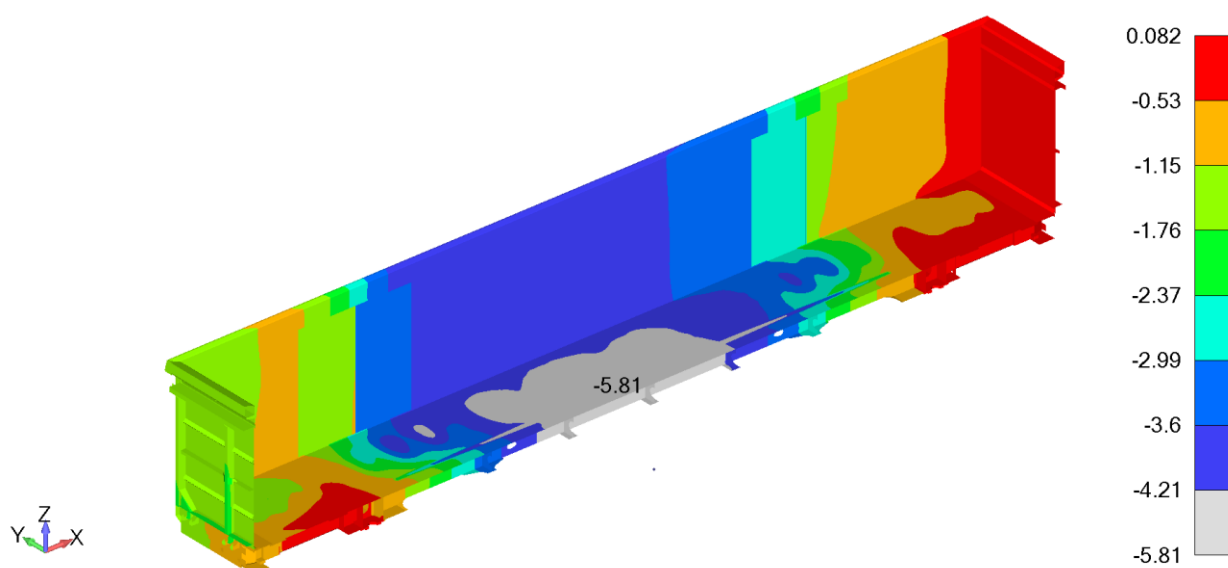
Слика 5.1.26 Место максималног релативног померања у подужном правцу (3D коначни елемент)

Расподела поља релативних померања у подужном правцу добијени анализом модела 3D коначних елемената се у великој мери поклапају са резултатима анализе модела коначних елемената љуске, при истим граничним условима и оптерећењима.

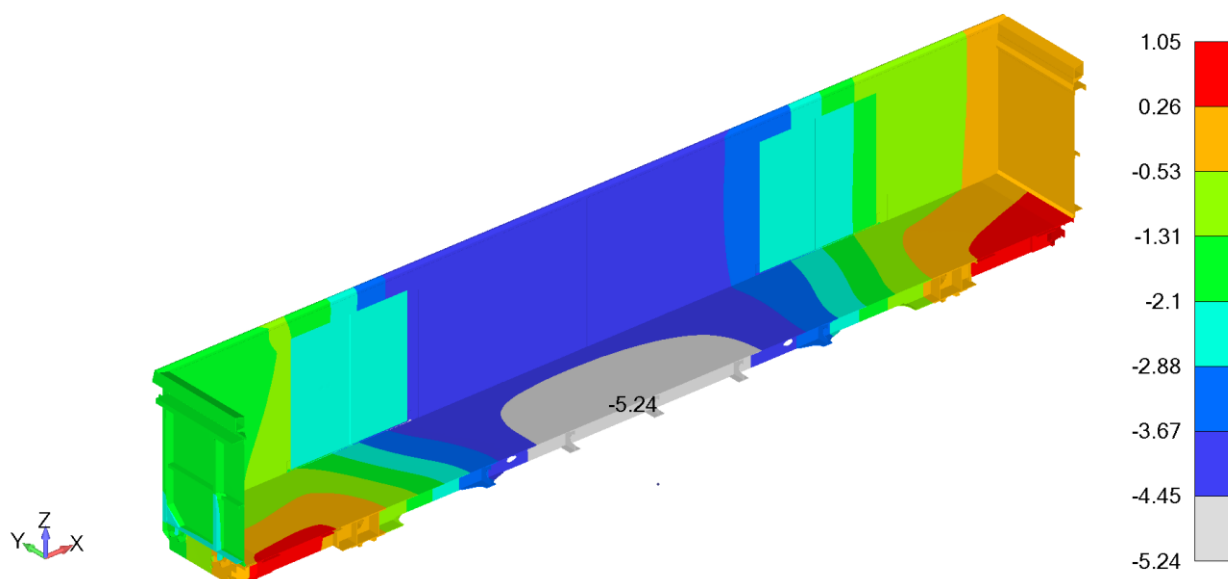
На Сликама 5.1.27 – 5.1.30 приказана су поља вертикалних померања вагонске конструкције најкритичнијег корака анализе за 3D модел коначних елемената и модел коначних елемената љуске. Место максималних вертикалних померања модела креираних применом коначних елемената љуске и 3D коначних елемената приказани су на Сликама 5.1.31 и 5.1.32, респективно, а њихове вредности су дате у Табели 5.1.3.

Табела 5.1.3 Релативна померања у вертикалном правцу; максималне вредности

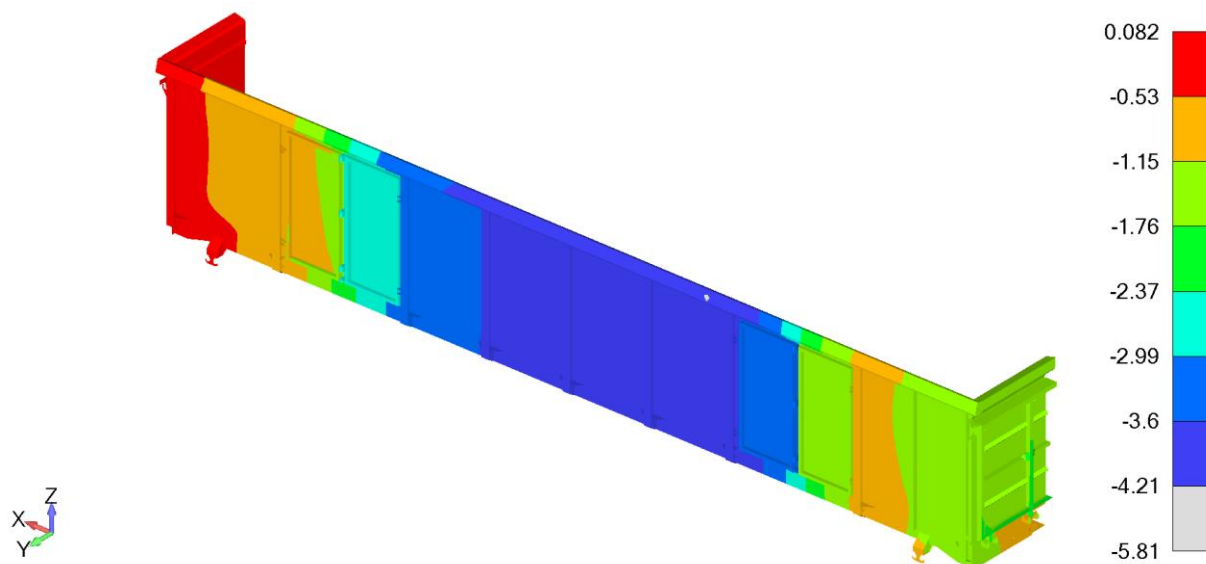
Слика	Максимално померање у вертикалном правцу [mm]
5.1.31	-5.81
5.1.32	-5.24



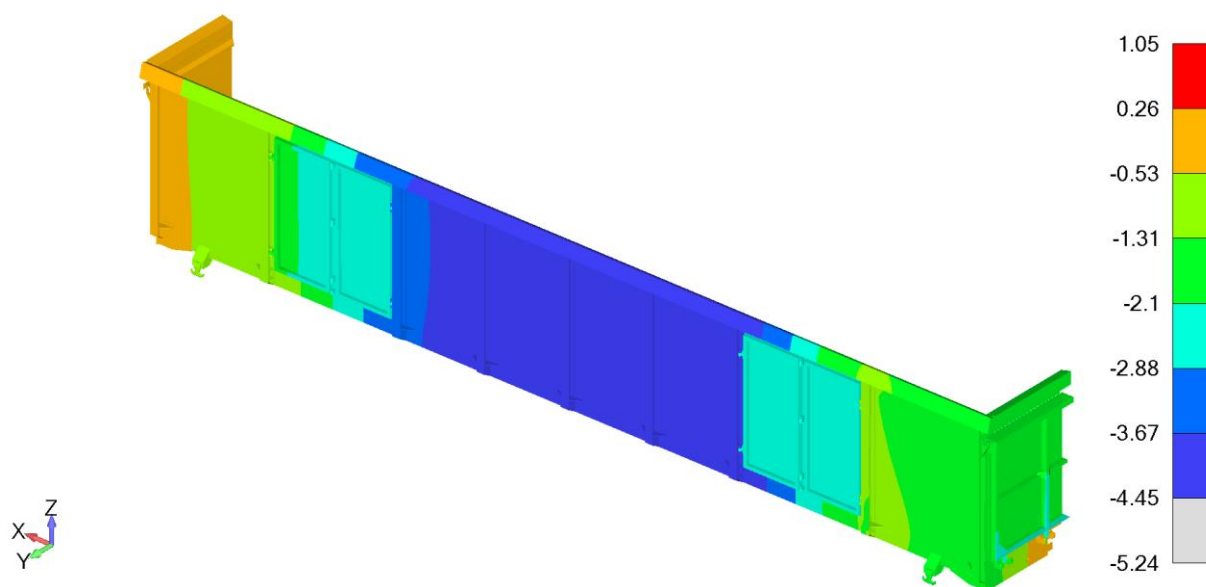
Слика 5.1.27 Поље вертикалног померања (коначни елемент љуске)



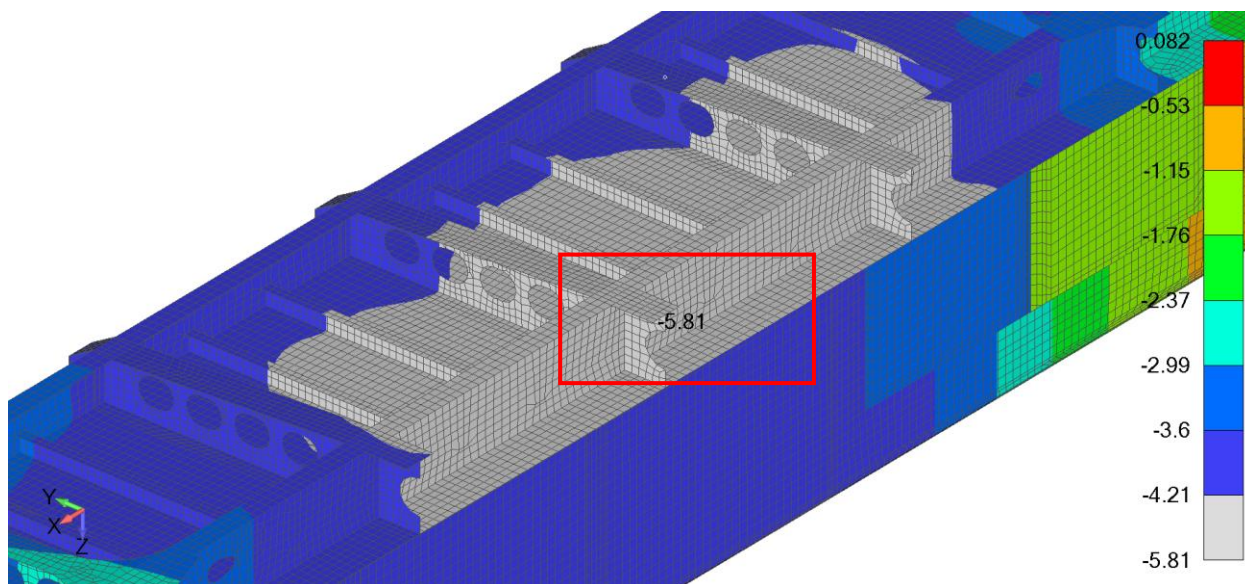
Слика 5.1.28 Поље вертикалног померања (3D коначни елемент)



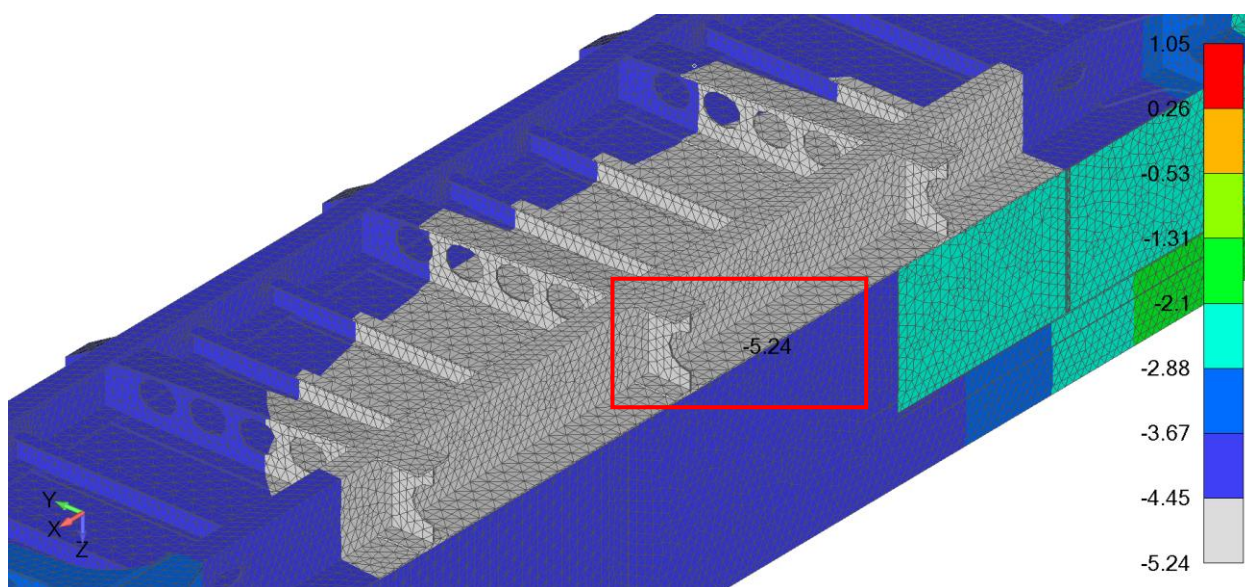
Слика 5.1.29 Поље вертикалног померања (коначни елемент љуске)



Слика 5.1.30 Поље вертикалног померања (3D коначни елемент)



Слика 5.1.31 Место максималног вертикалног померања (коначни елемент љуске)



Слика 5.1.32 Место максималног вертикалног померања (3D коначни елемент)

Поље расподеле померања у вертикалном правцу добијени анализом модела 3D коначних елемената се у великој мери поклапају са резултатима анализе модела коначних елемената љуске, при истим граничним условима и оптерећењима.

6. Закључак

Развијањем МКЕ и рачунара остварене су могућности у погледу решавања динамичких проблема, па су многи комерцијални софтвери имплементирали модуле за динамичку анализу конструкција. Главни циљ овог рада било је упознавање са радом и могућностима примене софтвера LS-DYNA.

LS-DYNA је вишенаменски софтвер за експлицитну и имплицитну нумеричку интеграцију нелинеарних динамичких анализа конструкција и као такав налази велику примену при симулацијама судара. У овом раду извршена је нумеричка симулација налетања теретних вагона применом МКЕ. Мрежа модела је креирана применом различитих типова коначних елемената у софтверу FEMAP, а припрема и подешавање модела за даљу динамичку анализу извршена је у софтверу LS-DYNA.

У раду су дате основне теоријске поставке везане за МКЕ, као и методе за интеграцију нелинеарних диференцијалних једначина које су имплементирани у софтверу LS-DYNA. За нелинеарне проблеме решење је могуће одредити само нумерички. Постоје две методе директне интеграције диференцијалних једначина кретања: имплицитном и експлицитном методом. У раду су изнете битне чињенице које се тичу стабилности решења као и методе за одређивање временског корака, који ће задовољити дефинисане критеријуме. Временски корак код решавања нелинеарних динамичких проблема експлицитном методом мора бити што мањи и његова величина има велику улогу на дивергенцију решења. У групу нелинеарних проблема спадају и контакти. Велики број контактних алгоритама је развијено и имплементирано у софтвер LS-DYNA, а познавање и подешавање њихових параметара има велику улогу на валидност анализе. Примена софтвера показана је на примеру налетања вагона, где је детаљно дат опис картица и параметара који фигуришу у улазној датотеци LS-DYNA. Пример који је анализиран у овом раду требало би да послужи као вежба за све оне који желе да се баве симулацијама судара у области великих деформација.

За успешну анализу конструкција, веома је битна примена адекватних материјалних модела, који ће на веродостојан начин опонашати особине материјала при деформисању. Постоји велики број развијених и имплементираних материјалних модела у софтверу LS-DYNA, од којих су овде коришћена четири типа: линеарни и нелинеарни еластични модели којим се симулирају греде и опруге, затим *Mohr-Coulomb* материјални модел којим се описује понашање грануларних материјала као и модел којим се описује нелинеарно понашање материјала у области пластичности.

Идеја овог рада је била да се упореди време, потребно да се изврши комплетна анализа налетања вагона применом коначних елемената љуске и 3D коначних елемената, узимајући у обзир време креирање мреже и време прорачуна, а затим да се упореде резултати анализе. На основу досадашњег искуства креирања мреже помоћу 3D коначних елемената и коначних елемената љуске, закључује се да је потребно мање времена за креирање мреже модела применом 3D елемената у односу на коначне елементе љуске. Међутим, време прорачуна вагона креираног помоћу 3D коначних елемената у LS-DYNA-и је далеко пута већа од времена анализе модела креираног коначним елементима љуске. Главни разлог је тај, да модел креиран помоћу 3D садржи

много већи број елемената, односно чворних тачака од модела који се састоји од коначних елемената љуске. За тачније резултате анализе, потребно је користити тетраедарске коначне елементе са међучворовима. Анализа таквих модела захтевају веће рачунарске ресурсе, због далеко већег броја чворова који утичу на дужину трајања анализе. Свака симулација стабилности је компромис између профитабилности и тачности. Стога корисник мора бити свестан предности и недостатака различитих врста коначних елемената коришћених при моделирању у зависности од сврхе симулације.

Познавање контакта и подешавање њихових параметара има велику улогу у анализи конструкција. Софтвер LS-DYNA, садржи велики број имплементираних контактних алгоритама, али у раду су дати само они контакти који су коришћени у анализи. Тако да даљи рад на ову тему био би проширивање области примене софтвера, пре свега у области контактних проблема, као и многих других као што је динамика флуида, провођење топлоте итд.

Литература

- [1] Р. С. М. Ж. Н. Г. М. Којић, Метод коначних елемената 1 - Линеарна анализа, Крагујевац: Машински факултет, 2010.
- [2] К.-J. Bathe, Finite Elements Procedures, Second Edition up., USA, 2016.
- [3] Т. J. R. Hughes, The finite element method. Linear static and dynamic finite element analysis, Prentice Hall , 1987.
- [4] J. Hallquist, LS-DYNA Theoretical Manual, California, California: Livemore CA, 1998.
- [5] L. S. T. Corporation, LS-DYNA Support, CA, USA, 2015.
- [6] L. S. T. Corporation, LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I, CA, USA, 2001..
- [7] L. S. T. Corporation, LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II, Livemore CA, USA, 2001.
- [8] Т. Belytschko, Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2000.
- [9] Femap, Finite Element Modeling and PostProcessing Application FEMAP v12, Siemens, 2019.
- [10] LS-DYNA, LS-PrePost-4.5-A New Post Processor for Use LSDYNA, California: Livemore, 2014.
- [11] К. B. M. Kojic, Inelastic Analysis of Solids and Structures, Springer Verlag.
- [12] M. Gasic, Transport equipment, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljevo: University of Kragujevac, 1997.
- [13] E. 1. -. R. applications, Structural requirements of railway vehicle bodies, European Standard., 2010.
- [14] Aleksandar Disić, Miroslav Živković, Snežana Vulović, Impact (buffing) test analysis of four-axle open top freight wagon with high sides series Eass-z(K), Centar za inženjerski softver i dinamička ispitivanja, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2014