



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И
ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ

Небојша М. Богојевић

**РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА
СИМУЛАЦИЈЕ ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА
ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА**

Докторска дисертација

Краљево, 2015. год.

**ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

| | |
|--|--|
| <i>I. Аутор</i> | |
| Име и презиме: <i>Небојша Богојевић</i> | |
| Датум и место рођења: <i>19.3.1974. Краљево</i> | |
| Садашње запослење: <i>асистент на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву</i> | |
| <i>II. Докторска дисертација</i> | |
| Наслов: <i>Развој методе за оцену квалитета симулације динамичког понашања железничких возила</i> | |
| Број страница: 216 | |
| Број слика: 95 | |
| Број библиографских података: 96 | |
| Установа и место где је рад израђен: <i>Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Краљево</i> | |
| Научна област (УДК): | <i>Железничко машинство (629.4.027.4:625.143(043.3))</i> |
| Ментор: <i>проф др Војкан Лучанин</i> | |
| <i>III. Оцена и одбрана</i> | |
| Датум пријаве теме: | 25.9.2012. год. |
| Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: | 1/6 9.1.2013. год |
| Комисија за оцену подобности теме и кандидата: проф др Мирослав Демић, ред. проф, проф др Срђан Русов, ред. проф, проф др Драган Петровић, ван. проф, проф др Златан Шошкић, ван. проф, проф др Војкан Лучанин, ред. проф | |
| Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације: проф др Срђан Русов, ред. проф, проф др Драган Петровић, ван. проф, проф др Златан Шошкић, ван. проф, проф др Војкан Лучанин, ред. проф | |
| Датум одбране дисертације: | |

Захваљујем се својој породици на несебичној
подршци током израде овог рада.

РАЗВОЈ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА СИМУЛАЦИЈЕ ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА

Резиме

Експериментална испитивања железничких возила представљају најпоузданији начин за утврђивање њихових својстава и пресудни критеријум за одобрење њихове експлоатације. Међутим, експериментална испитивања су обимна, дуготрајна и скупа, па су алтернативни методи, који се користе током пројектовања возила, од највећег интереса. У том циљу се развијају нумеричке симулације кретања железничких возила, које на основу математичког модела возила и колосека омогућавају израчунавања динамичких величина у временском и фреквентном домену.

Циљ овог истраживања је дефинисање методологије за валидацију модела динамичког понашања железничког возила. Придржавајући се препоруке тренутно важећих стандарда за експериментална испитивања динамичког понашања железничког возила (UIC 518 и EN14363), а на основу досадашњих истраживања верификације и валидације модела железничких возила и нумеричких модела уопште, предложена је нова метрика за оцену валидности нумеричког модела железничког возила. Предложена валидациона метрика оцену о слагању резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем формира на основу поређења кумулативних функција вероватноћа изабраних величина за поређење. У оквиру дисертације дефинисана је валидациона хијерархија, валидациона метрика, величине за поређење и граничне вредности валидационе оцене за прихватање валидности нумеричког модела.

Предложена методологија валидације примењена је на модел железничког возила за превоз руде гвожђа типа „Fanoo 040“. Резултати валидације модела добијени методологијом предложеном у овој дисертацији дати су упоредо резултатима добијеним методологијом валидације предложене у оквиру пројекта “DYNOTrain”. Новопредложена валидациона метрика омогућава да се изврши објективна оцена слагања резултата симулације и експеримента за сваку од изабраних величина за поређење. Анализом добијених резултата показано је да новопредложена методологија валидације поставља строжије услове валидације у односу на методологију валидације приказане у оквиру пројекта “DYNOTrain”. Валидација модела извршена коришћењем новопредложене методологије даје могућност да се смањи обим експерименталних испитивања.

Кључне речи: валидација, моделирање, симулација, експериментално испитивање

DEVELOPMENT OF METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF SIMULATIONS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF RAILWAY VEHICLES

Abstract

Experimental investigations of railway vehicles represent the most reliable way to determine their properties and decisive criterion for the approval of their exploitation. However, experimental tests are extensive, time-consuming and expensive, so alternative methods, which are used in the design of vehicles, are of the greatest interest. With this goal are developed numerical simulations of the dynamic behavior of railway vehicles that, on the basis of mathematical models, allow calculation of dynamic values in the time and frequency domain.

The aim of this study is to define a methodology for the validation of models of railway vehicles dynamics. By adhering to the recommendations of actual standards for experimental investigation of the dynamic behavior of railway vehicles (UIC 518 and EN14363), and based on previous research of verification and validation of railway vehicles model and numerical models in general, a new validation metrics is proposed for assessment of the numerical models of railway vehicles. The proposed validation metrics assesses the agreement between the results obtained by simulation and experimental testing on the basis of comparison between cumulative probability functions of the assessment quantities. In this dissertation is defined the validation hierarchy, validation metrics, assessment quantities and validation limits for estimation of acceptance of a numerical model of a railway vehicle.

The proposed methodology was applied to the validation of a model of railway wagon of type "Fanno 040", which is used for transport of iron ore. The results obtained with the methodology for model validation proposed in this thesis are compared to the results obtained by the methodology proposed in the international project "DYNOTrain". The newly proposed validation metrics enabled an objective assessment of the agreement between simulation and experimental results for each of the selected assessment quantities. The obtained results showed that the newly proposed methodology for validation of model of railway vehicles represents a more severe estimation of agreement between the simulation and experimental results than the metrics proposed in the project "DYNOTrain". Model validation performed using the newly proposed methodology provides an opportunity for reduction of the volume of expensive experimental tests.

Keywords: validation, modeling, simulation, experimental investigation

Садржај

| | |
|--|-----------|
| Номенклатура..... | 1 |
| 1 Увод..... | 6 |
| 2 Валидација и верификација модела | 9 |
| 2.1 Увод..... | 9 |
| 2.2 Модел, верификација и валидација..... | 11 |
| 2.3 Активности верификације..... | 16 |
| 2.4 Активности валидације | 17 |
| 2.5 Валидациона хијерархија | 19 |
| 2.6 Експеримент намењен за валидацију..... | 20 |
| 2.7 Валидациона метрика | 21 |
| 2.8 Значај валидације у области железничког машинства..... | 24 |
| 3 Преглед метода за валидацију модела..... | 28 |
| 3.1 Категоризација валидационих метода | 28 |
| 3.1.1 Графичке методе валидације модела | 29 |
| 3.1.2 Методе валидација поређењем својстава сигнала..... | 30 |
| 3.1.2.1 Средња апсолутна грешка..... | 31 |
| 3.1.2.2 Средња квадратна грешка | 31 |
| 3.1.2.3 Раселова метрика | 31 |
| 3.1.2.4 Спраг и Гир метрика..... | 32 |
| 3.1.2.5 EARTH метрика | 33 |
| 3.1.3 Методе валидације базиране на функцијама вероватноће | 35 |
| 3.1.3.1 Колмоогов-Смирнов метрика..... | 35 |
| 3.1.3.2 Андерсон-Дарлинг метрика | 36 |
| 3.1.3.3 Кулбак-Лајблерова дивергенција | 36 |
| 3.1.3.4 Валидациона метрика базирана на површинама | 36 |
| 3.1.4 Методе валидације модела базиране на тестирању хипотеза..... | 37 |
| 3.1.4.1 Студентов t-тест | 39 |
| 3.1.4.2 Пирсонов Хи-квадрат тест | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.4.3 | Фишеров F -тест..... | 43 |
| 3.1.5 | Методе валидације модела базиране на Бајесовој формули..... | 45 |
| 3.1.5.1 | Дефиниција условне вероватноће..... | 46 |
| 3.1.5.2 | Независност догађаја..... | 46 |
| 3.1.5.3 | Формула потпуне вероватноће и Бајесова формула..... | 47 |
| 3.2 | Преглед метода валидације модела железничког возила..... | 48 |
| 4 | Методологија валидације модела железничког возила..... | 58 |
| 4.1 | Валидациона метрика..... | 60 |
| 4.1.1 | Предлог нове валидационе метрике..... | 62 |
| 4.2 | Избор параметра за валидацију модела..... | 66 |
| 4.3 | Граничне вредности..... | 67 |
| 4.4 | Валидациона хијерархија..... | 68 |
| 5 | Моделирање железничких возила..... | 70 |
| 5.1 | Симулација динамичког понашања железничког возила..... | 70 |
| 5.2 | Вагон за превоз руде гвожђа..... | 72 |
| 5.2.1 | Претпоставке приликом формирања модела..... | 73 |
| 5.2.2 | Модел примарног вешајног система..... | 75 |
| 5.2.3 | Модел секундарног вешајног система..... | 77 |
| 5.2.4 | Модел везе обртног постоља са сандуком вагона..... | 80 |
| 5.2.5 | Осовински склоп..... | 81 |
| 5.3 | Модел колосека..... | 83 |
| 5.4 | Коефицијент трења у контакту точак шина..... | 87 |
| 5.5 | Неправилности колосека..... | 88 |
| 6 | Експериментално испитивање..... | 90 |
| 6.1 | Мерене величине и распоред мерних места..... | 90 |
| 6.2 | Профили точкова и шина..... | 91 |
| 6.3 | Траса колосека на којој је извршено експериментално испитивање..... | 94 |
| 6.4 | Резултати испитивања..... | 95 |
| 7 | Имплементација валидационе метрике..... | 97 |
| 7.1 | Избор деоница за валидацију..... | 97 |
| 7.2 | Натоварен вагон у кривини..... | 98 |
| 7.3 | Натоварен вагон на правцу..... | 105 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.4 | Празан вагон у кривини | 110 |
| 7.5 | Празан вагон на правцу | 116 |
| 7.6 | Граничне вредности валидационе оцене | 121 |
| 8 | Закључак | 123 |
| | Списак слика | I |
| | Списак табела | IV |
| | Прилог 1 | VI |
| | Прилог 2 | XV |
| | Прилог 3 | LVI |

НОМЕНКЛАТУРА

UIC – Union Internationale des Chemins de fer - Међународна железничка унија

EN - European Standard - Европске норме

ФП7 – The seventh framework programme - Седми оквирни програм

WP – work package – радни пакет

MAE - mean absolute error - средња апсолутна грешка

RMS – root mean square – средња квадратна вредност

RMSE - root mean square error - средња квадратна грешка

RMSD - root-mean-square deviation - средња квадратна девијација

MAE - mean absolute error - Средња апсолутна грешка

ANOVA – поступак анализе варијанси поређених сигнала

SCDF – кумулативне функције вероватноће формиране од података добијених симулацијом

ECDF – кумулативне функције вероватноће формиране од података добијених експерименталним испитивањем

e_i – грешка

p_i – вредности сигнала добијене експерименталним мерењем

s_i – вредности сигнала добијене симулацијом

M_R – разлика амплитуда два поређена сигнала према Раселовој валидационој метрици

P_R – корелација између фаза два поређена сигнала према Раселовој валидационој метрици

M_{SG} – одступања између амплитуда два поређена сигнала према Спра и Гир валидационој метрици

P_{SG} – разлика између фаза два поређена сигнала према Спра и Гир валидационој метрици

C_{SG} – разумљиви фактор одступања

DTW – Алгоритам динамичке трансформације времена (*Dynamic Time Warping*)

$Errorr_{mag}$ – разлика у амплитудама поређених сигнала према EARTH валидационој метрици

$Errorr_{phase}$ – разлика у амплитудама поређених сигнала према EARTH валидационој метрици

$Errorr_{topology}$ – Разлика облика два поређена сигнала према EARTH валидационој метрици

PDF – Функција густине вероватноће

CDF – Кумулативна функција густине вероватноће

d – Колморгонов-Смирнов валидациона оцена

AD – Андерсон - Дарлинг валидациона оцена

$\omega(x)$ - Тежинска функција

D_{KL} - Кулбак-Лајблерова валидациона оцена

pmf - *probability mass function* – Функција вероватноће дискретних сигнала

$D(F, S_n)$ – Ферсон – Оберкампф валидациона оцена

$F(x)$ – Функција вероватноће промелјиве добијене симулацијом

$S_n(x)$ - Функција вероватноће промелјиве добијене експерименталним испитивањем

H_0 – Нулта хипотеза

H_1 – Алтернативна хипотеза

\bar{x} – Средња вредност

α – Грешка прве врсте

β – Грешка друге врсте

γ – Снага теста

p – Праг значајности

sd – Стандардна девијација

sg - Стандардна грешка

t - Студентова статистика

df - Статистички број степени слободе

F_s – Фишера статистика

Ω - Скуп свих догађаја

E - Расподела случајних променљивих

P - Вероватноћа променљивих

Y – Сила у бочном правцу у контакту точак шина
 Q – Сила у вертикалном правцу у контакту точак шина
 Y_{qst} - Квази-статичка сила у бочном правцу
 Q_{qst} - Квази-статичка сила у вертикалном правцу
 ΣY_{qst} – Сума квази-статичких сила у бочном правцу
 Y_{max} - Максимална вредност силе у бочном правцу
 Q_{max} - Максимална вредност силе у вертикалне силе
 $(Y/Q)_{max}$ - Максимална вредност односа сила у бочном и вертикалном правцу
 \ddot{y}_{rms}^* - RMS-вредност убрзања сандука вагона у бочном правцу
 \ddot{z}_{rms}^* - RMS-вредност убрзања сандука вагона у вертикалном правцу
 \ddot{y}_{max}^* - Максимална вредност убрзања сандука вагона у бочном правцу
 \ddot{z}_{max}^* - Максимална вредност убрзања сандука вагона у вертикалном правцу
 x – тест статистика за оцену разлика две кумулативне функције
 s_1, s_2 – варијансе променљиве
 d_1, d_2 - степени слободе променљивих
 M – оцена слагања средњих вредности две кумулативне функције
 OS – валидациона оцена
 \ddot{y}^* -Убрзања сандука вагона у бочном правцу
 \ddot{z}^* - Убрзања сандука вагона у вертикалном правцу
 \ddot{y}^+ -Убрзања бочном правцу на обртном постољу
 \ddot{z}^+ - Убрзања бочном правцу на обртном постољу
 Y_{I1}^1 – Сила у бочном правцу при чему је у експоненту означено са 1 водеће а са 2 вођено обртно постоље, са I у индексу је означена прва а са II друга осовина у обртном постољу док је са 1 и 2 у индексу означена сила на левом односно десном точку
 Q_{I1}^1 – Сила у бочном правцу при чему је у експоненту означено са 1 водеће а са 2 вођено обртно постоље, са I у индексу је означена прва а са II друга осовина у обртном постољу док је са 1 и 2 у индексу означена сила на левом односно десном точку
 $ctmba_z$ – Коефицијент пригушења између бочног носача и еластичног адаптера у z правцу

$kmba_z$ - Коефицијент крутости између бочног носача и еластичног адаптера у z правцу

$cmba_x$ - Коефицијент пригушења између бочног носача и еластичног адаптера у x правцу

$kmba_x$ - Коефицијент крутости између бочног носача и еластичног адаптера у x правцу

F – Сила

μ - Коефицијент трења

μ_0 – Статичка вредност коефицијента трења

μ_d – Динамичка вредност коефицијента трења

k - Крутост еластичног елемента

k_{zuyw} – Коефицијент крутости између клина и попречног носача

k_{zys} – Коефицијент крутости између попречног носача и бочног носача

k_{3zws} – Коефицијент крутости између клина и бочног носача у вертикалном правцу

k_{xws} – Коефицијент крутости између клина и бочног носача у подужном правцу

k_{f2yws} - Коефицијент крутости између клина и бочног носача у бочном правцу

N_{bw} – Нормална сила којом попречни носач делује на клин

N_{sfw} – Нормална сила којом бочни носач делује на клин

F_{ubw} – Сила трења између клина и попречног носача

F_{usfw} – Сила трења између клина и бочног носача

F_z – Сила у вертикалном правцу која делује на клин

k_{zrt} – Крутост колосека у вертикалном правцу

k_0 - Статичка вредност крутости у вертикалном правцу

f_s - Фреквенција преласка возила преко прагова

k_{yrt} – Коефицијент крутости између шине и прага у бочном правцу

c_{yrt} – Коефицијент пригушења између шине и прага у бочном правцу

k_{zrt} – Коефицијент крутости између шине и прага у вертикалном правцу

c_{zrt} – Коефицијент пригушења између шине и прага у вертикалном правцу

k_{ytg} – Коефицијент крутости између прага и земљаног трупа у бочном правцу
 c_{ytg} — Коефицијент пригушења између прага и земљаног трупа у бочном правцу
 k_{ztb} – Коефицијент крутости између прага и застора у вертикалном правцу
 c_{ztb} – Коефицијент пригушења између прага и застора у вертикалном правцу
 k_{zbg} – Коефицијент крутости између застора и земљаног трупа у вертикалном правцу
 c_{zbg} - Коефицијент пригушења између застора и земљаног трупа у вертикалном правцу
 $H(f)$ – Динамичка крутост колосека у вертикалном правцу
 \ddot{y}^*1I - Убрзање на раму сандука вагона изнад водећег обртног постоља у хотизонталном правцу
 \ddot{z}^*1I - Убрзања на раму сандука вагона изнад водећег обртног постоља у вертикалном правцу
 \ddot{y}^*1II – Убрзање на раму сандука вагона изнад вођеног обртног постоља у хотизонталном правцу
 \ddot{z}^*1II – Убрзање на раму сандука вагона изнад вођеног обртног постоља у вертикалном лном правцу
 $\ddot{y}^+11, \ddot{y}^+21$ – Убрзања у бочном правцу на крајевима бочних носача на водећем обртном постољу
 $\ddot{y}^+31, \ddot{y}^+41$ – Убрзања у бочном правцу на крајевима бочних носача на вођеном обртном постољу
 Y_{11}, Y_{12} – Силе у контакту точак-шина у хоризонталном правцу на точковим на водећој осовини водећег обртног постоља
 Q_{11}, Q_{12} – Силе у контакту точак-шина у вертикалном правцу на точковим на водећој осовини водећег обртног постоља
 Y_{21}, Y_{22} – Силе у контакту точак-шина у хоризонталном правцу на точковим на вођеној осовини водећег обртног постоља
 Q_{21}, Q_{22} – Силе у контакту точак-шина у вертикалном правцу на точковим на вођеној осовини водећег обртног постоља
 \ddot{u}_a – Убрзање у бочном правцу водеће осовине на водећем обртном постољу

1 УВОД

Са развојем рачунара у употребу су ушли различити нумерички модели за симулацију квазистатичког и динамичког понашања возила у различитим условима. На основу тих нумеричких модела могуће је предвидети понашање возила у различитим ситуацијама, што је од највећег научног и техничког интереса када експериментално испитивање није могуће или је економски неисплативо (нпр. при истраживању исклизнућа железничког возила са шина).

За предвиђање понашања железничких возила користе се модели израђени у различитим софтверским пакетима као што су MatLab, UmLab, Simpack, Nucars, Medina, Gensys, итд. Валидација софтверских пакета се најчешће врши применом тестова, као што су Manchester Benchmark 1 и 2, док је метода валидације и валидација различитих модела железничких возила парцијално дефинисана од стране различитих истраживача [1,2,3,4,5], у зависности од параметара који су били од интереса приликом формирања модела и изучавања понашања реалног система.

Различити модели за симулацију динамичког понашања вагона дају резултате који се у већој или мањој мери разликују. Обзиром да се резултати симулација и експерименталних испитивања никада не могу потпуно поклопити, поставља се питање у којој мери резултати одређеног модела могу релевантно да представе реално понашање железничког возила.

С обзиром да је главни циљ досадашњих истраживања применом симулације кретања био проучавање феномена везаних за кретање железничких возила, нису чињени систематски напори посвећени развијању јединствених критеријума за оцену квалитета симулације. Међутим, свесни значаја тог питања, низ аутора је у оквиру својих истраживања кретања железничких возила независно развијао различите методе валидације и верификације резултата симулације.

У почетној фази интензивне примене симулације кретања железничких возила, током прве половине претходне деценије, методи валидације и верификације су заснивани на поређењу временских промена сигнала добијених симулацијом и експерименталним мерењима. У те сврхе су кориштени сигнали убрзања сандука железничког возила и сигнали сила у вешајном систему возила. Најважнији пример таквог приступа проблему верификације и валидације резултата симулације у фреквентном домену је дат у референци [3].

Стохастички карактер сигнала, међутим, чини оцену временских записа кориштених сигнала сложеном, па су у другој половини претходне деценије развијани методи поређења мерних сигнала у фреквентном домену. Најважнији резултати везани за верификацију и валидацију резултата симулације у фреквентном домену су дати у референцама [2 – 4].

На значај и важност, као и на потребу, дефинисања јединствене методологије верификације и валидације нумеричких модела железничких возила указују радови водећих истраживача у овој области као што су S. Stichel [6], M. Berg [7], S.D. Iwnicky [8] и други.

Једну од најобимнијих истраживања у области валидације и верификације модела железничких возила извршена је у оквиру радног пакета WP-5 „Model building and validation“ ФП7 пројекта „DynaTrain“ .

У циљу дефинисања методологије за оцену квалитета симулације динамичког понашања железничких возила, у овој дисертацији су строго дефинисани појмови валидације и верификације модела, а затим је извршен преглед методологија валидације и валидационих метрика. Основни циљ тога посла је развој теоретских основа за формирање нове валидационе метрике која би се могла применити за оцену слагања резултата нумеричке симулације и експерименталног испитивања при кретању железничких возила.

Основни циљ дисертације је дефинисање методологије валидације модела железничких возила, што подразумева дефинисање параметара, граничних вредности и валидационе метрике за оцену квалитета симулације динамичког понашања железничких возила.

Развијена методологија валидације примењена ја за валидацију модела вагона за превоз руде гвожђа, при чему су поређени резултати добијени нумеричком симулацијом и резултати експерименталног испитивања железничког возила. Нумерички модел железничког возила је формиран у софтверском пакету „Gensys“. Да би се минимизовале грешке обраде сигнала, исти софтверски пакет је кориштен за обраду сигнала добијених и симулацијом и експерименталним испитивањем у складу са препорукама UIC-а.

Експериментално испитивање железничког возила за превоз руде гвожђа извршено је од стране предузећа „Interfleet“ из Солне (Шведска), при чему ће у овом раду бити кориштени необрађени резултати из два теста, и то за експериментално испитивање натовареног и празног железничког возила.

Резултати валидације модела железничког возила за превоз руде гвожђа према новопредложеној метрици су поређени са резултатима валидације методологије чији је аутор О. Polach [10], а који су проистекли из истраживања спроведених у оквиру ФП7 пројекта „DynaTrain“.

Предложена валидациона метрика је примењена за поређење резултата добијених симулацијом и са резултатима експерименталних испитивања кретања натовареног и празног возила на правцу и у кривини.

Поређењем резултата валидационе метрике коју је предложио О. Polach и новопредложене метрике, на основу сигнала у просторном домену и на основу одговарајућих кумулативних функција вероватноће, извршена је анализа њихове применљивости.

2 ВАЛИДАЦИЈА И ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА

2.1 Увод

Нумерички модели за симулацију понашања механичких система заузимају све значајнију улогу, како у области пројектовања, тако и у предвиђању понашања система у различитим експлоатационим условима. Са проширењем могућности да се моделирају различите појаве и феномени, са употребом једноставнијих и лакших интерфејса за моделирање система и релативно ниском ценом рачунарске технике, употреба модела за предвиђање понашања механичких система је све већа. Нумерички модели за предвиђање понашања знатно смањују време развоја нових и унапређења старих система, а поред тога отварају могућност предвиђања понашања у случајевима када није могуће, или је веома скупо, извршити експериментално испитивање реалног механичког система.

Са све већом употребом нумеричких модела за симулацију понашања механичких система, поставља се питање: „Колико су тачна предвиђања понашања посматраног система на основу развијеног модела?“. Најчешће се тачност предвиђања одређује поређењем резултата добијених из нумеричких модела са експерименталним испитивањем посматраног система, када је то могуће. Поређења се најчешће приказују у форми x -у дијаграма, дводимензионих контура и слично.

Приликом оцене слагања резултата суочавамо се са два основна питања:

- Када сматрамо да постоји добро слагање између експерименталних резултата и резултата добијених нумеричким моделима?
- Која је мера слагања?

Апсолутни стандарди за валидацију модела, који би се могли применити на све моделе и за све услове у којима желимо да изучавамо понашање реалних објеката или система, не постоје. Хтели то или не, валидација одређеног модела зависи од тога где и како ће се тај модел употребити у даљем истраживању. Због свега наведеног, валидација модела је још увек отворено питање.

На пример, један модел механичког система може бити задовољавајући приликом пројектовања прототипа јер показује одговарајући тренд понашања система, док тај исти модел може бити потпуно неупотребљив за предвиђање понашања система

у реалним условима. Такође, одређени модел може бити сасвим задовољавајући за предвиђање понашање система у статичким и квази-статичким условима, док за предвиђање понашања система у динамичким условима развијени модел није прихватљив.

Генерално гледајући, приликом валидације модела успоставља се корелација између резултата добијених предвиђањем-симулацијом и резултата добијених експерименталним испитивањем. Да би модел могао довољно добро да предвиђа понашање реалног објекта, потребно је да резултати симулације понашања модела буду што је могуће ближе резултатима испитивања.

Валидација модела је итеративан процес чији су основни кораци:

1. Дефиниција критеријума за валидацију модела,
2. Поређење резултата симулације и резултата испитивања,
3. Подешавање параметара модела.

Након извршене валидације модела потребно је резимирати резултате валидације, наводећи да ли посматрани модел може представљати физички систем за:

1. Одговарајућу намену,
2. Одговарајући систем или класу система,
3. Одговарајуће експлоатационе услове.

Једном када је извршена валидација, модел се може користити уместо експерименталног испитивања реалног система за предвиђање понашања у условима за које је извршена валидација модела. Модел се не може користити за предвиђање понашање система за услове који нису обухваћени у процесу валидације.

Секвенца планирања, експерименталног испитивања, обраде и анализе података потребних за валидацију модела, представља дуготрајан и временски захтеван процес. Валидација модела је оправдана само у случајевима када се може добити вишеструка корист од развијеног модела. Оправданост развијања и спровођења процеса верификације и валидације модела зависи од времена и труда потребног да се изврши валидација, као и трошкова и могућности да се изврше додатна експериментална испитивања. Уколико је модел намењен за ограничене услове и за предвиђање понашања система за ограничени опсег – домен интересовања, треба размотрити опцију да се изврше додатна експериментална испитивања. Међутим, уколико је модел намењен да предвиђа понашање у великом броју различитих експлоатационих услова, значајно смањујући трошкове настале додатним експерименталним испитивањима или елиминишући потенцијално опасна експериментална испитивања, онда су развој и валидација модела оправдани.

Трошкови развоја и валидације модела могу знатно да варирају, па у неком случају да буду чак и већи од трошкова експерименталног испитивања. Трошкови

валидације зависе од природе посматраног система и модела над којим се врши валидација, од намене модела, врсте система који се представља моделом, од услова за који модел треба да предвиди понашање система, од доступних алата да се изврши валидација, као и од услова под којима се могу извршити потребна експериментална испитивања потребна за валидацију модела. Генерално гледајући, највећи део трошкова везаних за валидацију модела може бити умањен кроз добро планиран експеримент, намењен валидацији посматраног система за одређене експлоатационе услове.

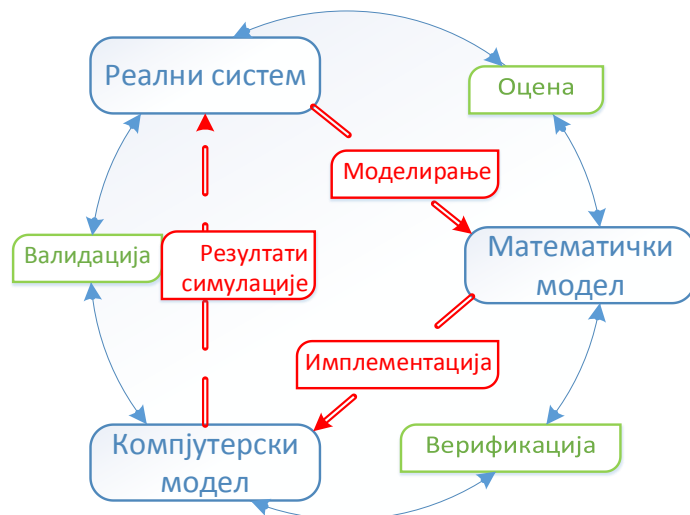
Процес валидације модела најчешће захтева планирање експеримента намењеног искључиво валидацији модела, у коме се прикупљају подаци за величине које често нису од интереса приликом стандардног експерименталног испитивања. Из тих разлога су анализа и обрада података приликом валидације модела често знатно сложеније од оних које су потребне при експерименталним испитивањима намењеним проучавању динамичког понашања железничких возила. Примена симулације кретања железничких возила, према томе, отвара велике могућности у железничком машинству, али захтева допунске напоре који могу довести у питање њихову оправданост. Методе за валидацију модела играју одлучујућу улогу у процени њихове употребљивости, што њихово изучавање ставља у жижу савремених теоријских истраживања у динамици железничких возила.

2.2 МОДЕЛ, ВЕРИФИКАЦИЈА И ВАЛИДАЦИЈА

Процес формирања, верификације и валидације модела механичког система је први пут представљен 1979 год. од стране „Друштва за компјутерске симулације“ (Society for Computer Simulation). Упрошћени приказ процеса верификације и валидације модела дат је на слици 2-1 у виду “Sargent Circle”[11].

Питање валидације модела је веома сложено и вероватно постоји онолико мишљења о валидацији модела колико има и истраживача који се баве овом проблематиком. У овом раду, посебна пажња је посвећена аспекту валидације модела - процес упоређивања резултата добијених симулацијом понашања модела и резултата добијених експерименталним испитивањима.

Очекивани резултат процеса верификације и валидације модела је квантитативна оцена о слагању резултата експерименталних испитивања и резултата добијених симулацијом, као и оцена у којој мери развијени модел тачно представља реални систем.



Слика 2-1. Графички приказ процеса валидације и верификације модела

Процес верификације и валидације модела је итеративни процес који се понавља онолико пута док се не постигне задовољавајућа тачност и прецизност у поступку развијања нумеричког модела.

Реални систем, приказан на Сlici 2-1, представља физички систем, склоп, део или проблем који се проучава.

Математички модел обухвата концептуални модел, одговарајући математички запис и друге потребне податке да би се нумерички описао реални систем [11],[12],[13]. Модел је најчешће описан у форми диференцијалних једначина, законима физике, геометријом и граничним условима потребним да се дефинише понашање реалног система.

Компјутерски модел представља имплементацију једначина развијених у математичком моделу, најчешће у облику нумеричке дискретизације, алгоритама и критеријума конвергенције.

Процес у коме се одређују битне особине физичког система као и начин на који ће одабране особине бити математички представљене у оквиру математичког модела назива се *моделирање*.

Процес *верификације* се у највећој мери фокусира на идентификацију и уклањање грешака у процесу софтверске имплементације математичког и рачунарског модела [11]. Верификација може даље бити подељена у *верификацију рачунарског кода* и *верификацију прорачуна*. *Верификација рачунарског кода* фокусира се на проналажење и исправљање грешака насталих приликом описивања модела у неком од софтверских пакета. Верификација прорачуна бави се оценом грешака насталих приликом извршења софтверског кода за одређену симулацију. Најважнија активност верификације прорачуна је провера конвергенције резултата прорачуна, односно, могућности да се прорачуни изврше са финијом мрежом или

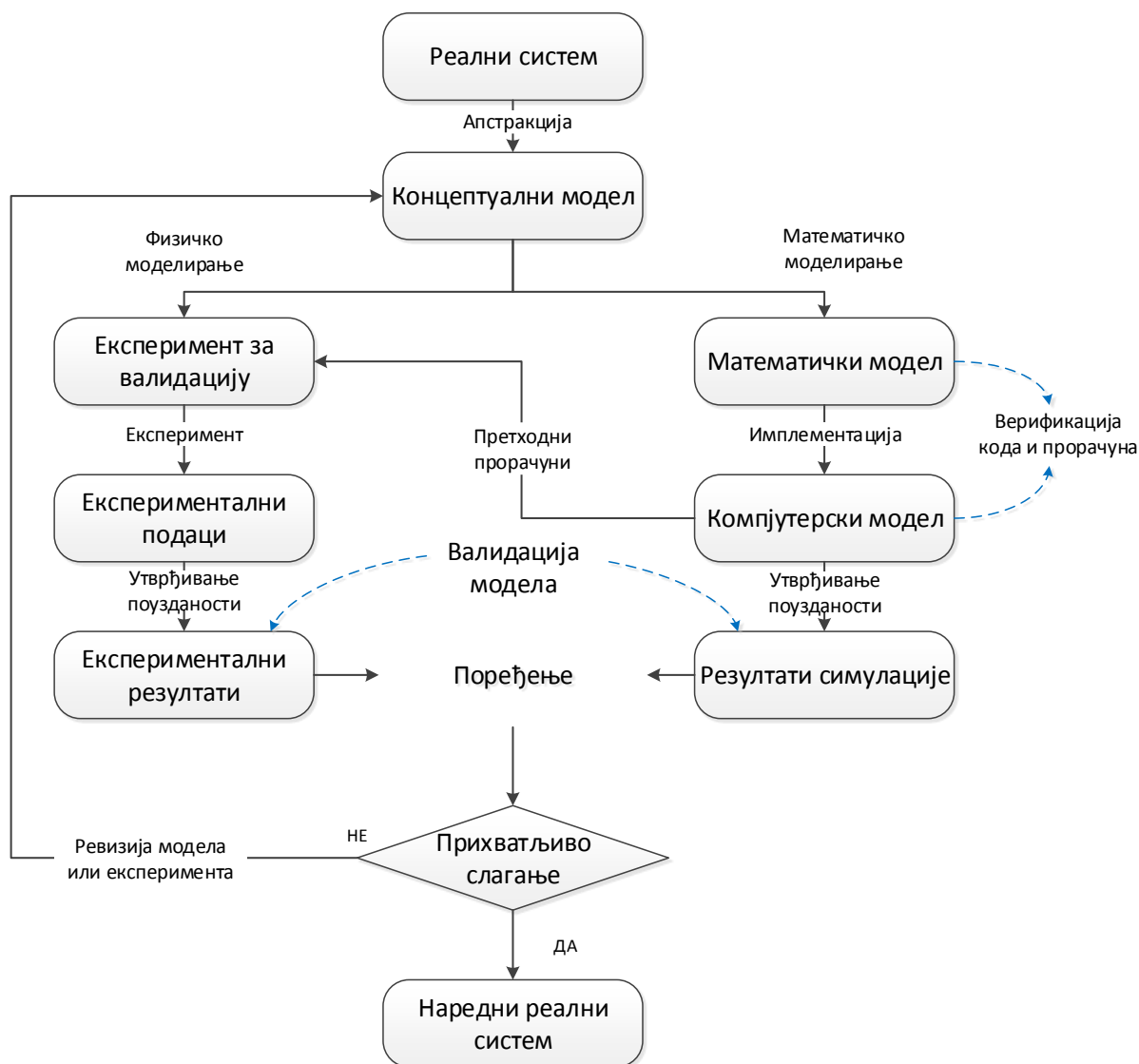
мањим временским кораком док се не постигне решење у прихватљивим границама, односно са унапред задатим толеранцијама.

Као завршна фаза, активности *валидације* покушавају да формирају оцену тачности модела поређењем резултата експеримента са резултатима симулације добијеним из одговарајућег компјутерског модела. Валидација је активност која се спроводи све док се модел или експеримент унапређује, или док се проширује број значајних параметара којима се реални систем описује [12], [13].

Док су на слици 2-1 приказани основни концепти, на слици 2-2 детаљније је приказан процес развоја, верификације и валидације модела, где лева грана илуструје процес прикупљања експерименталних података, док је десном граном приказан процес формирања математичког модела.

Математички модел, приказан на слици 2-1, може се приказати кроз *концептуални модел* и *математички модел*, као што је приказано на слици 2-2. Концептуални модел представља један апстрактни модел чија је основна намена да се опише и боље разуме понашање посматраног објекта или система. У идеалном случају, у фази развоја концептуалног модела учествују, истовремено, инжењери задужени за развој математичког модела као и тим одговоран за експериментално испитивање реалног система. Развој концептуалног модела захтева да се идентификују циљеви, захтевани ниво слагања између резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем, област за коју се развија модел, сви релевантни физички процеси, претпоставке, ограничења, као и да се дефинише валидациона метрика (величине које ће бити мерене и које представљају основу за поређење резултата добијених симулацијом и експериментом).

Након што је формиран *концептуални модел*, са једне стране се приступа планирању експеримента–*експеримент за валидацију*, а са друге стране се формира *математички модел*. Као што је већ речено, математички модел представља скуп математичких једначина којима се описује физички објекат. У механици, математички модел садржи законе одржања масе, момената и енергије, дефиниције просторног и временског домена, почетне и граничне услове као и конститутивне једначине битне за формирање модела.



Слика 2-2. Приказ процеса валидације и верификације модела

Компјутерски модел представља математички модел у форми погодной за компјутерско представљање, најчешће у нумерички дискретизованом облику, описом одговарајућим алгоритмима, потребним параметрима за нумеричке апроксимације и критеријуме конвергенције. Компјутерски модел садржи компјутерски програм – код, концептуални модел, одговарајуће математичке апроксимације и претпоставке, конститутивне моделе и улазе, одговарајуће опције за решавање математичких проблема као и толеранције у којима се захтева решење математичких проблема [11].

Након формирања компјутерског модела потребно је утврди какав утицај имају улазни параметри модела на резултате симулације. Овај утицај се најчешће утврђује у оквиру утврђивања стабилности развијеног модела.

Сврха *експеримента за валидацију* је да се обезбеде информације за валидацију модела. Због тога је потребно да се разумеју све уведене претпоставке, да се добро планира и контролише сама реализација експеримента.

Након дефинисања експеримента за валидацију, приступа се извођењу експеримента, током кога се прикупљају подаци са различитих сензора. Овако прикупљени *експериментални подаци* представљају необрађене податке (подаци над којима нису примењена никаква нумеричка обрада). Типични подаци који се прикупљају приликом експерименталног испитивања механичких система су механички напони, убрзања и помераји у временском или просторном домену.

После утврђивања прецизности предложеног експерименталног метода, односно, утврђивања колико је сам експеримент осетљив на промену појединих параметара битних за реализацију експеримента, прилази се обради података и формирају се *подаци за оцену* (енглески „assessment quantities”). Одступања овако добијених података од предвиђања модела представљају основ за валидацију модела.

Уколико су квантитативна поређења резултата симулације и резултата експеримента, дефинисана на основу претходних тестирања, сагласна у унапред усвојеним границама, процес валидације и верификације модела је завршен.

Претходни прорачуни, приказани на слици 2, представљају веома битну везу између планирања валидационог експеримента и процеса формирања модела. Успостављање везе између планирања експеримента и израде модела, већ у првим корацима, може дефинисати значајне величине, које ће се пратити током експеримента и у фази моделирања. Када су одређене значајне величине, даљи процес извођења експеримента, као и процес моделирања и симулације се изводе независно, све до момента када се формирају подаци за поређење.

Уколико поређење резултата експеримента и симулације није у прихватљивим границама, приступа се процесу ревизије модела или се, уколико је то потребно и могуће, врши ревизија и експеримента и модела. Ревизија модела представља процес у коме се допуњују или мењају основне претпоставке модела, структура модела, бирају групни или допуњују већ постојећи параметри, мењају гранични услови и/или почетни услови у циљу постизања бољег слагања експерименталних резултата и резултата симулације. Ревизија експеримента представља промену плана реализације експеримента, промену процедура или начина мерења појединих величина ради олакшавања поређења експерименталних резултата са резултатима симулације применом ревидираног модела. Која врста ревизије ће бити извршена зависи од заједничке процене тимова који су укључени у процесе верификације, валидације и извођења експеримента.

Веома често није могуће добити одговарајућу сагласност резултата симулације и експеримента већ у првој итерацији, па се најчешће процес приказан на слици 2 понавља неколико пута. Такође, уколико се у току процеса валидације и

верификације модела утврди да је потребно увести нови параметар за оцену, а да при томе тај параметар није могуће добити једноставном обрадом добијених података, онда се цео поступак валидације и верификације понавља.

2.3 АКТИВНОСТИ ВЕРИФИКАЦИЈЕ

Верификација је процес, у коме се утврђује, да ли је извршена добра имплементација концептуалног модела [11]. Приликом верификације модела је корисно процес поделити на делове (Табела 1), препознајући основне функције софтверског пакета као и развоја модела, са тежњом да се оформи што бољи модел, који има добру поновљивост резултата и даје решења у прихватљивим границама тачности [13].

Табела 1. Активности процеса верификације модела

| Врста | | Фокус | Одговорност | Методe |
|------------------------|--|---|---------------------|---|
| Верификација софтвера | Осигурање квалитета софтверског пакета | Поузданост и робусност | Програмер | Развој различитих конфигурација компјутерског модела, избор нумеричких метода, итд... |
| | Верификација нумеричког алгорита | Тачност нумеричког алгорита | Програмер и моделар | Провера аналитичких решења, поређења са постојећим моделима, итд.. |
| Верификација прорачуна | Оцена нумеричке грешке | Оцена нумеричке тачности решавања једначина | Моделар | Конвергенција решења једначина и сл. |

Верификација софтвера има за задатак да утврди да ли софтверски пакет који се користи за формирање модела, ради на начин на који је предвиђено. Основни фокус ове активности је, да се утврде и елиминишу грешке које настају приликом формирања и имплементације софтверског пакета (*осигурање квалитета софтверског пакета*) и да обезбеди тачност решавања нумеричких алгоритама,

који су имплементирани у софтверском коду. Због тога је одговорност за проверу ове активности додељена програмеру.

Сврха *верификације прорачуна* је да се утврде вредности грешке настале нумеричким решавањем одговарајућих једначина којима је описан модел, као и да оцени грешке, настале услед конвергенције решења формираног система једначина, за дати модел. Наведене врсте грешака могуће је утврдити у активности верификације прорачуна и у знатној мери их смањити увођењем боље дискретизације простора или времена приликом нумеричког решавања једначина, прилагођавањем услова конвергенције решења, изменом погрешних улазних података и/или променом методе решавања система једначина. Погрешни улазни подаци и недовољна дискретизација простора и/или времена за решавање система једначина, имају највећи утицај на смањење грешака, приликом верификације прорачуна.

Најчешће коришћени метод за верификацију прорачуна је поређење резултата прорачуна за задати проблем добијених коришћењем различитих софтверских решења. Проблем који се јавља приликом овакве верификације кода се огледа у томе што за различите софтверске пакете најчешће није могуће дефинисати граничне услове, или дефинисати цео модел, на исти начин. Чак и када се добију слични резултати прорачуна за исте моделе, овако спроведена верификација не даје потврду да су резултати прорачуна тачни. Описана методологија поређења софтверских пакета може бити прихваћена као одговарајућа само у одсуству других метода верификације кода.

Обзиром да се нумеричка грешка не може потпуно уклонити, циљ верификације прорачуна је да оцени нумеричку тачност модела. Верификација прорачуна треба да буде документована, доступна и поновљива.

2.4 АКТИВНОСТИ ВАЛИДАЦИЈЕ

Валидација представља процес у коме се утврђује у ком степену развијени модел тачно представља реални систем са аспекта његове даље намене. Циљ процеса валидације је да се квантификује ниво поверења у способност нумеричког модела да предвиди понашања физичког система.

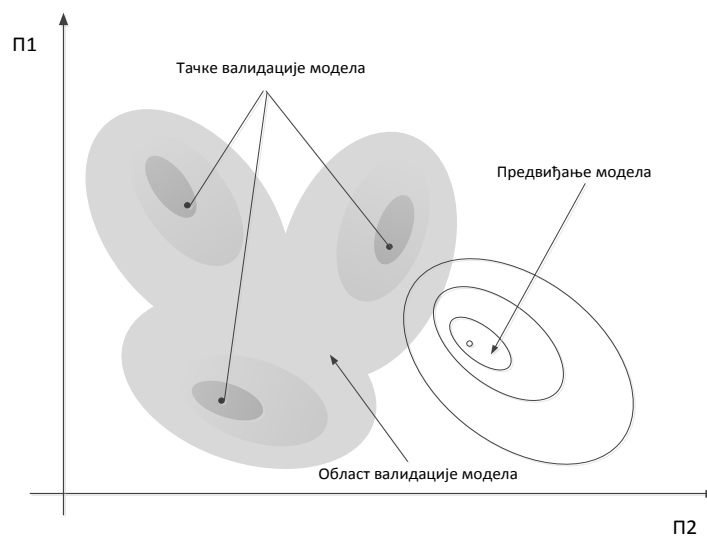
Класичан приступ валидацији модела је поређење резултата симулације са резултатима валидационог експеримента. Мера слагања резултата најчешће се оцењује израчунавањем одступања (грешке) између резултата симулације модела и експерименталних података. Појава мерних грешака у експерименту и нумеричких грешака током симулације само додатно компликује процес валидације модела и уводи додатну несигурност.

Дефиниција валидације модела, дата у претходним параграфима, захтева појашњења појединих фраза. Фраза „представља процес у коме се утврђује“, у суштини, значи да је процес валидације процес који траје док се не оствари жељено слагање резултата симулације и експерименталних резултата. Процес валидације, може, у специјалним случајевима, да се заврши након првог поређења резултата, али најчешће је потребно извршити неколико итерација, након промена и усклађивања параметара модела.

Фраза „у ком степену“ значи да у резултатима симулације и у резултатима експеримента постоје грешке, настале као случајне или систематске грешке мерења. Због тога је неопходно да се резултати мерења и симулације, као и оцена њиховог слагања, искажу у одговарајућим границама.

На крају, фраза „са аспекта његове даље намене“ значи да се валидација модела, врши за одређени домен, сагласно расположивим улазним подацима и параметрима модела. Ова чињеница у значајној мери, ограничава употребу модела за предвиђање понашања реалног система.

Веза између домена валидације модела и најчешће области где се користе предвиђања моделом, приказана је на слици 3, за модел са два параметра П1 и П2.



Слика 2-3. Област валидације и предвиђања за модел са 2 параметра П1 и П2

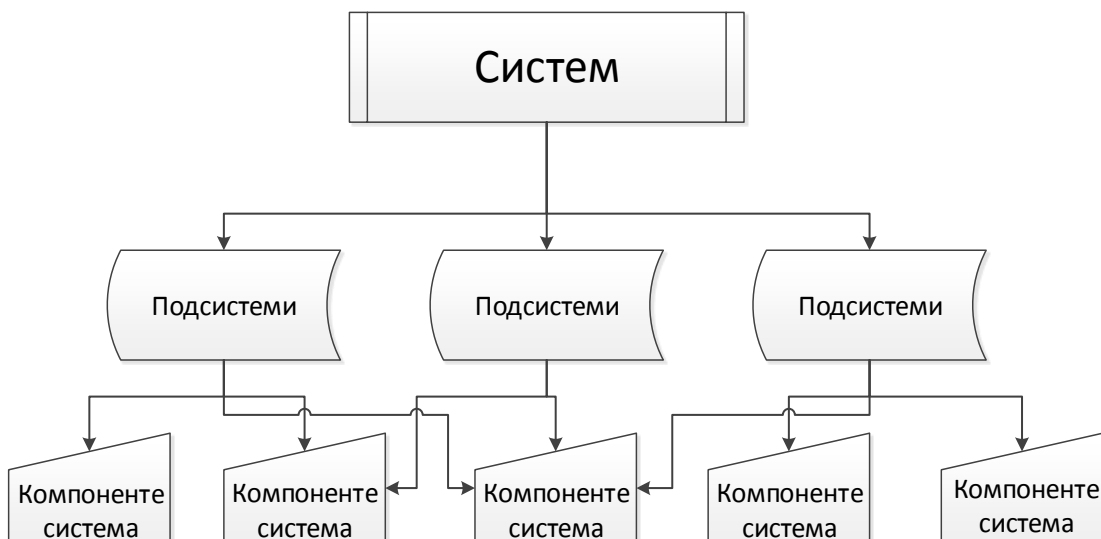
Важно је напоменути, да процес подешавања параметара модела, у циљу побољшања слагања резултата симулације и експерименталних резултата, сам по себи не представља валидацију модела. Активност подешавања параметара назива се *калибрација модела*, и представља део фазе изградње модела, а не процеса валидације модела.

2.5 ВАЛИДАЦИОНА ХИЈЕРАРХИЈА

Реални – физички систем, приказан на слици 2-2, представља сложен систем. који се састоји од низа мањих подсистема и компонената, од којих сваки може бити посебно моделиран и валидиран. У пракси је најчешће заступљен приступ валидације комплетног модела поређењем резултата симулације и експерименталног испитивања целокупног система [14]. Овакав приступ у неким случајевима, када се ради о моделима са великим бројем подсистема и компоненти, када су везе између елемената комплексне, и када је дисипација енергије велика, може бити неадекватан. Уколико је слабо слагање резултата симулације и експеримента, може бити тешко, а врло често и готово немогуће, изоловати поједине подсистеме и компоненте и утврдити узрок неслагања резултата. Чак и у случајевима када је слагање резултата симулације и експеримента добро, често није могуће у потпуности извршити валидацију модела и његових подсистема.

Валидациона хијерархија је приказана на слици 2-4, и првенствено зависи од комплексности физичког система, од сложености развијеног модела, и од начина реализације експеримента за валидацију. У основи, слика 4 приказује начин декомпозиције комплексног система на низ основних физичких проблема. Број нивоа и компоненти зависи од комплексности развијеног модела и реалног система.

У хијерархијском приступу валидације модела свака компонента и сваки подсистем представљају реални систем за себе, за који је потребно извршити валидацију. На сваком од приказаних нивоа је потребно је извршити валидацију тако да се валидација изврши прво за сваку компоненту, након тога за сваки подсистем, па на крају и за цео комплексни реални систем.



Слика 2-4. Валидациона хијерархија

2.6 ЕКСПЕРИМЕНТ НАМЕЊЕН ЗА ВАЛИДАЦИЈУ

Експерименти се најчешће изводе да би се унапредило разумевање физичког објекта који се проучава, да би се унапредио математички модел, боље одредили параметри модела и/или оценило понашање компоненти и подсистема посматраног физичког система. Генерално, подаци добијени из овако организованих експеримента, најчешће нису довољно добри да би се са њима извршила валидација модела. Недостатак документације о појединим параметрима, недостатак информација о условима под којим су се изводили експерименти, неадекватни мерни опсези, или недовољна или непозната тачност мерења појединих параметара су најчешћи узроци зашто традиционални експерименти нису адекватни за валидацију модела.

С обзиром да је немогуће извршити апсолутно тачно мерење, приликом извођења експеримента за валидацију потребно је установити и квантификовати грешку мерења сваке мерене величине понаособ. Грешка мерења и поузданост добијених резултата треба да обухвати утицај променљивости свих релевантних параметара на експериментално испитивање, као што су неодређености у конструкцији (укључујући толеранције), заостале напоне у конструкцији и слично.

У експерименталним испитивањима грешке настале током мерења можемо класификовати у две основне групе, и то као случајне и систематске грешке. Систематске грешке су грешке, које при поновљеним мерењима остају константне, или се мењају по одређеном закону. Оне могу бити условљене недостацима методике мерења или нетачношћу формула за рачунање (методичке грешке), а такође и несавршеношћу мерних уређаја (грешке уређаја). Ове грешке увек имају исти знак, те се увођењем одређене корекције могу, у доброј мери, отклонити. При томе, повећање броја мерења неће смањити систематску грешку. Случајне грешке су последица многобројних различитих и променљивих узрока, који се не могу контролисати и између којих, у општем случају, не постоји никаква корелација. Случајне грешке прате сва мерења и не могу се отклонити, као што је то изводљиво код систематских грешака. Међутим, захваљујући чињеници да за случајне грешке важе статистички закони расподеле, при великом броју мерења, увек се могу одредити границе, унутар којих се налази права вредност мерене величине са изабраном вероватноћом.

Истраживачи из “Sandia National Laboratories”[15] су формулисали следећих шест препорука, у циљу формирања одговарајућег експеримента за валидацију:

Препорука 1: Експеримент за валидацију треба да дефинишу истраживачи који су учествовали на развијању математичког модела, пројектанти система који се изучава, истраживачи који су задужени за дефинисање и извођење експеримента.

Препорука 2: Експеримент за валидацију треба да буде организован и спроведен тако да се прикупе све релевантне информације које су предмет интересовања,

параметри који су релевантни за формирање модела, сва ограничења реалног објекта у мери у којој је то могуће.

Препорука 3: Експеримент за валидацију треба да тежи да нагласи повезаност – интеракцију између рачунског и експерименталног приступа решавања проблема.

Препорука 4: Треба тежити да се дефиниција експеримента за валидацију изврши кооперативно, али, са друге стране, треба да постоји независност у добијању резултата симулацијом и експериментом.

Препорука 5: Одговарајућа хијерархија експерименталног мерења би требала да се успостави током експеримента за валидацију и то на тај начин да се изврше мерења од глобалних до локалних параметара.

Препорука 6: Експеримент за валидацију треба да буде тако организован да је могуће утврдити прецизност и тачност мерења.

2.7 ВАЛИДАЦИОНА МЕТРИКА

Приликом валидације модела, посебно код сложених система, обрађују се велике количине података из којих је потребно издвојити најзначајније информације за процес валидације. Избор и опис изабраних величина за процес валидације у великој мери зависи од захтева дефинисаних избором домена за који се врши валидација модела.

Избор параметара за валидацију мора бити пажљиво извршен на основу модела и експеримента за валидацију. Величине којима се изабрани параметри описују такође зависе од начина на који се врши валидација модела, од особина изабраних параметара у временском и фреквентном домену, од особина улазних параметара и од низа других утицајних величина. Овако изабрани параметри се могу даље поредити и користити као валидациона метрика, или што је чешће у употреби, може се извршити њихова даља математичка обрада за изналажење величина које су погодне за поређење.

Валидациона метрика представља основу за поређење резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем [15]. Веома је битно да се она дефинише у раним фазама планирања изградње модела и валидационог експеримента. Формирана у раној фази формирања концептуалног модела и валидационог експеримента, валидациона метрика даје могућност да се правилно одаберу параметри и величине параметара за валидацију модела.

Након што се изврши избор параметара за валидацију, потребно је дефинисати меру која ће приказати разлику између предвиђања понашања система добијених математичким моделом и резултата добијених експерименталним испитивањем.

С обзиром да постоји велики број истраживача, данас се користи велики број начина поређења резултата добијених симулацијом и резултата добијених експерименталним испитивањем, како субјективних, тако и објективних метода поређења. Субјективне методе поређења оцену валидације квалитативно исказују стручњаци, док се код објективних метода поређења оцена валидације исказује квантитативно резултатима одговарајућих математичких процедура.

Субјективна поређења су првенствено везана за визуелна поређења различитих величина добијених симулацијом и експерименталним испитивањем. Предност субјективних метода поређења је брзина којом се долази до резултата валидације. Нажалост, резултати оваквих поређења у великој мери зависе од искуства истраживача, па оцене истих резултата, које су дали различити стручњаци, показују велику несагласност [65].

У групу објективних метода поређења спадају методе које користе различите математичке мере за установљавање разлике између резултата предвиђања понашања система, добијених симулацијом и резултата добијених експерименталним испитивањем система. Уобичајене мере за установљавање разлика су корелациони коефицијенти, крос-корелациони коефицијенти, методе разлика и друге пондерисане и непондерисане норме. Овако дефинисане мере се најчешће називају „дистанца“ између резултата предвиђања понашања модела симулацијом и резултата добијених експерименталним испитивањем реалног система. Важно је напоменути да код ових метода поређења такође постоји субјективност која се огледа у избору граничних вредности које ће одредити да ли је посматрани модел валидан.

Као што је већ наведено, метрика представља меру неслагања између резултата добијених симулацијом и резултата добијених експерименталним испитивањем. Пожељно је да метрика буде интуитивна за примену, како за инжењере, тако и за руководиоце пројеката. Постоји низ пожељних особина које би метрика требала да поседује, а које су дефинисане од низа истраживача [14], [15], [17], [18]. Неке од пожељних особина валидационе метрике, које су опште су:

- Домен валидације треба да се у што већој мери поклапа са доменом применљивости математичког модела,
- Применљивост на скаларе,
- Применљивост на векторе,
- Детерминистички карактер,
- Пожељно је да метрика осликава разлику између предвиђања и експерименталних података у целом опсегу посматраних величина, односно, метрика би требало да буде осетљива не само на промене у средњим вредностима, средње квадратне вредности, или варијансе.
- Физичке јединице – тренутно постоје два мишљења о јединицама у којима треба да се искаже метрика. Заговорници једног од њих струје предлажу да

се разлика искаже у физичким јединицама у којима су исказани параметри који се пореде. Други приступ је да се разлика искаже у нормализованим или статистичким јединцима.

- Објективност мере – најчешћи извор неслагања у оцени ваљаности – прихватању модела, огледа се у субјективности током оцене модела. Објективност подразумева да ће предложена метрика, за исте скупове посматраних података, дати увек исту оцену, без обзира на субјекат који примењује изабрану метрику. Субјективност, у већој или мањој мери, ће увек бити присутна приликом формирања метрике, али треба тежити да се та субјективност смањи.
- Граничне вредности за прихватање ваљаности модела треба да буду независно дефинисане од предложене метрике
- Мишљење експерата – Приликом дефинисања граничних вредности за прихватање валидности модела пожељно је да се узме у обзир и мишљење експерата из одређене области
- Метрика треба да је осетљива на грешку – с обзиром да су грешке присутне како код експерименталног испитивања, тако и при симулацији, пожељно је да метрика укључује грешке и да је осетљива на њихове промене.
- Метрика треба да буде математички добро описана и разумљива. Пожељно је да се метрика заснива на мери у математичком смислу, односно на некој математичкој функцији која описује разлику између величина које се пореде. По дефиницији, математичка мера d има следеће особине [17]:
 - Ненегативност, $d(x, y) \geq 0$
 - Симетрија, $d(x, y) = d(y, x)$
 - Неједнакост троугла, $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$
 - Осетљивост на сваку разлику, $d(x, y) = 0$ ако и само ако је $x = y$

У појединим случајевима није могуће да метрика испуни све наведене захтеве, али је пожељно да има већину наведених особина. Метрика може бити употребљива и у случају да не испуњава наведене математичке услове. Уколико метрика није симетрична онда говоримо о „квазиметрици“. Уколико метрика не испуњава други и четврти услов онда се метрика назива „хемиметрика“, а уколико не испуњава услов неједнакости троугла метрику називамо „семиметрика“. Ако метрика не испуњава последњи услов онда говоримо о „псеудометрици“, а уколико метрика не испуњава услове симетрије и троугаоне неједнакости метрику називамо „праметрика“.

2.8 ЗНАЧАЈ ВАЛИДАЦИЈЕ У ОБЛАСТИ ЖЕЛЕЗНИЧКОГ МАШИНСТВА

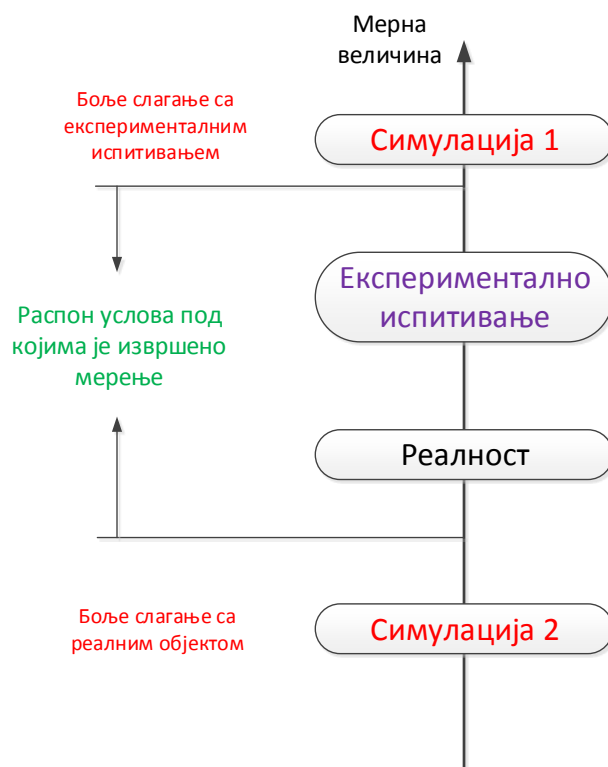
Врло често се поставља питање: „Због чега је потребно да се изврши валидација и верификација модела?“. Као што је приказано у овом поглављу, правилном верификацијом и валидацијом модела приказује се колико тачно, и са којом сигурношћу, је могуће да се предвиди будуће понашање система, а које се базира на резултатима добијених на основу развијеног модела.

У области железничког машинства врло често се користе различите врсте модела, од једноставних линеарних система са два и три степена слободе [19], [21], [23], па до изразито нелинеарних модела са неколико десетина степени слободе, за предвиђање понашања возила у различитим условима експлоатације. Значај употребе нумеричких модела у проучавању понашања железничких возила огледа се кроз:

- Предвиђање, у фази развоја и пројектовања, понашања возила у различитим експлоатационим условима, у циљу да се достигну прописани услови везани за квалитет вожње, вредности одговарајућих сила и убрзања,
- Анализу утицаја измена (како на самом возилу тако и на колосеку) на понашање возила у реалним условима,
- Анализу понашања возила у условима које није могуће, или би било веома опасно, извести приликом експерименталног испитивања реалног возила,
- Редуковање обима експерименталних испитивања

С обзиром да зависи од великог броја параметара и услова под којима се спроводи, експериментално испитивање врло често не одсликава у потпуности понашање железничког возила. Како се и приликом симулације понашања возила усваја велики број претпоставки, тако ни симулације не представљају у потпуности реални објекат, као што је то приказано на слици 2-6.

Треба напоменути да циљ валидације модела *није* да добијемо најбоље могуће слагање резултата симулације са експерименталним резултатима, већ да испитамо да ће развијени *модел адекватно-верно приказати* понашање реалног објекта, у овом случају железничког возила [16].



Слика 2-5. Однос симулације понашања, експерименталног испитивања и реалног понашања железничког возила

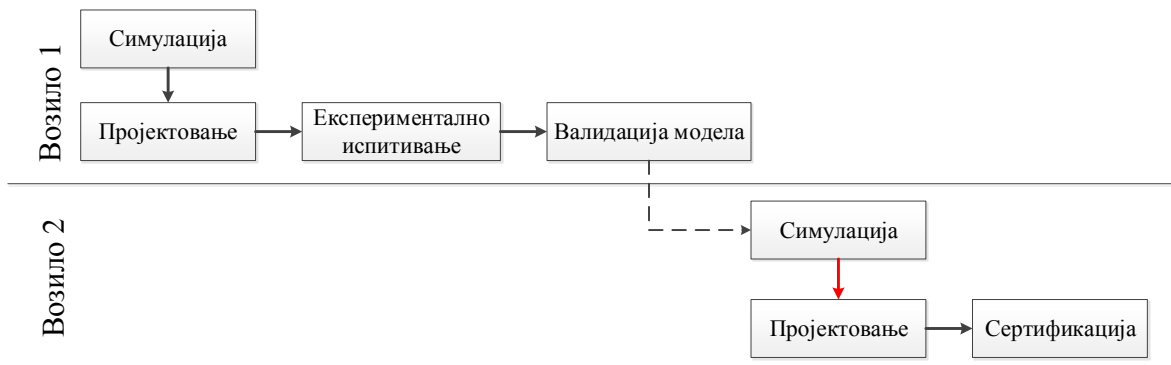
Експериментална испитивања железничких возила, у општем случају, су врло скупа и дуготрајна. Она изискују ангажовање великог броја људи, прецизну организацију, као и планирање испитивања. Поред тога, потребно је да се изврши испитивање колосека пре него што се изврши испитивање понашања железничког возила. Испитивање колосека са своје стране такође мора да задовољи одговарајуће прописе дефинисане међународним прописима [30], [31].

Произвођачи возила покушавају да експериментално испитивање, које је једини и основни услов за сертификацију возила према важећим прописима, сведу на најмањи могући обим. Пројектовање и сертификација возила се данас заснива мањим делом на симулацији понашања (симулацијом методом коначних елемената, симулацијом кретања система тела), а у много већој мери на експерименталном испитивању возила. Нажалост, приликом пројектовања новог возила, користи се веома мало повратних информација из експерименталних симулационих истраживања претходних модела. Уобичајена пракса је да се процесу пројектовања новог возила приступа од почетка, што је приказано на слици 2-7.



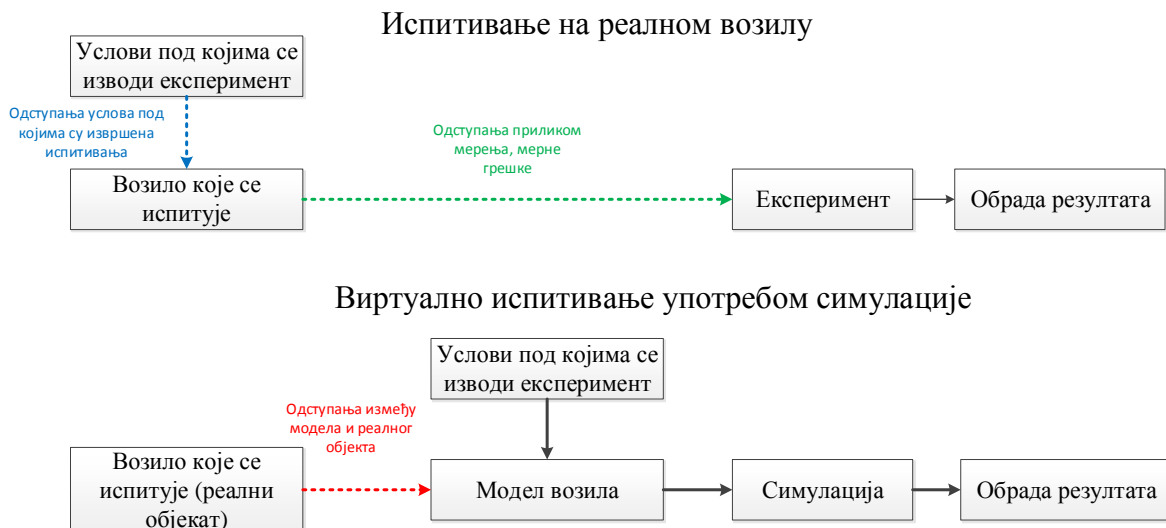
Слика 2-6. Тренутно место симулације понашања возила у пројектовању железничких возила

Увођење математичких модела у процес пројектовања и сертификације возила, отворило би могућност смањења, мада не и потпуног укидања, експерименталног испитивања.



Слика 2-7. Значај симулације у будућности у процесу пројектовања и сертификације железничких возила

Уколико би постојала добро дефинисана процедура за валидацију и верификацију нумеричких модела, било би могуће у појединим случајевима и потпуно извршити сертификацију возила [34] засновано на симулацији кретања, како је то описано сликом 2-8. Основа за умањење обима испитивања или, у ближој или даљој будућности, потпуно укидање експерименталног испитивања, заменом експеримента одговарајућом симулацијом - виртуалним тестирањем - према резултатима пројекта ФП7 “DynaTrain”, представља правилно и адекватно спроведен поступак валидације и верификације модела железничког возила. Уколико би модел железничког возила задовољио услове процедура валидације и верификације, онда би резултати симулације понашања модела или његових компоненти могли у потпуности да замене експеримент, како је то приказано на слици 2-9.



Слика 2-8. Испитивање на реалном објекту у односу на виртуално испитивање употребом симулације понашања возила

Валидација модела би требало да обухвати све, или бар највећи део грешака, које настају у процесу експерименталног испитивања, као и приликом симулације понашања возила, услове у којима је извршено експериментално испитивање и одговарајућа симулација понашања, као и стохастичку природу добијених резултата.

3 ПРЕГЛЕД МЕТОДА ЗА ВАЛИДАЦИЈУ МОДЕЛА

Валидација модела је поступак који се примењује у широком спектру моделирања различитих врста механичких система. Сложеност изграђеног модела и сложеност саме физичке појаве која се изучава и моделује у великој мери одређују и врсту валидационе методе која се примењује. Поред наведеног, постојање различитих врста грешака при експерименталном испитивању и при нумеричким симулацијама, као и најчешће присутна субјективност у процесу избора „погодног“ нумеричког модела у великој мери усложњавају процес валидације. Услед тога постоји велики број валидационих метода које се користе, а које зависе од врсте система за који се врши валидација, као и од домена у коме се врши процес валидације. Генерално гледајући, не постоји „златно правило“ које даје јасне смернице како треба извршити процес валидације модела механичког система, већ се процес валидације дефинише од случаја до случаја, од модела до модела.

Оцена динамичког понашања железничког возила врши се на основу прикупљања података о вредностима карактеристичних величина у временском домену при кретању возила у реалним, експлоатационим условима. У зависности од начина описивања веза и сложености, железничка возила се могу описати помоћу простих линеарних модела са малим бројем степени слободe, као и са изразито нелинеарним моделима са неколико десетина степени слободe. У овом истраживању пажња је усмерена на валидацију нелинеарних модела железничких возила са стохастичком побудом.

У оквиру овог поглавља дат је опис различитих техника који се користе за валидацију модела различитих механичких система, као и опис различитих валидационих метрика које су коришћене у процесима валидације.

3.1 КАТЕГОРИЗАЦИЈА ВАЛИДАЦИОНИХ МЕТОДА

Развоја великог броја сложених модела за предвиђање понашања различитих врста система условио је потребу за развојем метода верификације и валидације модела. С обзиром да се проблемима верификације и валидације модела бави велики број истраживача, постоји и велики број приступа за решавање овог проблема. Према врсти метрике која се користи, методе валидације модела се могу поделити у пет основних група, као што је то приказано на слици 3-1 [21, 22, 23].

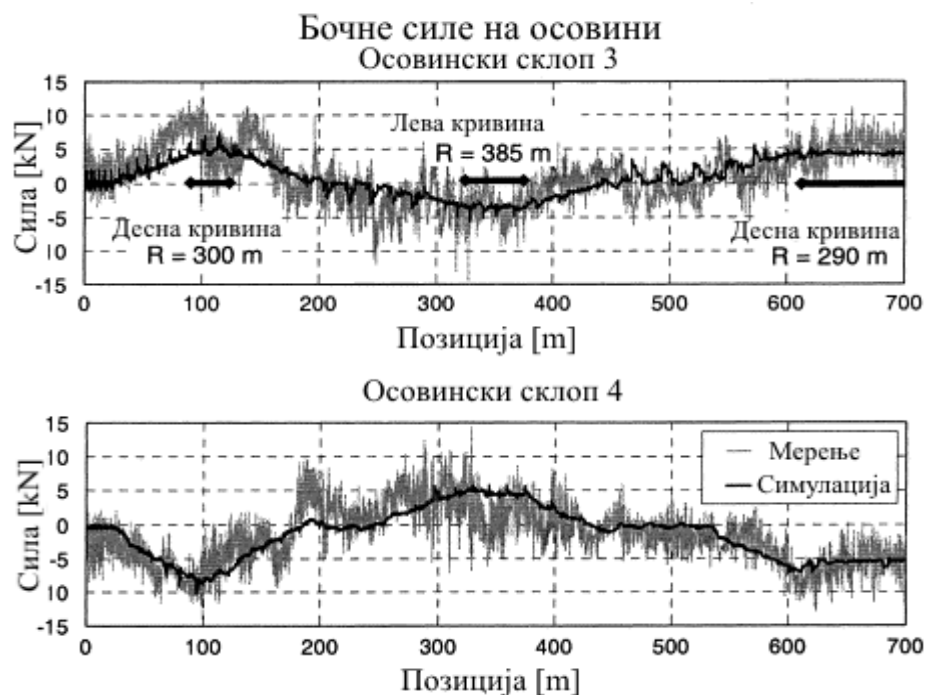


Слика 3-1. Категоризација валидационих метода

3.1.1 Графичке методе валидације модела

Графичке валидационе методе се заснивају на генерисању различитих дијаграма и њиховом интуитивном тумачењу. Код ове методе валидације тежња је да се вредности параметара добијених симулацијом и експерименталним испитивањем прикажу графиконима исте скале на једном дијаграму. Оцена сличности, најчешће два параметра, врши се визуелним упоређивањем графикона. Одлука да ли је модел валидан доноси се на основу уочених разлика међу графиконима. Поређења параметара су најчешће ограничена на један уски домен. Грешке мерења најчешће нису узете у обзир нити су исказане приликом валидације модела. Квантитативна оцена о разликама параметара приказаних на графиконима не постоји код ове методе. Одлука о валидности модела је стога изразито субјективна и заснива се на искуству истраживача који врши валидацију, односно поређење графикона.

У литератури се може наћи велики број примера за валидацију модела базирану на графичким методама. Типичан пример за валидацију модела графичким методама је приказан у референцама [32] и [33] као и у раду Polach-a [34], где је за развијени модел железничког возила - локомотиве валидација модела извршена поређењем у просторном домену сила на осовинским склоповима добијених експерименталним мерењем и симулацијом развијеног модела, као што је приказано на слици 3-2.



Слика 3-2. Поређење резултата добијених мерењем и симулацијом за силе на осовинском склопу локомотиве која се креће по колосеку са кривинама

3.1.2 Методе валидација поређењем својстава сигнала

Код ове валидационе методе оцена о подобности посматраног модела доноси се на основу квантитативне разлике између једног или више својстава сигнала којима се описује посматрани систем, нпр. на основу разлике амплитуда, фреквенци, средње квадратних вредности, средњих вредности, на основу разлике варијанси, и другог.

У оквиру ове методе постоји добар математички основ за формирање валидационе метрике, што омогућава њено коришћење за валидацију различитих врста модела, од оних који описују проблема хидрологије [35], преко термодинамике [36] и електротехнике [37], па до модела којима се изучавају понашања различитих врста механичких система [38]. С обзиром да се заснива на квантитативном поређењу величина, и да се користи за валидацију различитих врста модела, у оквиру ове методе је развијено неколико врста валидационих метрика.

Две најједноставније, и уједно најчешће коришћене, валидационе метрике за оцену слагања резултата симулације и експерименталних резултата које се користе у пракси су *средња апсолутна грешка (mean absolute error -MAE)* и *средња квадратна грешка (root-mean-square error – RMSE или root-mean-square deviation -RMSD)*. Наведене метрике се заснивају на једноставном математичком апарату, релативно су једноставне за употребу, и не захтевају много рачунског времена. Оцена слагања модела са реалним системом се једноставно исказује тако што је мања вредност изабране величине значи да модел верније приказује посматрани реални систем. Уколико би израчуната грешка била једнака нули то би значило да

имамо модел који верно приказује реални систем, што је готово немогуће постићи у реалним условима.

3.1.2.1 Средња апсолутна грешка

Средња апсолутна грешка (*mean absolute error –MAE*) представља усредњену разлику разлику између вредности добијених симулацијом и мерењем [36].

Ако је са p_i означена вредност добијена симулацијом а са s_i мерена вредност посматране величине, тада се грешка може изразити на следећи начин:

$$e_i = |p_i - s_i| \quad (3-1)$$

при чему је средња апсолутна грешка дефинисана следећом једначином:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - s_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (3-2)$$

3.1.2.2 Средња квадратна грешка

Средња квадратна грешка (*root-mean-square error –RMSE или root-mean-square deviation - RMSD*) описује разлику између резултата предвиђања добијених моделом и резултата експерименталних истраживања према следећој дефиницији [37]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (p_i - s_i)^2} \quad (3-3)$$

Поред оцене валидности модела, представљене метрике се врло често користе за регресиону анализу, као и при оптимизацији параметара модела тражењем минимума грешке. Израчунавање средње апсолутне грешке и средње квадратне грешке представљају обавезне поступке приликом анализе варијанси – АНОВА методе, као и при статистичкој оцени модела [37].

3.1.2.3 Раселова метрика

Раселова (*Russell*) метрика се базира на оцени грешака у амплитудама и фазама два сигнала у временском домену [38]. Разлика између амплитуда два сигнала према овом методу се изражава на следећи начин:

$$M_R = \text{sgn}(M) \log_{10}(1 + |M|) \quad (3-4)$$

где је:

$$M = \frac{(\sum p_i^2 - \sum s_i^2)}{\sqrt{\sum p_i^2 \sum s_i^2}} \quad (3-5)$$

при чему је:

- p_i вредност добијена предвиђањем,
- s_i вредност добијена мерењем

Ако је са $p(t)$ означена вредност добијена симулацијом, а са $s(t)$ мерена вредност посматране величине, тада се могу формирати следећи интеграл:

$$\begin{aligned} v_{pp} &= (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \\ v_{ss} &= (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt \\ v_{ps} &= (t_2 - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)s(t) dt \end{aligned} \quad (3-6)$$

при чему $(t_2 - t_1)$ представља временски интервал у коме се врши поређење сигнала.

Према Раселовој метрици, за утврђивање разлике између два временска сигнала није довољно израчунати само разлику међу њиховим амплитудама, већ је потребно одредити и корелацију међу фазама, која може да се одреди следећом једначином:

$$P_R = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{v_{ps}}{\sqrt{v_{pp}v_{ss}}} \right) \quad (3-7)$$

3.1.2.4 Спраг и Гир метрика

Спраг и Гир (Sprague and Geer) метрика [38] се заснива на поређењу сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем у временском домену користећи:

- Одступања (разлику) амплитуда
- Одступања (разлику) фаза
- Разумљиви фактор одступања (Comprehensive Error Factor)

У литератури се може наћи неколико варијанти ове метрике [38, 39, 40], а у даљем тексту ће бити приказана само најновија верзија Спраг и Гир валидационе метрике [41].

Према овом метрици се одступања међу амплитудама поређених сигнала могу изразити на следећи начин:

$$M_{SG} = \sqrt{\frac{v_{ss}}{v_{pp}}} - 1 \quad (3-8)$$

који није осетљив на разлику фаза два сигнала, и који се заснива на поређењу површина испод квадрираних вредности сигнала добијених симулацијом и експерименталним мерењем у временском домену. Члан “-1” омогућује да разлика у амплитудама буде једнака нули у случају да су посматране површине једнаке.

Разлика међу фазама се може изразити на следећи начин:

$$P_{SG} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{v_{ps}}{\sqrt{v_{pp}v_{ss}}} \right) \quad (3-9)$$

који је, са друге стране, неосетљив на разлику међу амплитудама.

Разумљиви фактор одступања се може изразити као:

$$C_{SG} = \sqrt{M_{SG}^2 + P^2} \quad (3-10)$$

Идеја Спраг и Гир метрике је покушај да се оцена валидности модела сведе на један коефицијент који ће у себи садржати оцену одступања амплитуда и фаза два сигнала.

Предност Спраг и Гир метрике огледа се у томе што се сличност посматраних сигнала процењује једним јединственим бројем-фактором који у себи садржи оцену неколико појединачних фактора.

У литератури [42] се предлаже да гранична вредност приказаних фактора, како код Раселове метрике тако и код Спраг и Гир метрике, буде вредност 0,2, односно да вредности предложених фактора мање од граничне вредности значе да постоји проихватљива сагласност између модела и понашања физичког објекта у посматраном домену.

Недостатак претходне две метрике огледа се у томе да нису симетричне, па тако резултати поређења два сигнала у великој мери зависе од избора референтног сигнала. Поред тога, фактори који описују разлике међу амплитуда и међу фазама сигнала нису у потпуности изоловани-независни.

3.1.2.5 EARTH метрика

У циљу да издвоји утицаје појединачних величина, Sarin и сарадници [43] су формирали *EARTH* валидациону метрику, која приликом поређења два сигнала узима у обзир три фактора и то:

- Фактор разлике амплитуда
- Фактор разлике фаза
- Топологију – облик, односно нагиб, криве

При одређивању разлике амплитуда два поређена сигнала прво је потребно умањити неслагања између сигнала у временском домену користећи *Dynamic Time Warping (DTW)* [44] алгоритам, након чега се фактор неслагања изражава на следећи начин:

$$Error_{mag} = \frac{\|p^{(t+w)} - s^{(t+w)}\|_1}{\|s^{(t+w)}\|_1}, \quad (3-11)$$

при чему P и S представљају вредности сигнала добијених симулацијом и експериментом, респективно, док $P^{(t+w)}$ и $S^{(t+w)}$ представљају сигнале након примењеног алгоритма DTW.

Оцену разлике фаза два поређена сигнала у временском домену, према овој метрици се утврђује на бази крос-корелационе функције, која се примењује након померања сигнала у правцу временске осе ради постизања већег степена слагања, а која се може приказати на следећи начин:

$$Error_{phase} = e^{\left(\frac{n_* - c}{r}\right)} \quad (3-12)$$

где се са параметрима c и r описује почетна тачка раста и стопа раста функције, а параметар n_* описује износ за који је извршено померање једног сигнала у односу на други ради постизања већег степена слагања.

У односу на претходну метрику, додатни фактор који се уводи у *EARTH* метрици за поређење два сигнала је поређење облика сигнала, које се врши тако што се одреде пресечне тачке сигнала са израчунатом средњом вредности, па се након тога, у свакој пресечној тачки, одређује угао нагиба кривих. Ово је могуће одредити користећи први извод функција, уз претходно примењен *Dynamic Time Warping (DTW)* [44] алгоритам. Фактор разлике облика функција се изражава на следећи начин:

$$Error_{topology} = \frac{\|P^{(t+d+w)} - S^{(t+d+w)}\|}{\|S^{(t+d+w)}\|} \quad (3-13)$$

Недостатак фактора облика дефинисаног на овај начин огледа се у непоузданости израчунавања у случају поређења високофреквентних сигнала, односно сигнала који имају велики број промена у кратком временском интервалу [43].

Основна претпоставка код претходно дефинисане три метрике је да се сигнали које се пореде представљају истим бројем тачака у периоду који се користи за поређење, односно да је учестаност узорковања посматраних сигнала иста. У реалним условима често није могуће остварити једнаку учестаност узорковања сигнала добијених симулацијом математичких модела и експерименталним испитивањем реалног објекта.

Технике валидације модела базиране на поређењу особина сигнала не захтевају било какву претпоставку о расподели поређених сигнала и не захтевају велико рачунско време. Са друге стране, недостаци ове методе валидације модела се огледају у:

- Могућности примене само на сигнале у временском домену,
- Неузимању у обзир грешака израчунавања и мерења,
- Непостојању јасно дефинисаних граничних вредности,
- Неузимању у обзир мишљење експерата.

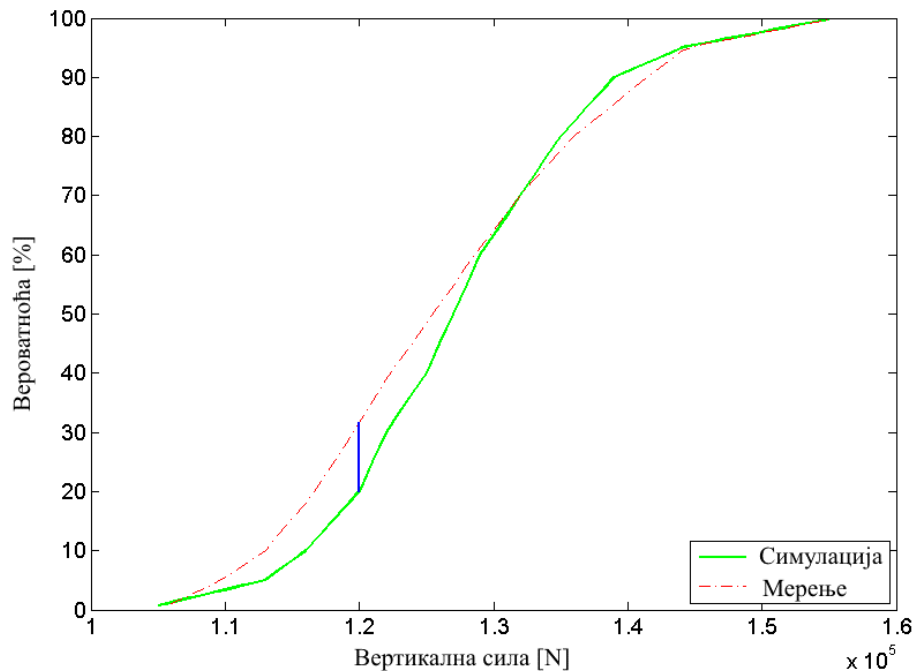
3.1.3 Методе валидације базиране на функцијама вероватноће

Ове методе валидације модела се базирају на одређивању разлике између функција густине вероватноће (PDF) и/или између кумулативних функција вероватноће (CDF). Као и код претходних, тако се и код ових методе не чини било каква претпоставка о расподели променљивих, а потребно рачунско време за одређивање разлике између PDF/ CDF функција је мало.

У протеклих педесет година истраживачи су развили велики број метрика за валидацију модела базираних на поређењу кумулативних функција.

3.1.3.1 Колмоогов-Смирнов метрика

Колмоогов-Смирнов (Колмогоров, Смирнов) метрика је најчешће коришћена метрика за поређење кумулативних функција. Заснива се на одређивању максималне разлике између две кумулативне функције, мерено дуж вертикалне осе, као што је приказано на слици 3–6.



Слика 3-3. Колмоогов-Смирнова метрика

Колмоогов-Смирнова метрика за две кумулативне функције $F(x)$ и $K(x)$, може се изразити на следећи начин [45]:

$$D = \max |F(x) - K(x)| \quad (3-14)$$

Приказана мера испуњава услов симетричности, односно $D(F,K) = D(K,F)$, што представља значајну предност приликом интерпретације добијених резултата. Метрика се примењује на опсег функција вероватноће које се преклапају код поређених функција. Недостатак ове метрике огледа се у томе што се за поређење кумулативних функција користе вредности у само две тачке и то у онима у којима

постоји највеће одступање између функција, док се остатак расподеле посматраних сигнала не узима у обзир.

3.1.3.2 Андерсон-Дарлинг метрика

У циљу побољшања Колморгонов-Смирнов метрике, Anderson и Darling [46] су увели нову метрику, која се и даље базира на разлици између кумулативних функције двеју поређених променљивих, али којом се додатно уводи и тежинска функција. Ако две променљиве имају дистрибуције $F(x)$ и $K(x)$, онда се мера разлике између посматраних функција вероватноће дефинише на следећи начин:

$$AD = n \int_{-\infty}^{\infty} (F(x) - K(x))^2 \omega(x) dK(x) \quad (3-15)$$

где $\omega(x)$ представља тежинску функцију, чија је намена да пондерише одговарајуће зоне кумулативних функција које се пореде, а које су од интереса.

У случају да је тежинска функција једнака јединици, тада се Андерсон-Дарлинг метрика назива Kramer-von Mises метриком [47].

Показано је да Андерсон-Дарлинг метрика има бољу оцену поређења два сигнала него Колморгонов-Смирнов метрика [48].

3.1.3.3 Кулбак-Лајблерова дивергенција

Кулбак-Лајблерова (Kullback-Leibler) дивергенција је још једна често коришћена валидациона метрика, која се базира на одређивању разлика између дискретних функција вероватноће (*probability mass function - pmf*), а може дефинише се на следећи начин:

$$D_{KL} = \sum_z p(z) \log_2 \frac{p(z)}{q(z)} \quad (3-16)$$

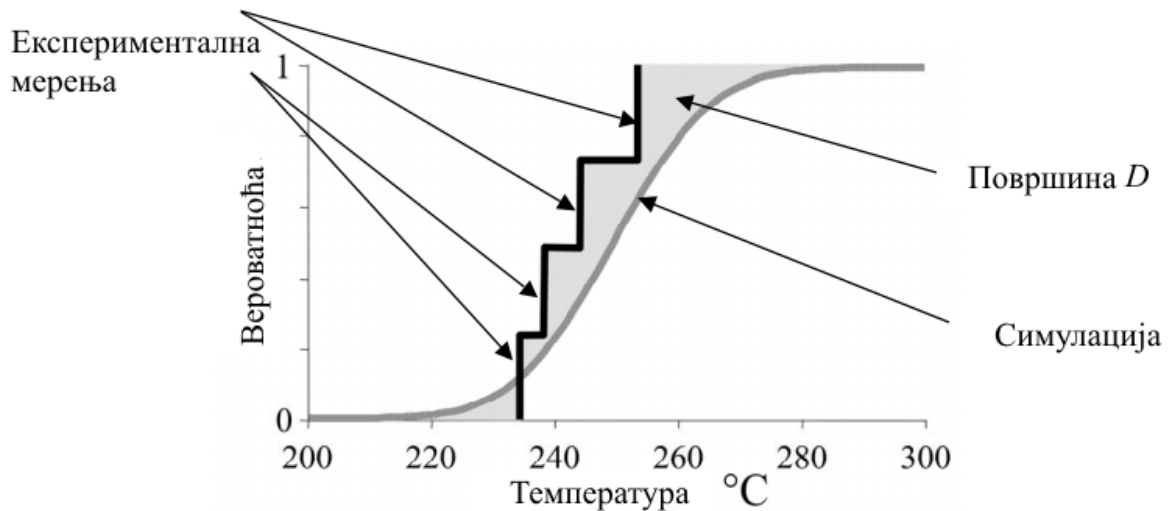
При чему су $p(z)$ и $q(z)$ дискретне функције вероватноће, док је z величина која узима вредности у дијапазону у коме се две функције вероватноће преклапају. У једначини 3-15 са $p(z)$ су описане вредности добијене експерименталним испитивањем, а са $q(z)$ су представљене вредности добијене симулацијом. Кулбак-Лајблерова дивергенција се, најчешће, користи у теорији информација, где се тумачи као очекивана додатна порука по податку који се мора пренети, а која служи да идентификује одређену вредност Z , која се може идентификовати у заједничком опсегу променљивих X и Y [48].

3.1.3.4 Валидациона метрика базирана на површинама

Ferson и Oberkampf у својим истраживањима [48] као меру разлике између две функције вероватноће уводе површину која је ограничена графиконима функција које се пореде, као што је приказано на слици 3-7 [49]. У случају континуалних сигнала, разлика површина се може израчунати користећи следећу једнакост:

$$D(F, S_n) = \int_{-\infty}^{\infty} |F(x) - S_n(x)| dx \quad (3-17)$$

При чему је са $F(x)$ означена функција вероватноће променљиве добијене симулацијом, а са $S_n(x)$ функција вероватноће променљиве добијене експерименталним испитивањем.



Слика 3-4. Ферсон-Оберкампа валидациона метрика заснована на поређењу површина

Методе валидације модела засноване на поређењу функција густине вероватноће не чине претпоставке у вези расподеле променљивих које се пореде. Примена ових метода валидације је ограничена само на скаларне вредности, и они се не могу користити за поређење више од два сигнала. И код ових метода је у извесној мери присутна субјективност која се огледа у избору граничних вредности за прихватање ваљаности модела. Мишљења експерата се могу укључити у ове методе валидације кроз избор граничних вредности. Рачунско време за одређивање разлике поређених сигнала је веће од претходно приказаних метода, али је још увек релативно мало.

3.1.4 Методе валидације модела базиране на тестирању хипотеза

Методе валидације базиране на тестирању хипотеза се заснивају на поређењу хипотеза оценом одговарајућих величина поређених сигнала [50, 51, 52]. Хипотезе представљају унапред дефинисане тврдње којима се на основу познавања карактеристика једног скупа доноси закључак о другом скупу. Тестирање хипотеза се заснива на дефинисању две међусобно искључиве хипотезе које се називају нулта хипотеза (H_0) и алтернативна хипотеза (H_1).

Ако се пореде аритметичке средине два скупа, нулта и алтернативна хипотеза се могу дефинисати на следећи начин:

Нулта хипотеза (H_0): Између аритметичких средина два поређена скупа, односно између аритметичких средина два узорка добијена из два поређена скупа, не

постоји значајна разлика. Ако разлика и постоји, она је случајног карактера, односно, настала је под дејством случајних фактора.

Нулта хипотеза математички се може изразити помоћу следеће једнакости:

$$H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2, \text{ односно } \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0 \quad (3-18)$$

Алтернативна хипотеза (H_1) представља супротну тврдњу нултој хипотези: Између аритметичких средина узорака постоји значајна разлика и она није случајног карактера, већ је настала под дејством системских или експерименталних фактора.

У математичком облику алтернативна хипотеза може се изразити на следећи начин:

$$H_1: \bar{x}_1 \neq \bar{x}_2, \text{ односно } \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \neq 0 \quad (3-19)$$

Прихватање постављене нулте или алтернативне хипотезе се врши на основу изабраних прагова значајности. Ако се одабраним статистичким тестом за изабрану вероватноћу и праг значајности покаже истинитост нулте хипотезе, онда се она прихвата и одбацује алтернативна хипотеза, и закључује се: претпоставка истраживача, исказана нултом хипотезом, је тачна, јер добијена разлика између реализоване (вредности добијене после истраживања или после експеримента) и хипотетичне вредности параметра скупа није статистички значајна (сигнификантна). Разлика је последица случајног карактера, и настала је дејством споредних фактора.

Супротно томе, ако статистички тест за одговарајућу вероватноћу и праг значајности, не потврди истинитост нулте хипотезе, онда се она одбацује и аутоматски прихвата алтернативна хипотезу као истинита.

Приликом тестирања хипотеза могу да се направе два типа грешака [53]:

Грешка прве врсте – типа I, која се означава са α , која настаје када одбацујемо истиниту нулту хипотезу. Вероватноћа да се направи грешка прве врсте одређена је са праговима значајности које се најчешће означавају са p .

Грешка друге врсте – типа II (β - грешка), која настаје када прихватамо (не одбацујемо) неистиниту нулту хипотезу.

Вероватноћа да се неће направити грешка друге врсте одређује снагу (power) теста. Снага теста (γ) је вероватноћа да се одбаци нетачна нулта хипотеза, и једнака је разлици између 1 и вероватноће грешке друге врсте.

$$\gamma = 1 - \beta \quad (3-20)$$

Снага теста расте са величином узорака којим се представљају скупови који се пореде и са величином разлике коју сматрамо стварно значајном, а опада са нивоом значајности. Што је снага теста већа, тест је бољи.

Тестови који се базирају на прихватању или одбацивању нулте хипотезе могу да се поделе у две основне групе:

- Параметарски тестови
- Непараметарски тестови

Параметарски тестови се примењују када су вредности које се пореде нумеричке, када подаци који се испитују не одступају значајно од нормалне расподеле, као и за велики број узорака (број узорака већи од 30) без обзира каква је њихова расподела. Најпознатији, и практично најпримењиванији, тестови ове групе су *z-тест* и *t-тест*.

Основни услови за примену *z*-теста су да је позната варијанса скупова који се пореде и да, за скупове са мање од 30 узорака, променљиве имају нормалну расподелу. Са друге стране, *t*-тест не захтева познавање варијансе скупова који се пореде и може да се примени како код скупова са малим, тако и код скупова са великим бројем узорака. У пракси се, због могућности провере променљивих са мање од 30 узорака и зато што не захтева унапред познавање варијанси променљивих, најчешће примењује *t*-тест.

Непараметарски тестови се примењују у случају када су карактеристике скупова који се пореде дате описно, у случају када се пореде скупови са малим бројем узорака који су несиметрично распоређени. Од непараметарских тестова најчешће у употреби су: χ^2 тест, Фишеров тест, Мек Немарин тест, итд.

3.1.4.1 Студентов *t*-тест

Параметарски тест за поређење хипотеза, који се најчешће употребљава за поређење аритметичких средина два посматрана скупа је *t-тест*, који је још познат и као *Студентов t-тест* [51]. Основне претпоставке за примену *t*-теста су:

- Променљиве које се тестирају морају бити нумеричке,
- Уколико је број узорака мањи од 30, претпоставља се да променљиве имају нормалну дистрибуцију

За реализацију овог теста потребно је да се познају број узорака посматраних скупова n , стандардна девијација sd , односно стандардна грешка оцене sg и аритметичке средине посматраних скупова X_1, X_2 .

Претпоставимо да имамо два велика и независна скупа (X_1) и (X_2) обима n_1 и n_2 респективно. Одговарајућа статистика за поређење средњих вредности две независне променљиве може се извршити применом следеће једначине:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{(n_1 - 1)sd_1^2 + (n_2 - 1)sd_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right) \left(\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right)}} \quad (3-21)$$

при чему је са sd означена је стандардна девијација.

Табела 3-1. Критичне вредности за Студентову t -расподелу са n степени слободe

| n | Вредности за t за различите нивое вероватности p | | | | | | |
|----------|--|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| | 0.75 | 0.90 | 0.95 | 0.975 | 0.99 | 0.995 | 0.9995 |
| 1 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 636.619 |
| 2 | .816 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 | 31.598 |
| 3 | .765 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 | 12.941 |
| 4 | .741 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 | 8.610 |
| 5 | .727 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 | 6.859 |
| 6 | .718 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 | 5.959 |
| 7 | .711 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 | 5.405 |
| 8 | .706 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 | 5.041 |
| 9 | .703 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 | 4.781 |
| 10 | .700 | 1.327 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 | 4.587 |
| 11 | .697 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 | 4.437 |
| 12 | .695 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 | 4.318 |
| 13 | .694 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 | 4.221 |
| 14 | .692 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 | 4.140 |
| 15 | .691 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 | 4.073 |
| 16 | .690 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 | 4.015 |
| 17 | .689 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 | 3.965 |
| 18 | .688 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 | 3.922 |
| 19 | .688 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 | 3.883 |
| 20 | .687 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 | 3.850 |
| 21 | .686 | 1.233 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 | 3.819 |
| 22 | .686 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 | 3.792 |
| 23 | .685 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 | 3.767 |
| 24 | .685 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 | 3.745 |
| 25 | .684 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 | 3.725 |
| 26 | .684 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 | 3.707 |
| 27 | .684 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 | 3.690 |
| 28 | .683 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 | 3.674 |
| 29 | .683 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 | 3.659 |
| 30 | .683 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 | 3.646 |
| 40 | .681 | 1.303 | 1.684 | 2.021 | 2.423 | 2.704 | 3.551 |
| 60 | .679 | 1.296 | 1.671 | 2.000 | 2.390 | 2.660 | 3.460 |
| 120 | .677 | 1.289 | 1.658 | 1.980 | 2.358 | 2.617 | 3.373 |
| ∞ | .674 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 | 3.291 |

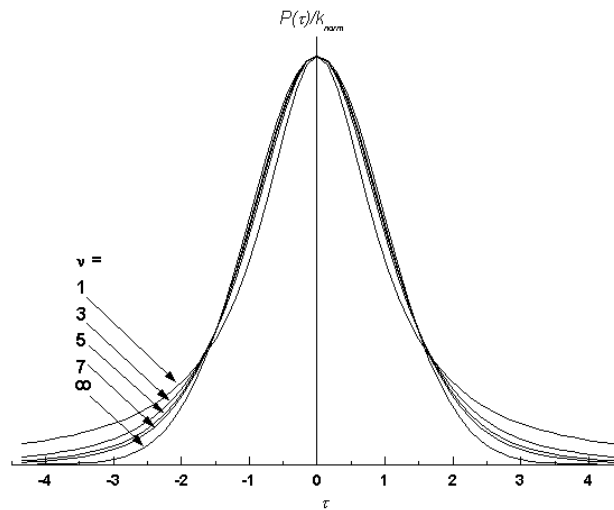
Број степени слободe, у статистичком смислу, дефинише се као разлика укупног броја узорака са којима се врши статистика, умањен за број независно променљивих. У случају да није познат број независно променљивих, број степени слободe се може одредити на следећи начин:

$$df = (n_1 + n_2) - 1 \quad (3-22)$$

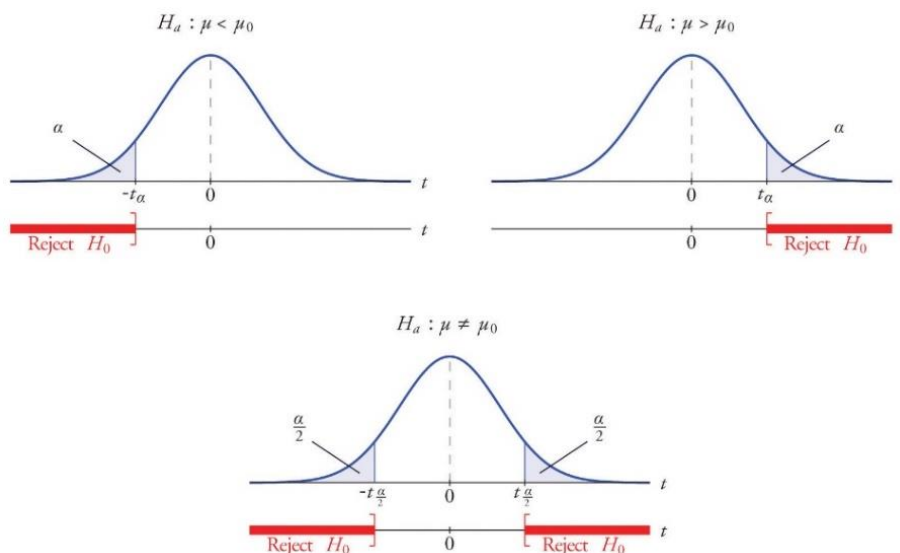
Тумачење добијених резултата t -теста базира се на Студентовој t -расподели за одређени број степени слободe и на основу критичних вредности t расподеле датих у табели 3-1.

Функција t -расподеле је симетрично опадајућа функција. Са повећањем броја статистичких степени слободe, површина обухваћена реповима криве се смањује,

а расподела се све више приближава стандардној нормалној расподели, као што је то приказано на слици 3-5.



Слика 3-5. Студентова t расподела за различит број степени слободe



Слика 3-6. Графички приказ правила за прихватање и одбацување хипотеза

Из свега напред наведеног произилазе следећа правила (слика 3-6):

Ако је реализована t -вредност мања од граничне табличне вредности за одговарајући број степени слободe и праг (ниво) значајности, нулта хипотеза се прихвата као тачна, а одбацује алтернативна хипотеза:

- t -реализовано $< t$ (t_{CC} и $0,05$) $\Rightarrow H_0$ се не одбацује јер је ризик већи од 5% ($p > 0$)

Обрнуто, ако је реализована t -вредност једнака или већа од граничне табличне вредности, за одговарајући број степена слободe и праг значајности, нулта хипотеза се одбацује као нетачна, а прихвата се алтернативна хипотеза:

- t -реализовано $\geq t_{(CC \text{ и } 0,05)} \Rightarrow$ одбацује се нулта хипотеза за ниво ризика $p=0,05$, односно за ниво сигурности $P=0,95(95\%)$
- t -реализовано $\geq t_{(CC \text{ и } 0,01)} \Rightarrow$ одбацује се H_0 и за ниво ризика $p=0,01$, односно за ниво сигурности $P=0,99(99\%)$.

3.1.4.2 Пирсонов Хи-квадрат тест

Пирсонов тест базира се на хи-квадрат расподели и представља непараметарски статистички модел за процену значајности разлике на основу учестаности. Примењује се на атрибутивна или нумеричка непараметарска обележја величина које се пореде [51].

Пирсоновим χ^2 тестом се израчунава да ли постоји статистички значајна повезаност у учестаностима два атрибутивна обележја, или између добијених (опажених) учестаности и учестаности које очекујемо код одређене хипотезе. Добијене учестаности су учестаности добијене емпиријским истраживањем, односно експериментом. Очекиване учестаности су теоријског карактера, или очекиване на основу хипотезе коју желимо да проверимо.

Три су најважнија услова за примену χ^2 квадрат теста [52]:

1. χ^2 квадрат тест се врши искључиво на основу апсолутних учестаности, или из података ако могу да се сведу на апсолутне учестаности;
2. Ниједна од апсолутних учестаности не сме да има вредност мању од 5 јединица,
3. Када су узорци мањи од 200 јединица ($n_1+n_2<200$) примењује се Yates-ова корекција:
 - Свака добијена учестаност, ако је већа од очекиване, умањује се за 0,5, а
 - Свака добијена учестаност, ако је мања од очекиване, увећава се за 0,5.

χ^2 квадрат тест може имати следеће модалитете:

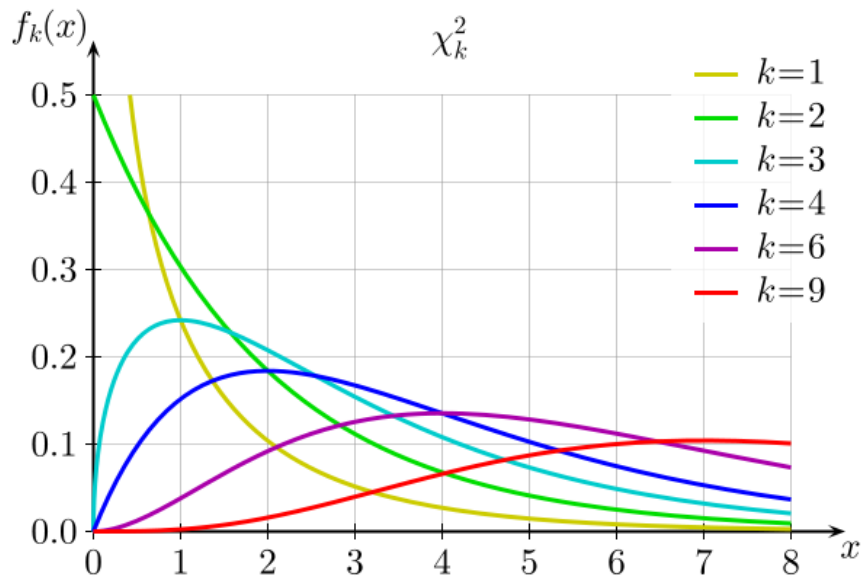
1. χ^2 тест распореда учестаности
2. χ^2 тест независности
3. χ^2 тест хомогености

Пирсонов χ^2 тест се употребљава за тестирање значајности разлике између теоретских (f_i) и експерименталних (f_0) учестаности, при чему се у математичком облику може изразити на следећи начин:

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_0 - f_i)^2}{f_i} \quad (3-23)$$

Тумачење добијених резултата χ^2 -теста базира се на χ^2 -расподели, датој на слици 3-10, за одређени број степени слободe, и на основу критичних вредности

χ^2 -расподеле. Број степени слободe, у статистичком смислу, одређује се на исти начин као и при примени t-теста, према једначини (3-22).



Слика 3-7. Функција густине вероватноће за хи-квадрат тест

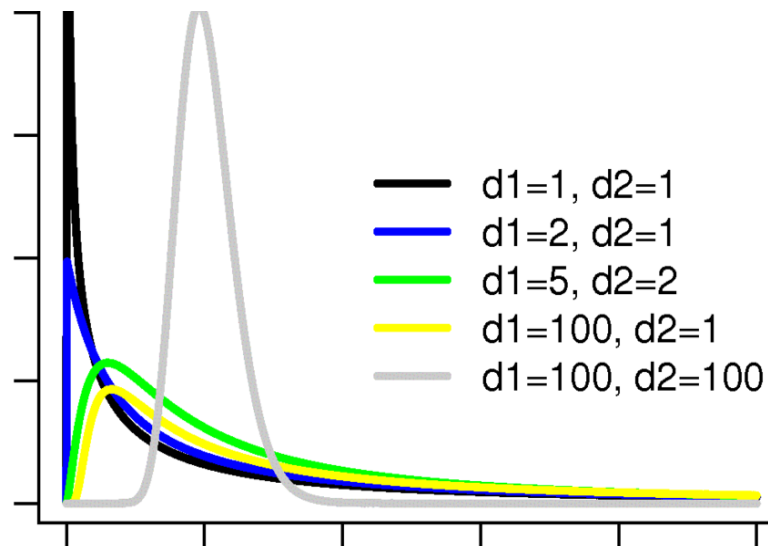
3.1.4.3 Фишеров F-тест

У основи, сваки статистички тест који се базира на F-расподели, а који има мање од 30 узорака за поређење можемо назвати F-тест. F-расподела добила је име по статистичару Р.А. Фишеру (R.A. Fisher), па је стога позната и као Фишерава расподела или Snecedor-Fisher расподела [54].

F-расподела се најчешће користи за анализу варијанси и представља саставни део АНОВА алгоритма [55]. У основи, F-расподела представља однос две χ^2 -расподеле, подељене са одговарајућим бројем степени слободe,

$$F = \frac{\chi_1^2/df_1}{\chi_2^2/df_2} \quad (3-24)$$

при чему су χ_1^2 и χ_2^2 две χ^2 статистике, а df_1 и df_2 њихови одговарајући статистички степени слободe.



Слика 3-8. Фишерава расподела са различитим бројем степени слободе

С обзиром да F-тест представља однос две χ^2 -расподеле, многа од својстава F-расподела су наслеђене од χ^2 -расподеле, и F-расподела има следеће особине:

- Вредности F-расподела су не-негативне
- F- расподела није симетрична
- Средња вредност је приближно једнака јединици
- F- расподелу, с обзиром на њену дефиницију, карактеришу два статистичка степена слободе

F-тест је намењен за тестирање једнакости варијанси две независне популације. Он се може употребити за тестирање хипотеза на неколико начина, и то за:

1. Тестирање хипотезе о једнакости варијанси
2. Тестирање хипотезе о једнакости више средњих вредности
3. Тестирање значајности регресије употребљене приликом формирања регресионог модела

У случају да се пореде варијансе две популације, потребно је наћи однос стандардних девијација према следећој једнакости:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (3-25)$$

При чему су са S_1^2 и S_2^2 означене стандардне девијације прве и друге популације респективно.

И у овом, као и у претходним тестовима, постављају се две хипотезе. Нулта хипотеза тврди да не постоје значајне разлике између поређених варијанси, док алтернативна хипотеза тврди да постоји значајне разлике између поређених варијанси.

Одлука о прихватању или одбацивању одговарајуће хипотезе доноси се на основу поређења израчунате вредности F-теста и табеларне критичне вредности [54, 55]. Критична вредност код F-теста се одређује на основу статистичких степени слободе обе популације, које су поређене на основу изабраног прага значајности α за поређење популација.

Основне препоруке приликом формирања F-теста су:

- Већа варијанса увек би требало да се постави у имениоцу разломка,
- Уколико су дате стандардне девијације уместо варијанси, стандардне девијације морају бити квадриране,
- Уколико статистички степени слободе нису дефинисани приликом израчунавања F-теста, из табеле критичних вредности треба узети већу критичну вредност, односно критичну вредности за мањи број статистичких степени слободе,
- Популације које се пореде морају бити независне

С обзиром да се F-тест базира на поређењу две χ^2 -расподеле, то се све сва ограничења χ^2 -теста преносе и на овај тест. Основна предност F-теста у односу на χ^2 -тест је што се може користити и у случају када имамо мали број узорака у популацији. Уколико је број узорака популације који се пореде мањи од 30, тада се предлаже употреба F-теста, док се у случају када популације имају више од 30 узорака препоручује употреба χ^2 -теста или t-теста за поређење популација.

3.1.5 Методе валидације модела базиране на Бајесовој формули

Прво *Daniel Bernuli*, а затим у 20. веку и *John Neumen*, су покушали да укључе концепт вероватноће у проблем доношења одлуке. По њима, с обзиром да људско знање није савршено, свака одлука се доноси са одређеном грешком, односно несигурношћу-грешком. Математички посматрано, вероватноћа остаје иста, али се може мењати значај који доносилац одлуке додељује појединим резултатима на основу којих се формира одлука.

За одређивање вероватноће реализације једног догађаја Бајес уводи два нова термина и то: *апериори вероватноћа* и *апостериори вероватноћа* [56, 57]. **Апериори** вероватноћа се односи на значај који се додељује појединим исходима пре експеримента, у условима када подаци нису познати. **Апериори** вероватноћу додељује сваки доносилац одлуке понаособ, што представља слабост концепта. Ипак, предност му је што омогућава давање исказа о појавама пре њиховог директног посматрања [58].

Комбинуюћи **апериори** вероватноће са условном расподелом резултата експеримента, користећи се Бајесовом теоремом, добијају се **апостериори** вероватноће.

Концепти *апприори* и *апостериори* вероватноће су значајни, јер је на њима базирано закључивање о популацији на основу узорка [59], [60].

Бајесов концепт се базира на такозваној формули потпуне вероватноће. Да би се објаснио концепт *Бајесове*, или *потпуне вероватноће*, потребно је објаснити основне концепте вероватноће

3.1.5.1 Дефиниција условне вероватноће

Нека у експерименту посматрамо два случајна догађаја A и B . Ако је познато да се један од њих, на пример догађај B , остварио, треба одредити вероватноћу да се остварио и догађај A . Тако се, на одређен начин, мери повезаност догађаја, односно мера у којој информација о реализацији догађаја B говори о реализацији догађаја A .

Дефиниција 3.1. Условна вероватноћа

Нека су A и B догађаји из истог простора вероватноћа (Ω, E, P) и нека је $P(B) > 0$, где је са Ω означен скуп свих догађаја, са E расподела случајних променљивих и са P њихова вероватноћа. Тада је условна вероватноћа догађаја A , ако се остварио догађај B , једнака:

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} \quad (3-26)$$

За условну вероватноћу $P(A/B)$ користи се и ознака $P_B(A)$.

Условне вероватноће догађаја из истог простора вероватноћа, у односу на неки догађај из тог простора, имају све особине вероватноће, тј. задовољавају аксиоме B_1^0, B_2^0, B_3^0 :

$$\begin{aligned} B_1^0 : P(A|B) &\geq 0, \\ B_2^0 : P(\Omega|B) &= 1, \\ B_3^0 : P\left[\left(\sum_j A_j\right) | B\right] &= \sum_j P(A_j | B). \end{aligned} \quad (3-27)$$

3.1.5.2 Независност догађаја

Независност догађаја је један од битних појмова у теорији вероватноће, а самим тим и у математичкој статистици. Уводи се следећа дефиниција:

Дефиниција 3.2. Независност догађаја

Нека су догађаји A и B из истог простора вероватноћа. Ако важи $P(AB) = P(A)P(B)$, тада су догађаји A и B независни.

На основу дефиниције условне вероватноће закључује се, да за независне догађаје A и B важи:

$$P(A|B)=P(A) \text{ и } P(B|A)=P(B) \quad (3-28)$$

Ако су догађаји A и B независни, тада реализација догађаја B не утиче на вероватноћу догађаја A , али ако су догађаји A и B зависни, тада је вероватноћа $P(A/B)$ различита од $P(A)$, и тада је могуће да буде $P(A/B)>P(A)$, али такође и да буде $P(A/B)<P(A)$.

Ако се посматра више догађаја из истог простора елементарних исхода, онда се каже да су они независни у укупности (или се само каже независни), ако је вероватноћа пресека било којих догађаја из тог скупа догађаја једнака производу вероватноћа издвојених догађаја.

3.1.5.3 Формула потпуне вероватноће и Бајесова формула

Нека су H_1, H_2, \dots, H_n , случајни догађаји који чине потпун систем догађаја и нека је A неки догађај из истог простора елементарних исхода. Вероватноћа догађаја A се може израчунати по формули:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i) P(A|H_i) \quad (3-29)$$

Претходно дефинисани случајни догађаји H_1, H_2, \dots, H_n , се називају **хипотезе**, док се формула (3-29) назива **формула потпуне вероватноће** [61].

Доказ формуле потпуне вероватноће се заснива на разлагању догађаја A на дисјунктне делове, што произилази из

$$A = A\Omega = A \cap (H_1 + H_2 + \dots + H_n) = \sum_{i=1}^n AH_i \quad (3-30)$$

Како су догађаји AH_i и AH_j за $i \neq j$, дисјунктни, добија се да је вероватноћа догађаја A :

$$P(A) = P\left(\sum_{i=1}^n AH_i\right) = \sum_{i=1}^n P(AH_i) \quad (3-31)$$

Кад се вероватноће пресека AH_i изразе преко условних вероватноћа $P(AH_i)=P(H_i)P(A/H_i)$, добија се формула потпуне вероватноће, која је дата изразом (3-29).

Вероватноће $P(H_i)$ се називају **апприори** вероватноће хипотеза. Ако се зна да се реализовао догађај A и да је могуће одредити вероватноће $P(H_i/A)$, за свако $i=1, 2, \dots, n$, те вероватноће се називају **апостериорне** вероватноће хипотеза.

Користећи формуле потпуне вероватноће (3-28), апостериорне вероватноће се могу израчунати користећи следећу једнакост:

$$P(H_k | A) = \frac{P(H_k)P(A|H_k)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A|H_i)} \quad (3-32)$$

Једнакост (3-29), у литератури се још назива и Бајесова формула, или вероватноћа хипотеза (узрока), јер на H_1, H_2, \dots, H_n , можемо гледати као на различите узроке који могу довести до реализације догађаја A .

Примена формуле тоталне вероватноће и Бајесове формуле захтева знатно рачунско време, па је у протеклим годинама веома мало употребљавана. Са развојем рачунарске технике расте и употреба Бајесове формуле и формализама за одређивање вероватноће са којом се може извршити неки догађај.

При валидацији модела Vox [56] и Dalal [57] претпоставили су да се, користећи Бајесов приступ, априори вероватноће могу третирали као експериментална испитивања, док ће у том случају апостериори вероватноће представљати вероватно понашање реалног система.

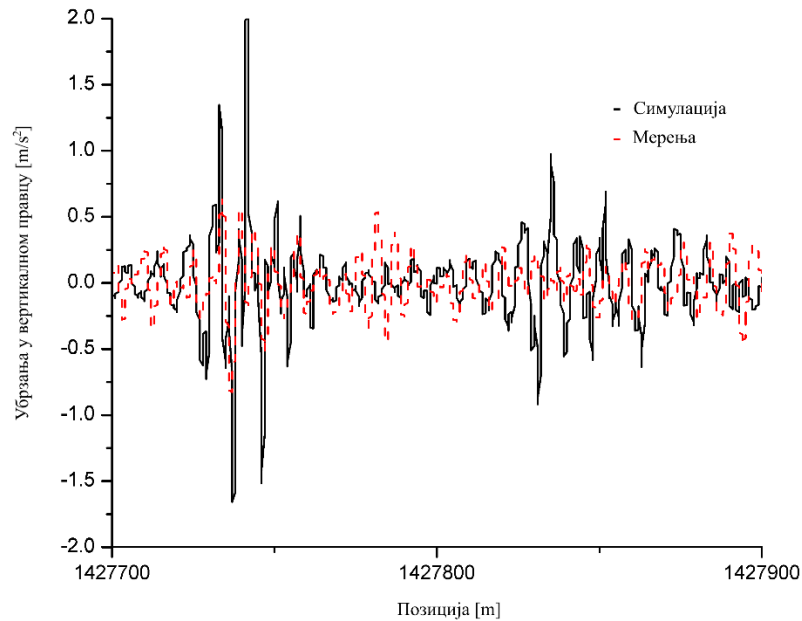
У неколико последњих година велики број истраживача [56-62], у различитим областима истраживања, комбинујући предности тестирања хипотеза (t-тест, Студентов тест, Фишеров тест, итд.) у комбинацији са Бајесовом формулом формирају тзв, Бајесов оквир (Bayesian framework) за валидацију модела.

Предност Бајесове формуле и Бајесовог оквира огледа се могућности да се изврши валидација модела на основу малог броја података (мали број експерименталних података и мали број симулација). Наравно, са већим бројем узорака знатно се повећава вероватноћа са којом се може тврдити да је модел валидан.

Основни недостатак Бајесове формуле и Бајесовог оквира се огледа у веома великом рачунском времену утрошеном за валидацију модела.

3.2 ПРЕГЛЕД МЕТОДА ВАЛИДАЦИЈЕ МОДЕЛА ЖЕЛЕЗНИЧКОГ ВОЗИЛА

И поред интензивног развоја математичких и нумеричких модела железничких возила током последње две деценије, одговарајуће методе валидација модела нису развијане. Услед тога, данас постоји релативно мало литературе у којој је посебна пажња посвећена валидацији модела железничких возила. Последњих година се валидацији модела у железничком машинству даје посебан значај, што се огледа у дефинисању препорука за валидацију модела у оквиру прописа за испитивање и сертификацију [30, 31].

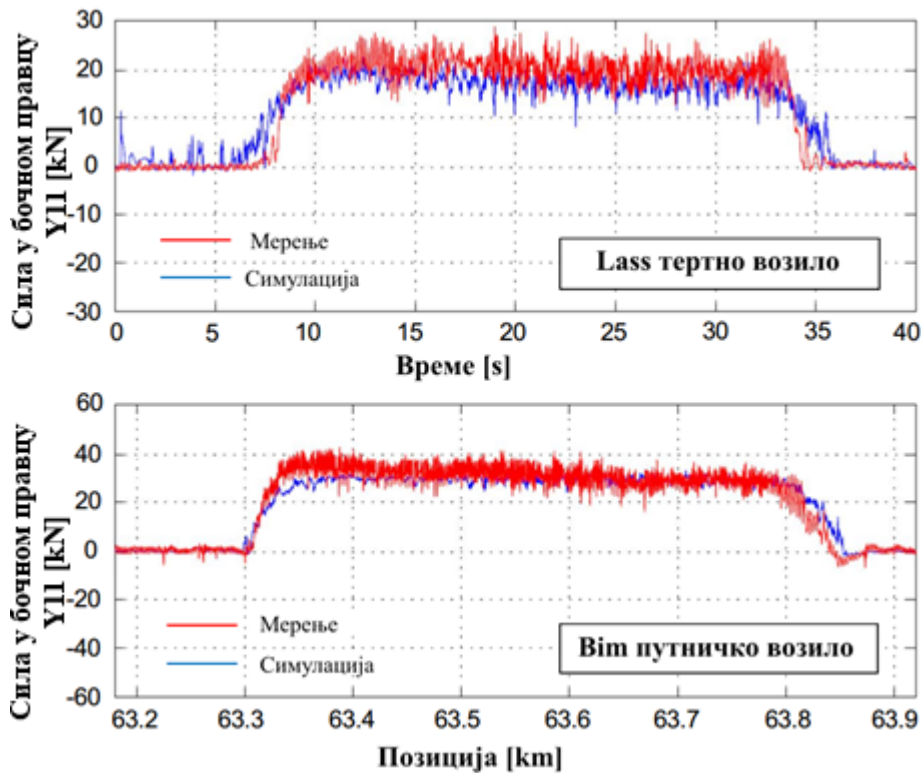


Слика 3-9. Валидација модела у временском домену поређењем убрзања сандука возила

С обзиром да су експериментална испитивања веома скупа и дуготрајна, приликом валидације модела се користе вредности параметара који су измерене током експерименталног испитивања железничког возила намењеног за сертификацију, а које је дефинисано међународним прописима [30, 31]. Све до пре пар година питање валидације и верификације модела није заузимало значајно место у истраживању, па организација експеримента намењеног валидацији модела није ни узимана у разматрање. Доласком до нових сазнања у вези са валидацијом модела, све више се поставља питање увођења специфичног експерименталног испитивања које би могло да истраживачима донесе више информација корисних за валидацију модела.

Не постоји велики број радова који се баве валидацијом модела железничких возила. У овом поглављу је преглед валидације модела железничких возила дат сагласно извршеној подели валидационих метода.

Најчешћа метода валидације која се користи за валидацију модела железничких возила је графичка метода валидације [63]. Примењујући ову методу, валидација модела се заснива на графичком поређењу величина које се мере приликом експерименталног испитивања железничких возила. Најчешће се, приликом валидације модела овом методом, пореде убрзања, приказано на слици 3-9, бочне и вертикалне силе у временском и просторном домену, као што је приказано на слици 3-10.

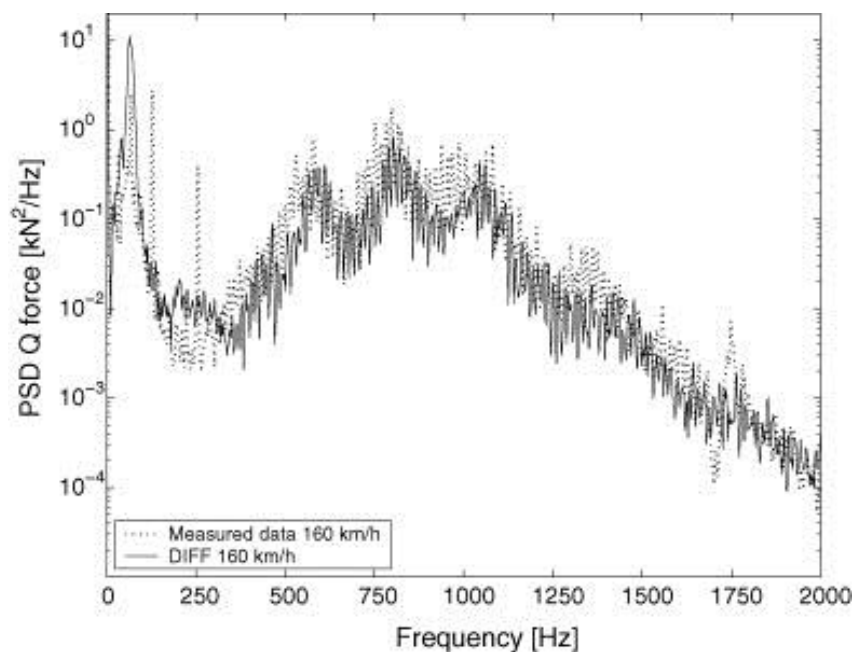


Слика 3-10. Polach и остали – валидација модела помоћу бочних сила у временском и просторном домену

Валидацијом модела железничких возила, поред поређења бочних сила [65], може се извршити и поређење убрзања у временском или просторном домену [64, 65], као што је приказано на слици 3-9.

Поред графичког поређења величина у временском и просторном домену, врло често је присутно и графичко поређење спектралних густина снага – PSD графикона [65], при чему се пореде спектралне густине убрзања или сила, као што је то приказано на слици 3-11.

Трећи приступ за валидацију модела предложио је J. Evans [66], који је извршио валидацију модела у фреквентном домену користећи графичке методе валидације. Користећи амплитудно-фреквентне карактеристике сигнала добијених експериментом и симулацијом, он је извршио поређење амплитуда осциловања на одређеним фреквенцијама, као што је приказано на слици 3-12.



Слика 3-11. Поређење спектралне густине снага -PSD вертикалних сила добијених експерименталним испитивањем и симулацијом [29]

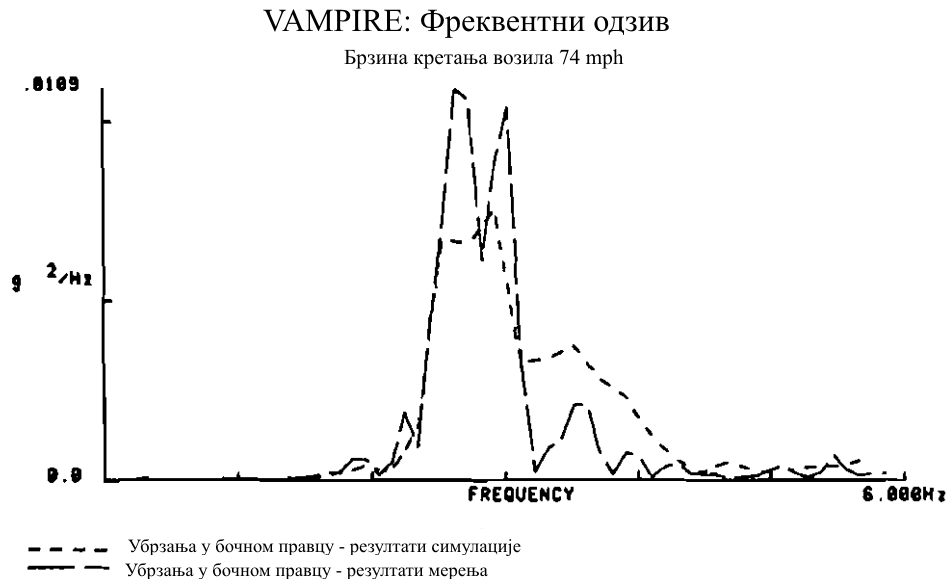
Узимајући у обзир да су експериментална испитивања скупа, и да није могуће организовати експеримент намењен валидацији модела, истраживачи Iwnicky [8] и Jaschinski [66] су валидацију модела спровели поредећи резултате симулација са одговарајућим умањеним моделима делова или комплетних железничких возила, водећи при томе рачуна о физичким карактеристикама умањеног модела возила [8].

Значај употребе нумеричких модела и симулације у истраживању понашања железничких возила, као и значај дефинисања одговарајућих процедура и поступака валидације и верификације модела, прихваћен је и назначен у новим прописима и препорукама међународне уније железница, где је у последњем издању прописа за сертификацију железничких возила UIC 518 [30] дата препорука за валидацију нумеричких модела за предвиђање понашања железничких возила.

Препоруке за верификацију и валидацију дате у UIC прописима се базирају углавном на важећим прописима за експериментално испитивање и верификацију железничких возила. Према датим препорукама, приликом симулација понашања железничких возила потребно је обезбедити:

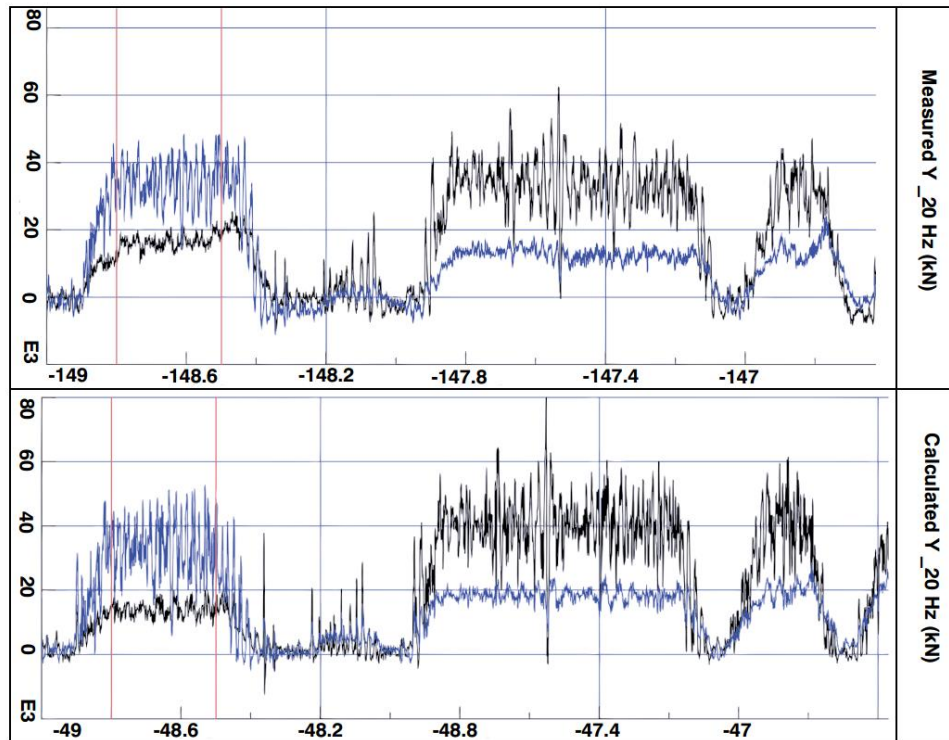
- да модел возила адекватно представља реално железничко возило,
- да се симулације понашања изврше у одговарајућим софтверским алатима,
- да се обезбеде услови који одговарају реалним условима експлоатације (експерименталног испитивања),
- да особље које спроводи симулацију и тумачи добијене резултате буде компетентно.

Према препорукама, модели вагона треба да узимају у обзир све релевантне масе, распоред оптерећења, карактеристике вешајног система – крутост и пригушење, одговарајућа ограничења у релативном кретању делова и склопова, флексибилност појединих маса у одговарајућем фреквентном домену, карактеристике контакта точка и шине, као и одговарајуће крутости колосека.



Слика 3-12. Валидација модела у фреквентном домену применом графичких метода валидације

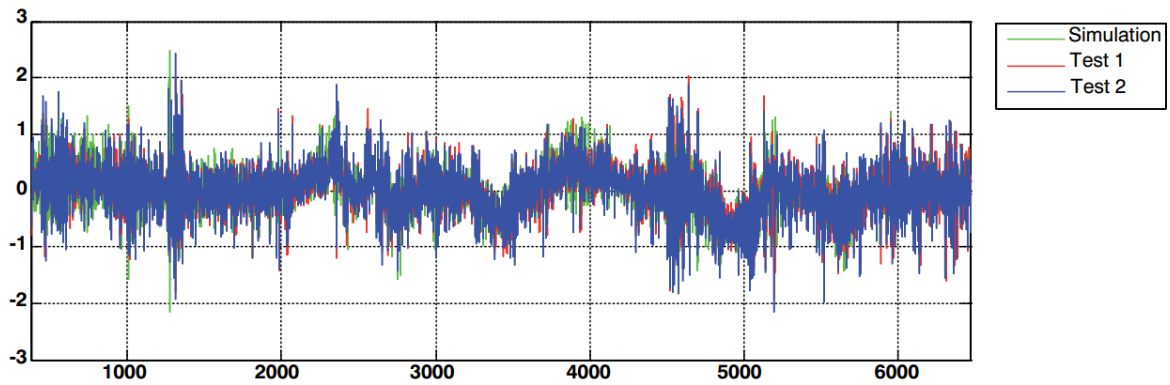
Домен валидације је подељен на два основна дела, и то: 1) на тестове који се односе на статичке и квази-статичке услове и 2) који се односи на динамичко понашање возила. За сваки од дефинисаних домена дате су препоруке за врсту и услове тестова који би требало да се спроведу. Тестови за валидацију су, у основи, и даље базирани на прописима за сертификацију железничких возила. Параметри за валидацију модела железничких возила, према датим препорукама, су исти параметри који служе за оцену понашања железничког возила приликом сертификације возила.



Слика 3-13. Поређења бочних сила у просторном домену добијених експерименталним испитивањем и симулацијом

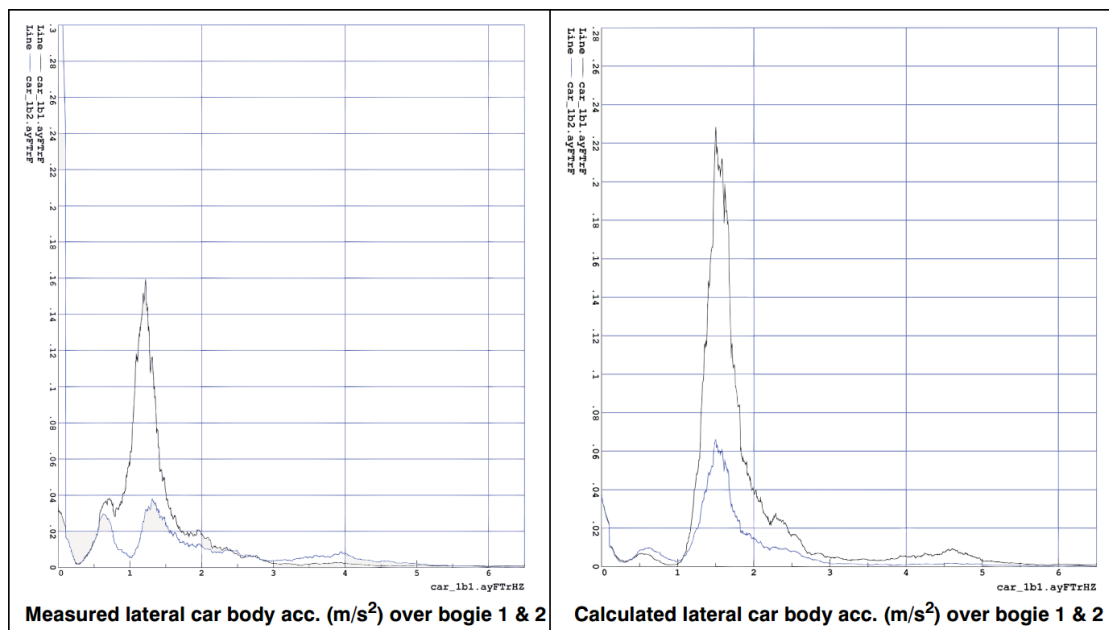
Валидација модела железничких возила, према UIC препорукама, заснива се на графичком поређењу параметара за сертификацију возила добијених експерименталним испитивањем и симулацијом. Према препорукама, параметре треба да поредити путем одговарајућих графикана у временском или просторном домену, приказано на сликама 3-13 и 3-14, као и поређења спектралних густина снаге одговарајућих убрзања и сила, приказано на слици 3-15.

Оцена о динамичком понашању железничких возила се даје на основу средњих вредности сигнала, израчунатих над одговарајућим деоницама, за одређени тип колосека, и на основу варијације посматраних сигнала, што је исказано статистичким вредностима сигнала из кумулативних функција за вероватноће појаве од 0,15% и 99,85%. Како би се омогућило комплетније поређење сигнала, UIC је препоручио да се поред стандардних поређења изврше и поређења средњих и екстремних вредности сигнала, као што је то приказано на слици 3-16.



Слика 3-14, Поређење убрзања сандука вагона у бочном правцу добијених експерименталним испитивањем и симулацијом

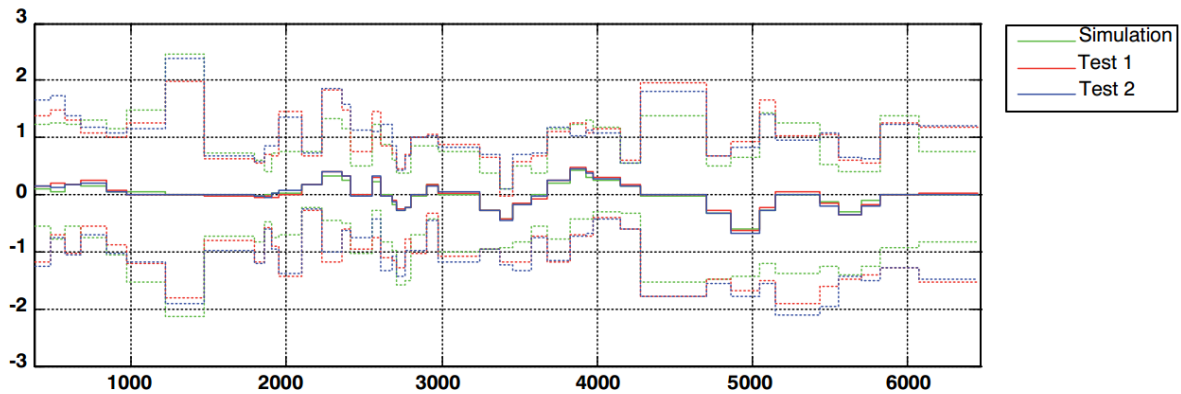
Након генерисања одговарајућих графичких приказа параметара, оцену валидности модела треба коначно да дају одабрани експерти из области железничког машинства, који би требало да имају искуства у експерименталном испитивању, моделирању железничких возила, као и у обради сигнала. Поступак валидације, дефинисан на овај начин, изразито је субјективан и у великој мери зависи од искуства особе која врши валидацију модела.



Слика 3-15, Поређење спектралних густина снага убрзања сандука вагона у бочном правцу добијених симулацијом и експерименталним испитивањем

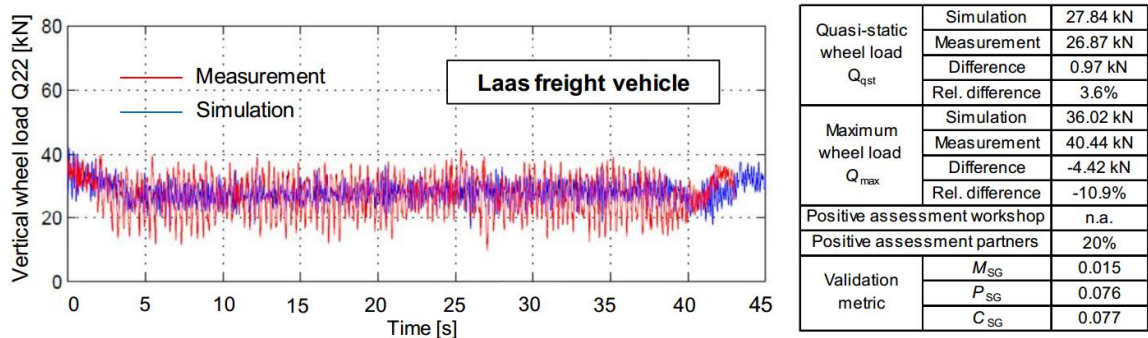
Дефинисање критеријума и граничних вредности за валидацију модела железничких возила представља посебан изазов. Покушај дефинисања методе валидације уз ангажовање експерата из области железничког машинства је приказан у истраживањима О. Polach-а [65]. На основу експерименталног испитивања четири врсте железничких возила, извршеног приликом проласка композиције кроз четири европске земље, и на основу резултата добијених симулацијом одговарајућих модела у неколико различитих софтверских пакета,

извршено је поређење на основу кога су дефинисани критеријуми и граничне вредности.



Слика 3-16. Поређење средњих, 0,15% и 99,85% вредности убрзања сандука вагона у бочном правцу

Приликом дефинисања критеријума и граничних вредности, истраживачи су се углавном придржавали препорука важећих стандарда [30, 31], приликом избора секција и обраде података добијених експериментом и симулацијом. У овом истраживању, Polach је покушао да успостави везу између одабране валидационе метрике, препорука актуелних прописа за сертификацију железничких возила и мишљења експерата. Приликом валидације модела, утицаји неправилности на колосеку, профили точкова и шина који се налазе на сваком возилу, као и претходно подешавање параметара модела узети су у обзир.



Слика 3-17. Валидација модела поређењем вертикалних сила на Laas возилу [64]

Мишљење експерата је формирано на основу графичког поређења сигнала у временском или просторном домену за изабрану секцију колосека. Над истом секцијом је истовремено примењена Спраг и Гир валидациона метрика (приказана у поглављу 3.1.2.4) и релативна разлика између одабраних параметара за поређење, као што је приказано на слици 3-17.

Приликом валидације модела, Polach је поредио следеће параметре:

- Вертикалне силе на точковима – средња вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%,

- Бочне силе на точковима – средња вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%,
- Однос бочних и вертикалних сила Y/Q – средња вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%,
- Сума бочних сила на осовинским склоповима – средња вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%,
- Убрзања сандука вагона у вертикалном правцу – RMS вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%
- Убрзања сандука вагона у бочном правцу – RMS вредност и граничне вредности 0,15% и 99,85%

Узимајући у обзир број параметара за поређење, изабране критеријуме, број модела, изабране деонице колосека, врсте поређења (оцена експерата, одређивање релативне разлике и примена Спраг и Гир метрике) у оквиру истраживања описаног у [64] је обављено око 50 000 поређења резултата симулација са резултатима добијених експерименталним испитивањем.

Као резултат истраживања, донете су препоруке за валидацију модела са предложеним параметрима и датим граничним вредностима изабраних параметра за путничка железничка возила, које су приказане у табели 3-2. Уколико се врши валидација модела теретних железничких возила, предлаже се да граничне вредности за сва убрзања, дата у табели 3-2, буду увећана за два пута.

За приказане параметре је укупно поређено 12 критеријума, на основу чега је закључено да:

- не постоји довољно добра корелација између одабраних параметара и критеријума и одабране валидационе метрике,
- између резултата валидације експерата и резултата валидације добијене на основу валидационе метрике није могуће успоставити одговарајућу зависност,
- значајан утицај на изабрану валидациону метрику има грешка у фази, која проистиче из немогућности апсолутне синхронизације сигнала који се пореде,
- мишљење експерата, у значајној мери, варира при валидацији једног истог модела.
- примењена валидациона метрика не даје нити бољу нити поузданију оцену модела, у односу на субјективну оцену експерата
- потребан је даљи рад на валидационој метрици која ће обезбедити бољу оцену – валидацију модела железничких возила

Табела 3-2. Предлог праметара, критеријума и граничних вредности за валидацију модела железничких возила према [65]

| Величина | Ознака | Јед | Филтрирање | Критеријум | Граничне вредности: |
|---|--------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------|--|
| Квази-статичка сила на водећем точку | Y_{qst} | kN | Ниско-пропусни филтер 20Hz | вредност 50% (медиана) | 5 |
| Квази-статичка сила у вертикалном правцу | Q_{qst} | kN | Ниско-пропусни филтер 20Hz | вредност 50% (медиана) | $4(1 + 0,01Q_0)$ Q_0 – статичка сила [kN] |
| Квази-статички однос Y/Q | $(Y/Q)_{qst}$ | - | Ниско-пропусни филтер 20Hz | вредност 50% (медиана) | 0,07 |
| Квази-статичка сума бочних сила | $\sum Y_{qst}$ | kN | Ниско-пропусни филтер 20Hz | вредност 50% (медиана) | 6 |
| Максимална вредност водеће силе у бочном правцу | Y_{max} | kN | Ниско-пропусни филтер 20Hz | 0,15% и 99,85% вредност | 9 |
| Максимална вредност силе у вертикалне силе | Q_{max} | kN | Ниско-пропусни филтер 20Hz | 0,15% и 99,85% вредност | $6(1 + 0,01Q_0)$ Q_0 – статичка сила [kN] |
| Максимална вредност односа Y/Q | $(Y/Q)_{max}$ | - | Усредњавање на 2 м | 0,15% и 99,85% вредност | 0,10 |
| Сума бочних сила | $\sum Y_{max}$ | kN | Усредњавање на 2 м | 0,15% и 99,85% вредност | 9 |
| Убрзања сандука вагона у бочном правцу, gms-вредност | \ddot{y}_{rms}^* | m/s ² | Појасни филтер 0,4 до 10 Hz | gms -вредност | 0,15 |
| Убрзања сандука вагона у вертикалном правцу, gms-вредност | \ddot{z}_{rms}^* | m/s ² | Појасни филтер 0,4 до 10 Hz | gms -вредност | 0,15 |
| Убрзања сандука вагона у бочном правцу, max-вредност | \ddot{y}_{max}^* | m/s ² | Појасни филтер 0,4 до 10 Hz | 0,15% и 99,85% вредност | 0,40 |
| Убрзања сандука вагона у бочном правцу, max-вредност | \ddot{z}_{max}^* | m/s ² | Појасни филтер 0,4 до 10 Hz | 0,15% и 99,85% вредност | 0,40 |

4 МЕТОДОЛОГИЈА ВАЛИДАЦИЈЕ МОДЕЛА ЖЕЛЕЗНИЧКОГ ВОЗИЛА

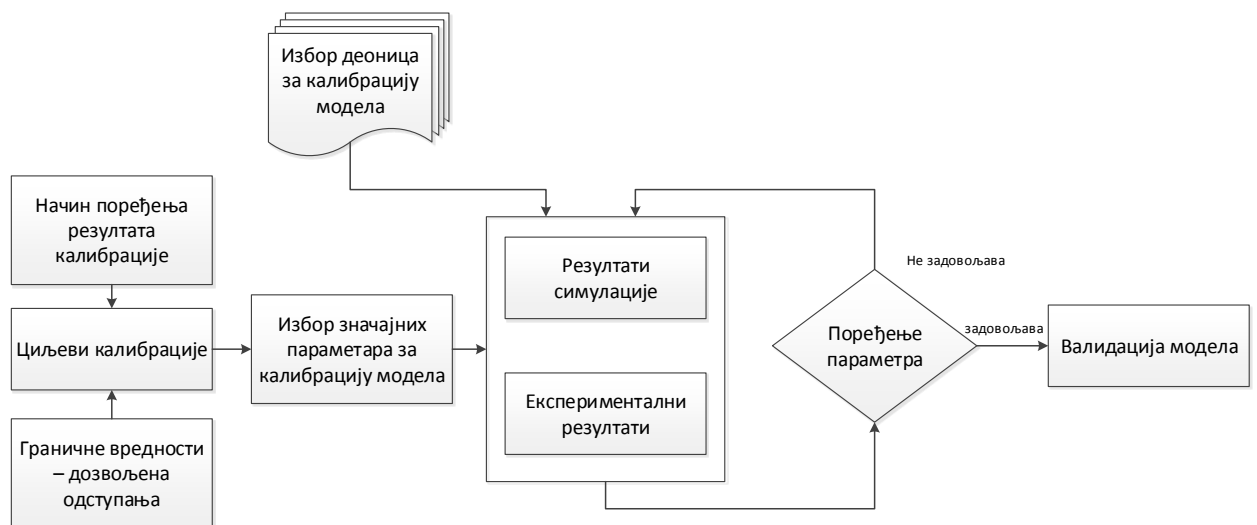
У овом поглављу је представљен предлог нове методологије за валидацију модела за предвиђање динамичког понашања железничких возила. У оквиру методологије је дат предлог за избор параметра, критеријума и граничних вредности за валидацију модела.

Железничко возило, по својој конструкцији, представља сложен механички систем у коме су компоненте и подсистеми међусобно спојени различитим везама. Важно је уочити да везе између појединих елемената и склопова вагона, у општем случају, нису линеарне, тако да се приликом симулације динамичког понашања најчешће срећемо са нелинеарним моделима железничких возила. С обзиром да се железничко возило креће по колосеку који у општем случају није идеално раван, оно представља систем са више улаза, а побуда имају стохастички карактер.

Формирање нелинеарног модела са вишеструким стохастичким улазима у знатној мери усложњава процес валидације железничког возила. Сигнали које се пореде да би се одредила разлика између резултата симулације понашања и експерименталног испитивања, су изразито стохастичког карактера. Основне носеће фреквенце сигнала које карактеришу изразите промене полупречника кривина, прелазак возила преко мостова или других промена на колосеку, могу се јасно уочити. Фреквенце сигнала које карактеришу вибрације возила током кретања, а које су основ за процену динамичког понашања возила су случајног карактера, и поређење њихових основних карактеристика је изузетно тешко. Као што је то приказано у истраживању О. Polach-а [64], један од основних проблема приликом поређења основних карактеристика сигнала (фреквенца, амплитуда, фаза), представља немогућност добре синхронизације сигнала добијених симулацијом и мерењем. Ова немогућност доводи до велике разлике у фазама, што може довести до негативне оцене модела и поред тога што постоји добро слагање између амплитудно-фреквентних спектра поређених сигнала.

Валидација модела има за циљ да утврди постојање или непостојање корелације резултата симулације и експерименталног испитивања. Са друге стране, током процеса моделирања циљ истраживача је да се оствари што боље слагање резултата симулације и експерименталног испитивања. Модели у себи садрже одређени број параметара чија је основна намена да се њиховим подешавањем смањи разлика између експеримента и симулације. Вредности тих параметара одређују се у

поступку који се назива *калибрација модела*. У току процеса калибрације избором одговарајућих параметара се минимизира разлика између резултата симулације и изабраних експерименталних резултата. На тај начин, основна карактеристика сваког доброг модела је да успешно описује бар неке експерименталне резултате, оне за које је калибрисан. Са друге стране, добри модели су само они који показују добро слагање са експерименталним резултатима за које нису калибрисани, што се утврђује порцесом валидације. Може се рећи да су процеси калибрације и валидацији математички слични, али суштински супротни по свом циљу. Током оба процеса се врши поређење резултата експеримнта и симулације, са том разликом што се калибрацијом постиже поклапање са изабраним скупом експерименталних података, док се валидацијом провера поклапање са произвољним експерименталним подацима.



Слика 4-1. Процес калибрације модела

Као и код процеса валидације модела, приликом калибрације модела потребно је изабрати *параметре битне за калибрацију модела*. Под параметрима за калибрацију модела, подразумева се широки спектар како излазних величина, тако и унапред претпостављених и усвојених вредности, које могу битно да утичу на резултате симулације. На пример, приликом симулације динамичког понашања железничког возила, усваја се читав низ параметара – коефицијенти трења, крутости елемената у контакту, крутости елемената вешајног система, који могу знатно да утичу на фреквенције и амплитуде сила и убрзања. Параметри за калибрацију модела, у општем случају, могу бити у потпуности различити од параметара за валидацију модела.

Калибрацијом модела се тежи, да се постигне што боља сагласност резултата симулације са експерименталном подацима, за разлику од валидације, чији је циљ да се *утврди разлика* у резултатима добијених симулацијом и експерименталним испитивањем. Битно је напоменути, да је *неопходно* да се експериментални

результати употребљени за калибрацију модела *изузму из процеса валидације модела*. У супротном, приликом валидације модела приказале се већи степен сагласности резултата симулације са експерименталним резултатима, што може довести до прихватања неадекватног модела за даље изучавање понашања возила.

Процес валидације модела је итеративан, и састоји се у решавању четири одвојене групе проблема:

- Дефинисање домена валидности модела
- Дефинисање параметара за валидацију модела
- Дефинисање метрике за валидацију модела
- Дефинисање граничних вредности за прихватање модела

Домен за који је потребно извршити валидацију модела је дефинисан према препорукама за валидацију модела датим у UIC 518 [30]. Према тој дефиницији, за целокупну валидацију нумеричког модела возила, потребно је размотрити све услове под којима се возило креће у току експлоатације, а који су обухваћени одговарајућим експерименталним испитивањем, као што су:

- Понашање возила при кретању на правцу,
- Понашање возила при кретању кроз кривине
 - Малог полупречника
 - Средњег полупречника
 - Великог полупречника
- узимајући у обзир различите вредности недостатка надвишења и различит квалитет колосека.

Валидацију модела, у зависности од потреба, могуће је извршити и за поједине под-домене, као на пример за област која обухвата кретање по правом колосеку и у кривинама средњег и великог полупречника. У том случају, валидација модела се не врши за кретање возила у кривинама малог полупречника, што не умањује валидност модела, али ограничава његову употребу у предвиђању понашања железничког возила.

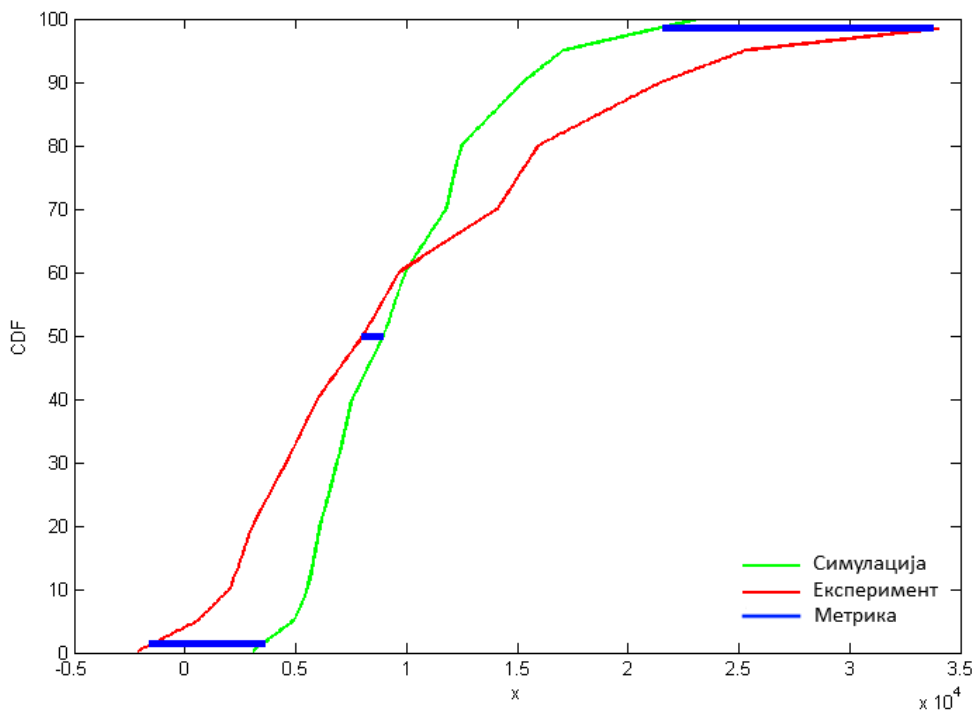
4.1 ВАЛИДАЦИОНА МЕТРИКА

Методологија валидације модела железничких возила још увек није јасно дефинисана у важећим стандардима и прописима. Препоруке везане за валидацију модела које су дате у UIC [30] прописима, као и препоруке дате у оквиру “DYNOTrain” пројекта су засноване на оцени статистичких показатеља поређених сигнала. Параметри који се користе за валидацију модела су параметри дефинисани у UIC [30] и EN14363 [31] стандардима за сертификацију возила.

Валидациона метрика која се користи у наведеним препорукама је заснована на поређењу средњих вредности (mean value), средње квадратних вредности (root mean square) и екстремних вредности сигнала (0,15% и 99,85%), добијених из одговарајућих кумулативних функција.

Обзиром да се средња вредност и средња квадратна вредност могу изразити кроз вредности кумулативне функције, предложене метрике за валидацију се заснивају на поређењу три вредности за изабране параметре, као што је то приказано на слици 4-2.

Претпоставимо да за изабрани параметар можемо на основу резултата симулације и експерименталних резултата да формирамо кумулативне функције F и G , респективно.



Слика 4-2. Приказ валидационе метрике предложене од стране О.Polach-а и UIC 518

На основу метрике, предложене од стране О.Polach-а [64] и UIC-а, оцена слагања експеримента и симулације, врши се на основу разлике функција у две екстремне вредности:

$$d(F, G) := \sup(|x(F: 0,15\%) - x(G: 0,15\%)|, |x(F: 99,85\%) - x(G: 99,85\%)|) \quad (4-1)$$

Поред поређења екстремних вредности, предложена метрика врши и поређење средњих вредности, за све параметре осим за убрзања, где се пореде RMS вредности сигнала, на следећи начин:

$$d(F, G) = |x(F: 50\%) - x(G: 50\%)| \leq d_{gr} \quad (4-2)$$

Приказана метрика има два значајна недостатка:

1. Не раздваја доприносе одступања средњих вредности и одступања варијација посматраних величина, што отежава валидацију модела
2. Оцена слагања кумулативних функција се базира на разлици кумулативних функција у само три тачке (средња вредност или RMS, 0,15% и 99,85%), не узимајући у обзир комплетну кумулативну расподелу.

Интересантно је приметити да метрике предложене од стране UIC-а и O.Polach-а, не узимају у обзир разлику у фазама између поређених сигнала. Ово је сасвим очекиван недостатак предложених метрика, који се јавља из два разлога. Први разлог проистиче из особина сигнала који се пореде: постизање добре синхронизације сигнала стохастичког карактера, који при томе имају значајне високофреквентне компоненте, је изузетно тешко. Други разлог је условљен самим улазним подацима за симулацију и резултатима који се добијају експерименталним испитивањем возила: приликом симулације понашања железничких возила, као улазни податак користи се снимак стварног стања колосека, изражен кроз одступања колосека од идеалног профила. Строго гледајући, након проласка једне композиције, па и самог возила за снимање стања колосека, долази до промене одступања, па самим тим, улазни подаци за симулацију и услови под којима је се извршило испитивање, нису идентични.

Предности предложене метрике огледају се у томе што се пореде вредности које се користе приликом експерименталног испитивања железничких возила. Разлика између кумулативних функција се одређује дуж апсцисе, што у основи представља разлику одговарајућих вредности параметара који се пореде. Валидациона метрика, формирана на овај начин, разлику изражава у одговарајућим јединицама параметара који се пореде (у kN за силе или у m/s^2 за убрзања), што представља велику предност јер је врло разумљива за примену од стране инжењера.

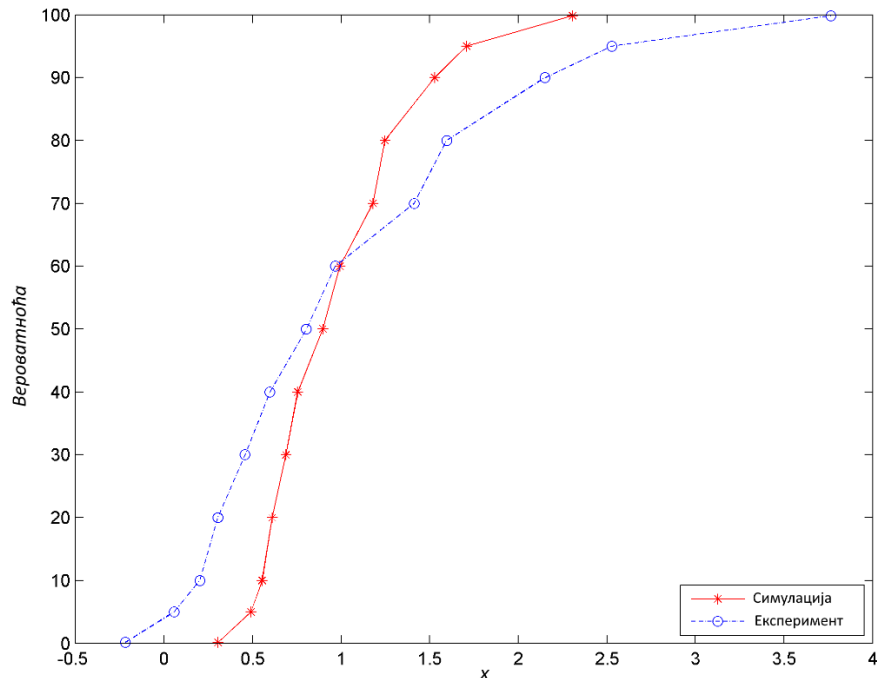
4.1.1 Предлог нове валидационе метрике

Узимајући у обзир недостатке приказаних валидационих метрика које се користе за валидацију модела железничких возила, развијена је нова валидациона метрика, која у већој или мањој мери исправља наведене недостатке.

С обзиром да се оцена о динамичком понашању возила, применом експерименталних испитивања, доноси на основу вредности параметара добијених из кумулативних функција, нова метрика се заснива на поређењу кумулативних функција вероватноће.

Да би се добила боља оцена о слагању кумулативних функција параметара, формираних на основу вредности сигнала у временском домену, добијених симулацијом (у даљем тексту SCDF) и експерименталним испитивањем (у даљем тексту ECDF), поређење се врши у већем броју тачака (већем од три које су

дефинисане у препорукама UIC-a и код Polach-a), као што је приказано на слици 4-3. Поређењем варијабилности између две кумулативне функције, за унапред утврђене вредности вероватноће појављивања поређених функције, проверава се колико једна кумулативна функција (SCDF), одступа од друге (ECDF).



Слика 4-3. Приказ изабраних тачака за поређење кумулативних функција новом метриком

Нова валидациона метрика се формира кроз следеће кораке:

1. На основу сигнала у временском, односно, просторном домену, формирају се одговарајуће кумулативне функције (SCDF и ECDF), које су описане са више од 10 тачака (у даљем тексту је број тачака којима се описују кумулативне функције означен као n_1 , односно n_2),
2. Свака од кумулативних функција се даље посматра као нова променљива, која се користи за оцену слагања кумулативних функција,
3. Оцена слагања кумулативних функција врши се користећи Фишеров тест. На основу добијеног резултата, према Фишеровој расподели, рачуна се вероватноћа слагања две кумулативне функције, на основу броја тачака са којим су описане CDF функције.
4. Тест статистика за оцену разлике између кумулативних функција, дефинисана је на следећи начин: $x = \frac{s_1^2}{s_2^2}$, где s_1 и s_2 представљају варијансе променљивих x_1 и x_2 , при чему се претпоставља да дате променљиве имају једнаке степене слободе $d_1 = n_1 - 1$ и $d_2 = n_2 - 1$.
5. Вероватноћа једнакости варијанси посматраних променљивих рачуна се на основу Фишер-ове расподеле за степене слободе променљивих d_1 и d_2 [54], према следећој једначини:

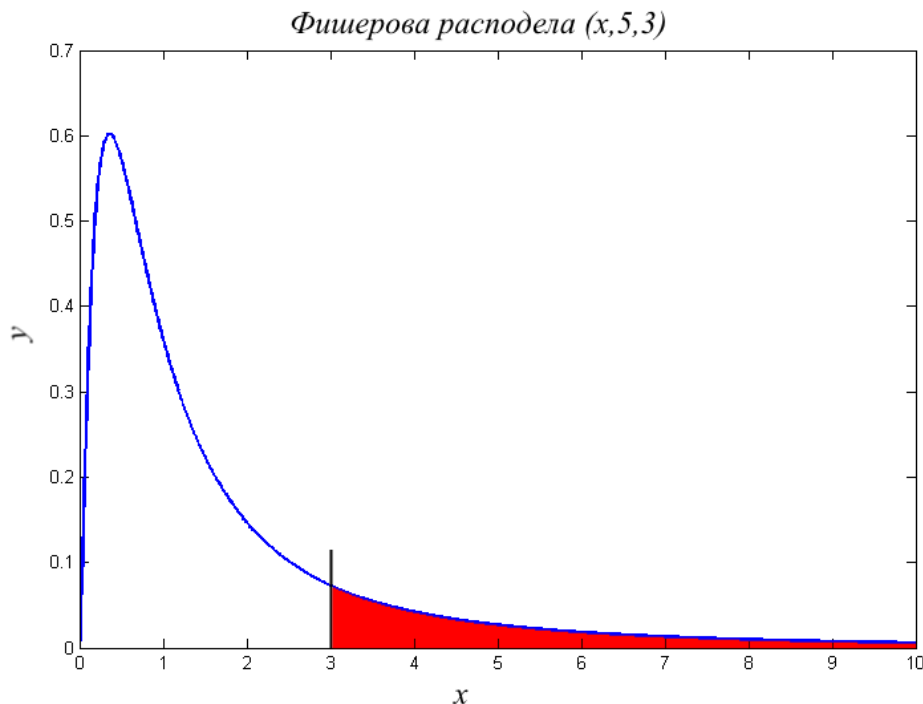
$$f(x, d_1, d_2) = \frac{\sqrt{\frac{(d_1 x)^{d_1} d_2^{d_2}}{(d_1 x + d_2)^{d_1 + d_2}}}}{xB\left(\frac{d_1}{2}, \frac{d_2}{2}\right)} =$$

$$= \frac{1}{B\left(\frac{d_1}{2}, \frac{d_2}{2}\right)} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{d_1}{2}} x^{\frac{d_1}{2}-1} \left(1 + \frac{d_1}{d_2} x\right)^{-\frac{d_1+d_2}{2}} \quad (4-3)$$

где је са B је означена бета функција, позната и као Ојлеров интеграл, која се може написати у следећем облику:

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt \quad (4-4)$$

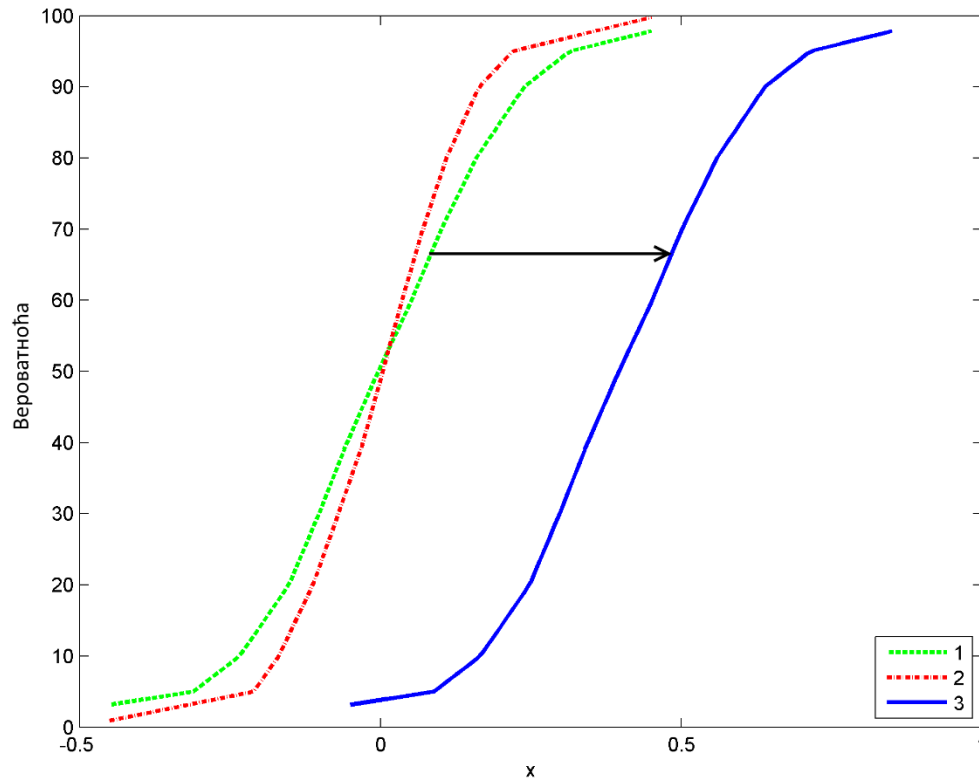
Оцена једнакости двеју кумулативних функција, формирана на овај начин, представља вероватноћу слагања, одређену на основу Фишерове расподеле, за израчунату тест статистику и за одговарајући статистички број степени слободне променљивих који се пореде. Графички гледано, валидациона метрика представља површину коју ограничавају Фишера крива, апсциса и, са леве стране, добијена тест статистика, што је приказано на слици 4-4.



Слика 4-4. Графички приказ валидационе метрике

Овако дефинисана валидациона метрика описује у ком степену постоји слагање две променљиве у кумулативним функцијама, што значи да пореди облике кривих две кумулативне функције, а да при томе не узима у обзир међусобни положај дуж

апсцисе. Ово практично значи да ће валидациона метрика дати исту вредност за поређење две кумулативне функције, без обзира на њихову фазну разлику. Другим речима, валидациона метрика даје исту вредност за поређење кумулативних функција 1 и 3, као и 2-3 приказаних на слици 4-5, при чему крива 3 представља криву 1 померену дуж апсцисе за вредност 0,4.



Слика 4-5. Утицај промене средње вредности сигнала на валидациону метрику

С обзиром да се померањем дуж апсцисе мења средња вредност посматране променљиве, а што је приликом валидације модела од посебног значаја, додатна статистика која узима у обзир средњу вредност сигнала, је дефинисана на следећи начин:

$$M = \frac{(M_1 - M_2)}{\sup(M_1, M_2)}, \text{ ако је } M_1 = M_2 \text{ онда је } M = 0 \quad (4-5)$$

Валидациона оцена која представља укупну оцену сличности две кумулативне функције, у ознаци OS_x , може се изразити на следећи начин:

$$OS_x = f(x, d_1, d_2) * (1 - M) \quad (4-6)$$

при чему је са индексом x означен параметар за који се врши валидација модела.

Предложена валидациона метрика је нормирана у дијапазону $[0,1]$, при чему је са 1 означено идеално слагање две кумулативне функције.

Предности нове метрике, у односу на метрике предложене од стране О.Polach-а [64] и UIC-а [30] су:

1. Оцена слагања кумулативних функција се врши у знатно већем броју тачака.
2. Пореди се варијабилност кумулативних функција
3. Предложена оцена је нормирана у дијапазону $[0,1]$
4. Постоји могућност дефинисања прага прихватљивости сличности две кумулативне функције, односно једнакости два сигнала у временском (просторном) домену

Недостаци предложене валидационе метрике су:

1. Разлика у фазама поређених сигнала није узета у обзир
2. Не разликују сигнале различитих фреквентних спектра.

Као што је већ наведено, прецизну синхронизацију између поређених сигнала је тешко постићи, па фазна разлика међу сигналима често није последица одступања модела од експеримента, већ недостатка синхронизације. Штавише, ако би се при валидацији модела некритички узимала у обзир фазна разлика између поређених сигнала, тада би доминантни утицај на оцену валидације могла имати управо ова разлика која није везана за модел или експеримент.

Уобичајен је поступак да се пре процеса валидације изврши калибрација модела. Том приликом врши се поређење резултата симулације са неким од експерименталних резултата генерисањем одговарајућих графика. Уколико би се, већ у овој фази формирања модела, уочило да за изабрану величину за поређење постоји значајно одступање резултата симулације од експерименталних података, било у фреквенцијама или амплитудама, процес калибрације би се прекинуо и приступило би се ревизији постојећег модела. Из овог разлога, практично је врло мало вероватно да ће се приступити валидацији, при којој ће се бити вршено поређење два сигнала једног параметра (симулација и експеримент) који су толико различити да је фазна разлика мешу њима последица неадекватног модела.

4.2 ИЗБОР ПАРАМЕТРА ЗА ВАЛИДАЦИЈУ МОДЕЛА

Избор параметара за валидацију модела је друга група проблема којој треба посветити пажњу при дефинисању валидационе метрике. Приликом експерименталног испитивања железничког возила неки параметри се директно мере, док се одређени број параметара, након додатне нумеричке обраде, израчунава. За сам процес валидације модела, најбољи приступ је поређење параметара који се мере при експерименталном испитивању.

С обзиром да је, у највећем броју случајева, веома тешко извести експеримент намењен првенствено за валидацију модела, величине које се мере приликом испитивања железничког возила за давање дозволе за кретање по колосеку представљају основне величине које се пореде приликом валидације модела.

Узимајући у обзир препоруке UIC 518 [30] и EN 14363 [31], параметри који би требало да се пореде приликом валидације модела су:

- Убрзања у вертикалном и бочном правцу
 - на сандуку вагона
 - изнад водећег обртног постоља
 - изнад вођеног обртног постоља
 - на обртном постољу (за возила са обртним постољима)
- Силе у контакту точак-шина
 - у бочном правцу
 - у вертикалном правцу

Док је мерење убрзања код експерименталног испитивања железничких возила обавезно, ситуација са мерењем сила је сложенија. Наиме, у зависности од одабране методологије за оцену возила и расположивих сензора за мерење, могу се мерити силе у контакту точак–шина коришћењем мерног осовинског склопа или се, са друге стране, може мерити сума бочних сила које делују на осовински склоп.

У првом случају сматрам да је врло битно извршити валидацију модела поређењем сила у контакту точак-шина, док се параметри за оцену сигурности кретања, као што су однос Y/Q и сума бочних сила које делују на осовински склоп могу потпуно занемарити у процесу валидације. Овакав приступ је оправдан тиме што се однос Y/Q и сума бочних сила рачунају на основу измерених величина, па уколико постоји велика сличност између резултата модела и измерених величина, то ће се задржати одговарајућа сличност између резултата модела и изведених величина.

Важно је напоменути да се у процесу валидације, оцењује степен у коме модел верно приказује понашање реалног објекта, а не погодност возила за кретање на колосеку, па стога није потребно вршити оцену параметара који се математички изводе на основу величина које се користе за валидацију модела. Валидан модел није онај који предвиђа одређено понашање возила, већ онај чија се предвиђања слажу са експерименталним оценама возила.

4.3 ГРАНИЧНЕ ВРЕДНОСТИ

Граничне вредности валидационе метрике одређују када је модел прихватљив за коришћење у даљим анализама динамичког понашања железничког возила. Због тога, поред избора валидационе метрике, одређивање граничних вредности валидационе метрике представља деликатан процес, који у великој мери утиче на резултат валидације.

Граничне вредности могу се дефинисати на основу унапред задате математичке зависности, на пример $1/3$ или 25% од неке величине, или са неком од сложенијих математичких формула, које могу имати један или неколико условних параметара,

као на пример Prud'Homme [68] једнакост за граничну вредност попречних сила које делују на колосек.

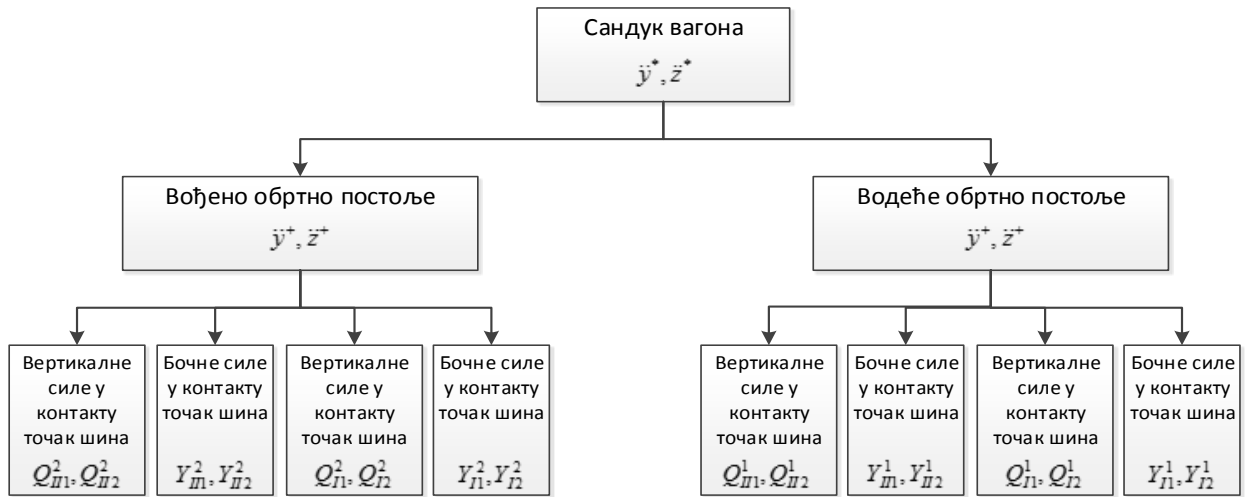
Са друге стране, веома често се у пракси граничне вредности дефинишу на основу дугогодишњих искуствених података, који углавном немају формалну математичку основу. Приликом формирања оваквих оцена најчешће су ангажовани експерти из одговарајуће области, који процењују дозвољене граничне вредности параметара. Дефинисање граничних вредности на овај начин има изразито субјективни карактер, и у случају да се оцена формира на основу малог броја мишљења експерата, може се доћи до погрешних или неодговарајућих вредности.

Један од најбољих прилаза за одређивање граничних вредности базира се на основу мишљења експерата, кроз одговарајући број поређења резултата валидације, при чему је истовремено над истим резултатима примењена и одговарајућа валидациона метрика, као што је то приказано у истраживању [65]. Нажалост, у том истраживању није било могуће успоставити зависност између мишљења експерата и изабране валидационе метрике, али су на бази експерименталних истраживања, и на основу резултата спроведене валидације неколико модела, формиране граничне вредности за изабране параметре за валидацију, који су дати у Табели 3-2.

Граничне вредности проистекле дате у Табели 3-2 узете су као референтне вредности за формирање граничних вредности валидационе метрике која се предлаже у овом раду. Валидација модела у овом истраживању извршена је примењујући валидациону метрику коју је предложио Polach [65] и валидациону метрику која је предмет овог рада. Гранична вредност за новопредложену метрику је формирана тако да резултати валидације обе посматране метрике буду што више сагласни, одустајући од ове сагласности у случајевима када су границе валидности према метрици коју је предложио Polach [65] оцењене као прешироке.

4.4 ВАЛИДАЦИОНА ХИЈЕРАРХИЈА

Железничко возило је сложени механички систем који се састоји од низа делова, подсклопова и склопова, који су међусобно спојени одговарајућим везама. Нумерички модели који се користе за оцену динамичког понашања су формиран тако да у великој мери управо описују делове и подсклопове железничког возила. С обзиром да се при валидацији нумеричких модела пореде вредности неколико параметара возила, потребно је дефинисати валидациону хијерархију, односно начин на који се проверава ваљаност комплетног модела.



Слика 4-6. Графички приказ валидационе хијерархије модела железничког возила са обртним постољем

У основи, постоје два приступа за оцену сагласности резултата експерименталног испитивања и резултата симулације модела железничког возила, и то:

- Дефинисање јединствене оцене за прихватање валидности модела
- Парцијална оцена по изабраним параметрима за валидацију модела

Узимајући у обзир предложену валидациону метрику и изабране параметре за валидацију модела железничких возила, процес валидације модела, у овом раду, извршиће се парцијално, при чему се оцењује сваки од предложених параметара, као што је то приказано на сликама 4-6 и 4-7, и то из два разлога:

- Формирање јединствене оцене за оцену модела само би математички усложнило ионако компликован процес валидације модела,
- Парцијалним оценама могуће је брзо и лако установити који параметар не задовољава услове валидације, што знатно олакшава даљу ревизију и унапређење постојећег модела.



Слика 4-7. Графички приказ валидационе хијерархије модела железничког возила без обртних постоља

5 МОДЕЛИРАЊЕ ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА

5.1 СИМУЛАЦИЈА ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА ЖЕЛЕЗНИЧКОГ ВОЗИЛА

Моделирање и симулација представљају неопходне алате у савременом развоју и пројектовању машинских система уопште, па тако и у области развоја и пројектовања савремених превозних средстава. Са развојем рачунарске технике настаје општа тенденција развоја сложених модела машинских система који теже да се посматрани физички систем опише што је могуће тачније и прецизније. Линеарне моделе возила са неколико степени слободе заменили су нелинеарни модели са неколико десетина степени слободе, који омогућавају проучавање широког спектра понашања подсистема и возила са аспекта сложеног механичког система.

Приликом моделирања механичких система, поред описивања веза између елемената система, веома је битно правилно дефинисати и увести одговарајуће побуде и улазне величине. Железничко возило представља сложени механички систем који се састоји од више делова који су међусобно повезани еластичним везама. Обзиром да се железничко возило креће по колосеку, приликом изучавања динамичког понашања возила је потребно узети у обзир еластичност и померање колосека, неправилности на колосеку, као и описати међусобну интеракцију између возила и колосека.

Типичне улазне податке за симулацију понашања железничких возила представљају карактеристике колосека описане са ширином колосека, надвишењима, пречницима кривина, неправилностима на колосеку, итд. На резултате симулације утичу и карактеристика возила, колосека и окружења, који представљају параметре модела.

Пренос сила са возила на подлогу врши се преко контакта точка и шине. Проучавајући геометрију точка и шине, већ при формирању првих модела за симулацију, Carter [70], а касније Johnson [71], Kalker [72], Piotrowski и Chollet [73], су описивању начина преноса сила између точка и шине дали кључно место у моделирању и симулацији понашања железничких возила. Данас, сви софтверски алати за моделирање и симулацију у области железничког возила посебну пажњу поклањају моделима контакта точка и шине. Геометрија точка и шине, врсте материјала и коефицијент трења између њих представљају неопходне улазне податке приликом симулације динамичког понашања железничких возила.

У зависности од брзине кретања возила, проучавање понашања возила може се извршити при:

- *Статичким условима.* Подразумева се да возило мирује на идеално равном колосеку.
- *Квазистатичким условима.* Ово стање подразумева идеализовано кретање возила са константном брзином у идеалној кривини са константним полупречником кривине и са константним контактом између точка и шине. Све силе које делују на возило и сви померају током кретања возила су константни.
- *Динамичким условима.* При динамичким условима кретања силе које делују на возило, а самим тиме и помераји, су временски зависни и углавном су условљени променљивом брзином кретања и неправилностима на колосеку.



Слика 5-1. Процес моделирања и симулације динамичког понашања железничких возила

У динамици железничких возила посебна пажња се посвећује изучавању понашања возила у квазистатичким и динамичким условима. Понашање возила у динамичким условима се спроводи кроз модалну анализу, анализу понашања возила у фреквентном и временском домену, као што је то приказано на Слици 5-1.

Типични излази из програма за симулацију динамичког понашања железничких возила су пре свега записи значајних величина у дигиталном облику, у форматима погодним за даљу обрада података. Поред дигиталног записа, типични излази су одговарајући дијаграми у временском, просторном и фреквентном домену као и одговарајуће анимације које графички приказују релативна померања елемената железничког возила.

5.2 ВАГОН ЗА ПРЕВОЗ РУДЕ ГВОЖЂА

Од 30-тих година XX века троделна обртна постоља представљају основни тип обртног постоља који се уграђује у теретне железничке вагоне са повишеним осовинском носивошћу [74]. Троделна обртна постоља се одликују релативно једноставном конструкцијом, коју је могуће јефтино произвести и одржавати у експлоатацији [75].

Главни недостатак ове врсте обртних постоља је „лоше“ понашање обртног постоља у динамичким условима експлоатације на правцу и при проласку кроз кривину [76]. Троделна обртна постоља карактерише нелинеарно понашање услед трења које делује као пригушни елемент у секундарном вешајном систему. Постојање зазора и директног контакта између појединих делова обртног постоља уводи додатне нелинеарности које у великој мери отежавају моделирање и симулацију понашања железничког возила.

Троделна обртна постоља карактерише високо динамичко оптерећење, мала критична брзина и променљив коефицијент трења у вешајном систему који зависи од услова експлоатације и контаминације контактних површина (уље, прашина и др.) [77].

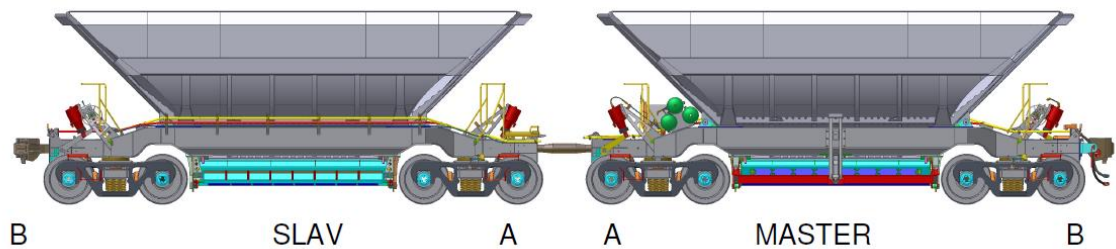
Теретна железничка возила са троделним обртним постољима се састоје од сандука вагона, намењеног преносу терета и два троделна обртна постоља. Карактеристике железничког возила типа „Fanoo 040“ за које је развијен модел дате су у Табели 1.

Табела 5-1. Основни подаци о железничком возилу

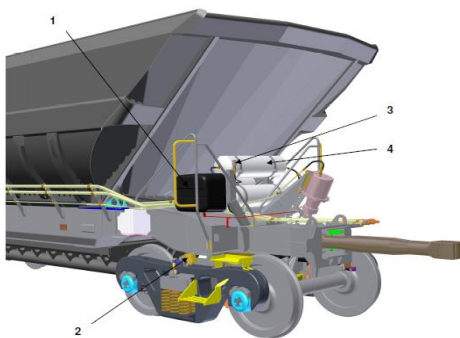
| | |
|--------------------------------------|---------|
| Растојање између обртних плоча | 6,744 m |
| Дужина возила преко одбојника | 10,3 m |
| Висина вагона | 3,64 m |
| Носивост | 102 t |
| Тежина празног вагона | 21,6 t |
| Тежина обртног постоља | 4650 kg |
| Растојање између осовинских склопова | 1,778 m |
| Пречник точкова | 0,915 m |
| Максимална брзина | 70 km/h |

Вагони за транспорт руде гвожђа крећу се у пару, као што је приказано на слици 5-2. Основна разлика у примарном и секундарном вагону састоји у томе што мастер вагон на себи има уграђену контролну јединицу за кочиони систем, као што је приказано на слици 5-3. Вагони су међусобно повезани крутом осовином уместо

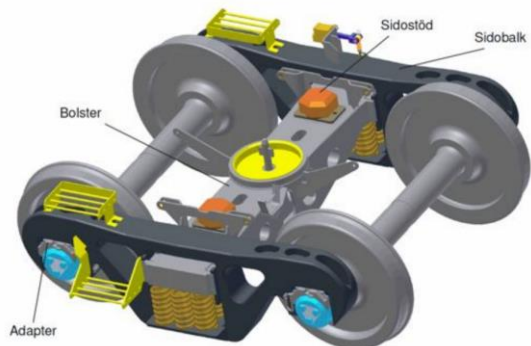
аутоматским квачилом. Оба вагона су опремљена са ASF-Keystone “Motion Control M976 Truck System” троосовинским обртним постољем, са фрикционим амортизерима, које је приказано на слици 5-4.



Слика 5-2. Вагон за превоз угља типа „Fanoo 040“



Слика 5-3. Контролна јединица за кочиони систем



Слика 5-4 ASF Motion Control M976 тродено обртно постоље

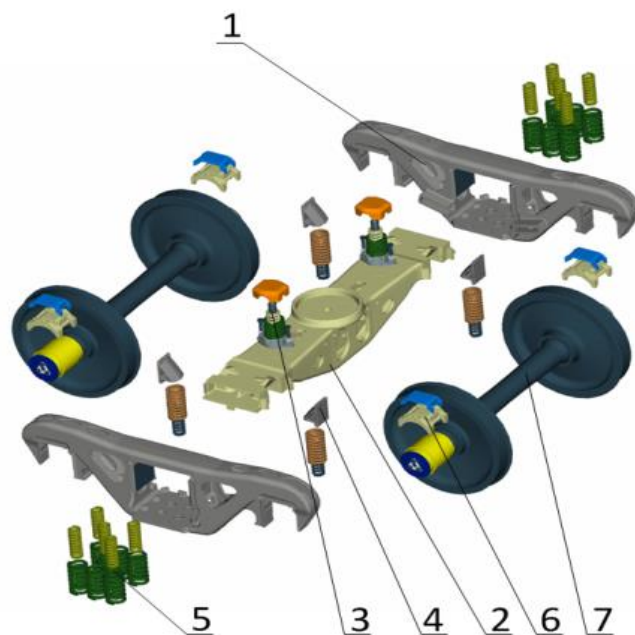
Троделна обртна постоља се одликују релативно једноставном конструкцијом. Основни делови обртног постоља, приказани на слици 5-5, су два бочна рама (1) која су међусобно повезана попречним носачем (2). Преко централне плоче и два бочна носача (3) остварена је веза између обртног постоља и сандука вагона. Бочни рамови су везани са осовинским склоповима (7) преко еластичних адаптера (6).

5.2.1 Претпоставке приликом формирања модела

Модел железничког возила за превоз руде угља формиран је уз следеће претпоставке:

- Еластичност попречног носача, бочних носача и осовинских склопова нису узете у обзир,
- Бочни носачи, који остварују контакт између обртног постоља и сандука вагона, остварују сталну еластичну везу између поменутих елемената вагона,
- Клинови су моделирани као елементи без масе,

- Еластични адаптери, преко којих се остварује веза између бочног рама и осовинског склопа, моделирани су као гумени елементи са великом крутошћу у вертикалном правцу,
- Сви зазори између елемената обртног постоља су укључени у модел,
- Контакт између клина и бочног носача је моделиран као дводимензионални фрикциони елемент,
- Контакт између клина и попречног носача је моделиран као једнодимензионални фрикциони елемент,



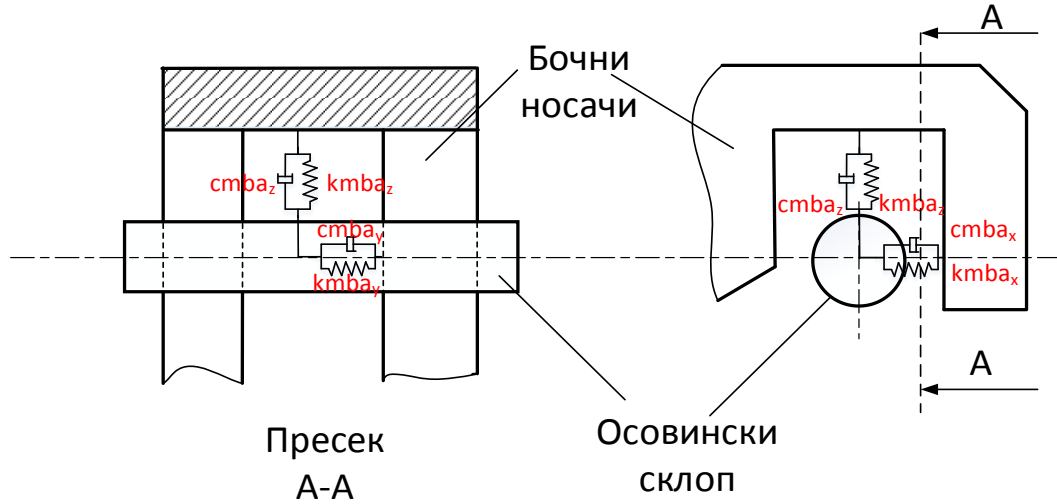
Слика 5-5. Троделно обртно постоље “Motion control M975”- Amsted rail, 1-бочни носачи, 2-попречни носач, 3-бочни носачи, 4-клин, 5-вешајни систем, 6-еластични адаптер, 7-осовински склоп

И поред тога што се троделно обртно постоље одликује једноставном конструкцијом, унутар њега се јављају многи извори нелинеарности. Један од основних извора нелинеарности је вешајни систем обртног постоља, који се састоји од сета цилиндричних опруга, које повезују бочни и попречни носач (1), и сета опруга, који повезује бочни носач са клином. Клинови у вешајном систему клизају, са једне стране по бочном носачу, и са друге стране по попречном носачу, као што је приказано на слици 5-5.

Еластична веза између осовинских склопова и бочних рамова омогућава већа релативна померања осовинских склопова у односу на стандардно троделно обртно постоље. Самим тим, побољшане су карактеристике кретања возила кроз кривине са могућношћу повећања брзине кретања [77], [78], [79].

5.2.2 Модел примарног вешајног система

Еластични адаптер даје могућност осовинском склопу да врши три translације, па је моделиран као еластични елемент са паралелно повезаним пригушењем у одговарајућим правцима, као што је приказано на слици 5-6.



Слика 5-6. Модел еластичног адаптера између осовинског склопа и бочног рама

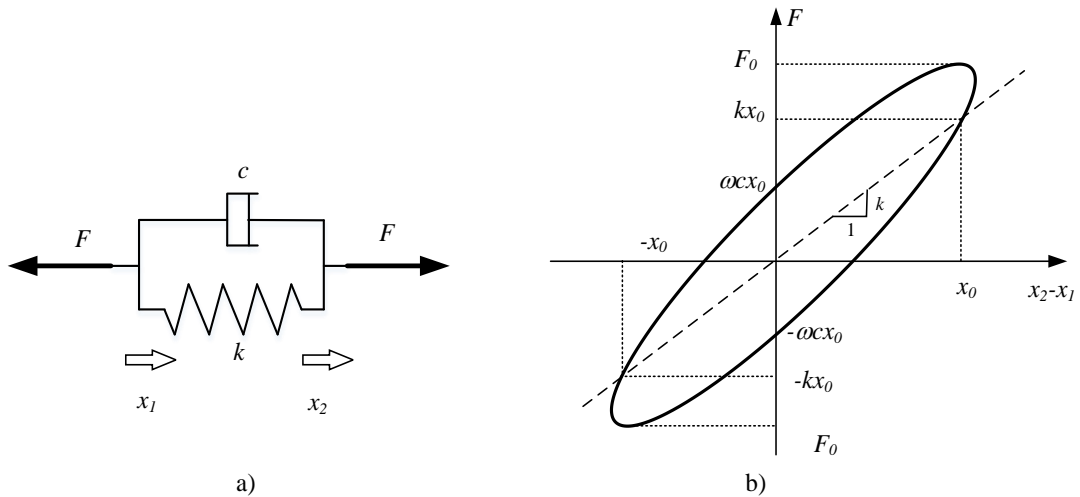
Еластични адаптер је представљен као паралелна веза линеарног вискозног пригушења c и линеарне опруге крутости k , као што је то приказано на слици 5-7. Ради анализе понашања представљеног модела еластичног адаптера Фуријевом анализом, посматраћемо његов одзив на хармонијску побуду са фреквенцијом ω и амплитудом x_0 . Уколико претпоставимо да су опруга и пригушник елементи без масе, тада можемо писати:

$$x_2 - x_1 = x_0 e^{j\omega t} \quad (5-1)$$

односно, сила на моделу се може изразити на следећи начин:

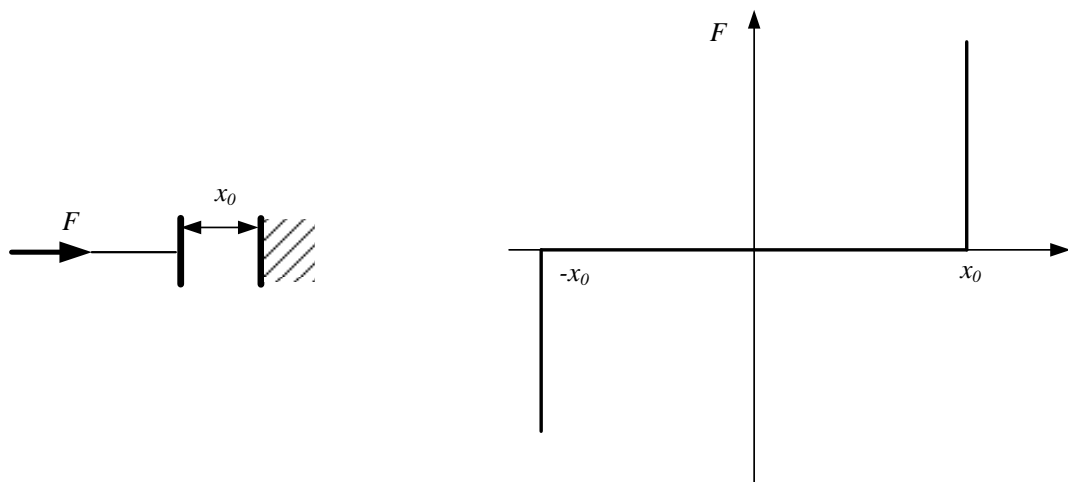
$$F = k(x_2 - x_1) + cd(x_2 - x_1)/dt = (k + j\omega c)x_0 e^{j\omega t} \quad (5-2)$$

Типична карактеристика паралелне везе опруге крутости k и пригушења c дата је на слици 5-7 б) [76].



Слика 5-7. а) Модел паралелне везе опруге и пригушења са вискозним трењем, б) Дијаграм сила-померај

Након што се исцрпе еластични ходови унутар еластичног адаптера долази до контакта између осовинског склопа и бочног рама. Овај контакт је узет у обзир као контакт два крута тела где долази до наглог пораста силе након одређеног помераја, као што је приказано на слици 5-8.

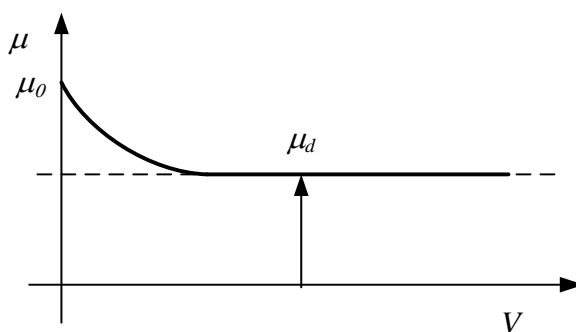


Слика 5-8. Контакт крутих тела, а) модел контакта крутих тела, б) графички приказ карактеристике контакта крутих тела

Поред успостављања везе и ограничавања транслаторног кретања између осовинског склопа и бочних рамова, такође су моделиране и одговарајуће еластичне везе, као и ограничења ротационих кретања увођењем одговарајућих еквивалентних елемената као код транслаторног кретања.

5.2.3 Модел секундарног вешајног система

Код троделних обртних постоља, пригушење вибрација у вертикалном, а често и у попречном правцу, врши се помоћу фриксионог трења [77]. Сила пригушења може се изразити преко Кулоновог закона, односно као производ нормалне силе у контакту и одговарајућег коефицијента трења μ [78, 79, 80]. Уопштено гледајући, коефицијент трења зависи од релативне брзине V као што је то приказано на слици 5-9. При малим брзинама коефицијент трења је описан са такозваним статичким коефицијентом трења, на слици 5-9 означен са μ_0 , а са повећањем брзине коефицијент трења опада и описан је са динамичким коефицијентом трења μ_d .



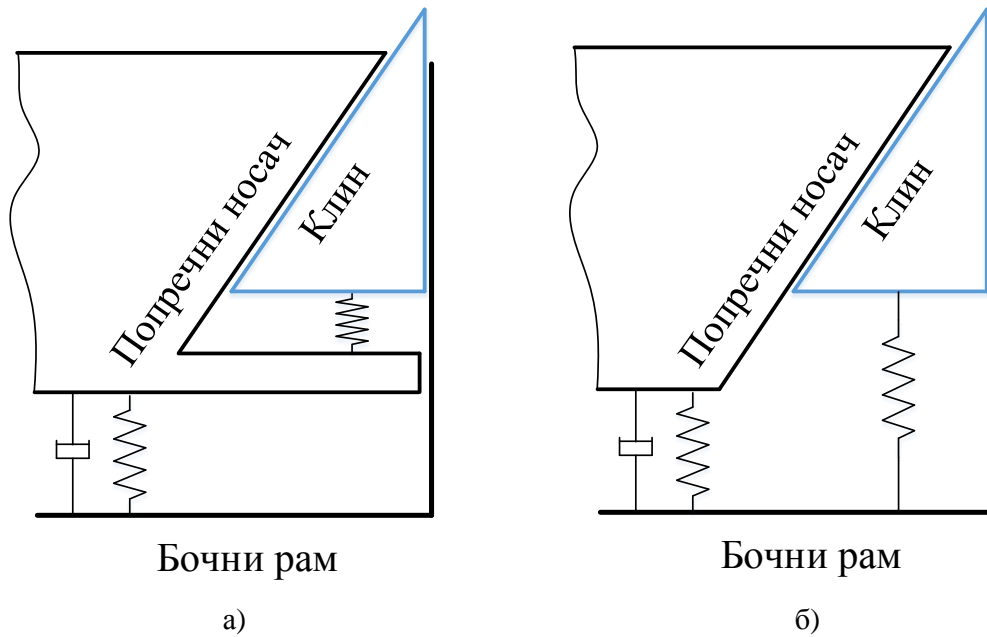
Слика 5-9. Коефицијент трења у зависности од брзине

Приликом симулације динамичког понашања железничког возила усвојена је динамичка вредност коефицијента трења зато што је од интереса проучавање понашање возила током кретања, па самим тим вредности статичког коефицијента трења нису од интереса.

У зависности од конструкционих решења, постоје два начина фриксионог пригушења и то [91]:

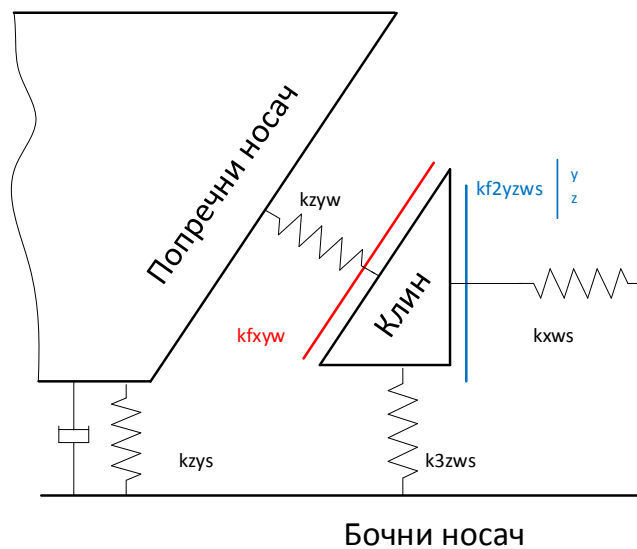
- Константно пригушење, приказано на слици 5-10 а)
- Варијабилно пригушење, приказано на слици 5-10 б)

Код обртних постоља са варијабилним пригушењем, који су уграђени у разматрање вагоне, сила пригушења се мења са променом међусобног положаја попречног носача и бочног рама. Уколико се претпостави да су клинови елементи чија се маса може занемарити, тада се силе трења у контакту клина и попречног носача, као и клина и бочног носача, могу одредити на основу модела приказаног на слици 5-10.

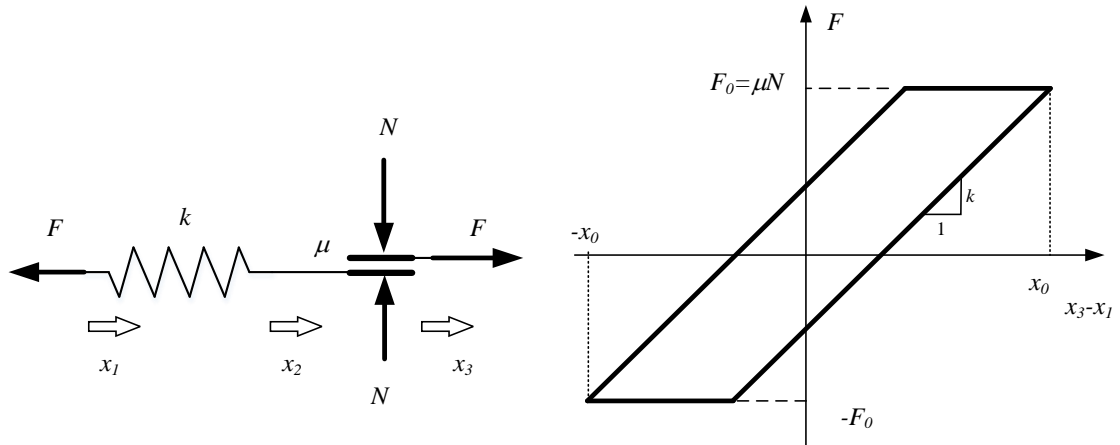


Слика 5-10. Фрикционо пригушење вибрација код троделних обртних постоља, а) са константним пригушењем, б) са варијабилним пригушењем

Веза између попречног носача и клина је описана са једнодимензионалним Saint Venant-овим елементом, Слика 5-12, док је веза између бочног носача и клина описана са дводимензионалним Saint Venant-овим елементом. Карактеристика Saint Venant-овог елемента је да омогућава такозвано „stick-slip“ кретање, што уводи додатну нелинеарност у модел [80, 81, 82, 83].



Слика 5-11. Модел вешајног система троделног обртног постоља

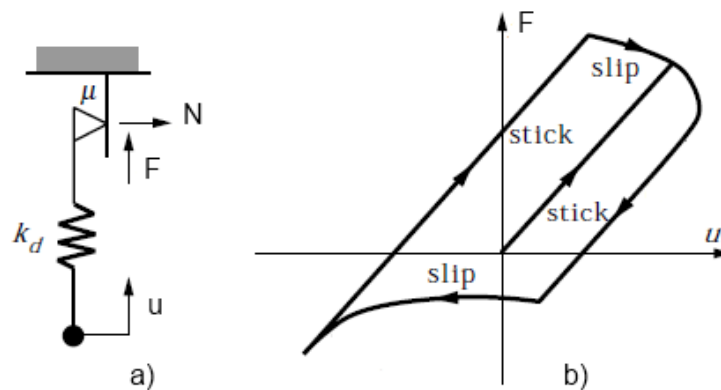


Слика 5-12. Модел једнодимензионог фрикционог блок– Saint Venant елемент са константном нормалном силом

За коефицијент трења μ , крутост опруге k , и константну нормалну силу N , уз претпоставку да елементи немају масу, и за хармонијску побуду са фреквенцијом ω и амплитудом x_0 , можемо писати:

$$x_3 - x_1 = x_0 e^{j\omega t} \quad (5-3)$$

при чему је дијаграм сила-померај за $\mu N < kx_0$ приказан на слици 5-12 б) [84,90].

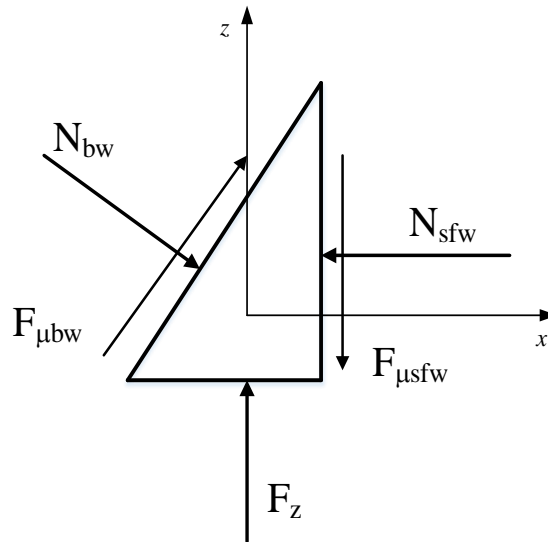


Слика 5-13. а) модел једнодимензионог фрикционог блок– Saint Venant елемент, б) Дијаграм сила – померај

Вибрације које се индукују на осовинском склопу путем примарног вешајног система се преносе на бочне рамове, па је стога и секундарни вешајни систем изложен вибрацијама. Услед тога, клинови у вешајном систему су такође изложени вибрацијама, што доводи до тога да нормална компонента силе између бочног рама и клина, као и попречног носача и клина, током кретања возила, није константна [85, 86].

Уколико побуда у фриксионом блоку (на слици 5-13 означено са u) и нормална сила (на слици 5-13 означено са N) има хармонијски карактер, померај и силе се могу изразити на следећи начин:

$$\begin{cases} u \\ N \end{cases} = \begin{cases} u_0 \cos(\omega_1 t + \phi) \\ N_0 \cos(\omega_2 t + \varphi) \end{cases} \quad (5-4)$$



Слика 5-14. Модел клина у вешајном систему возила

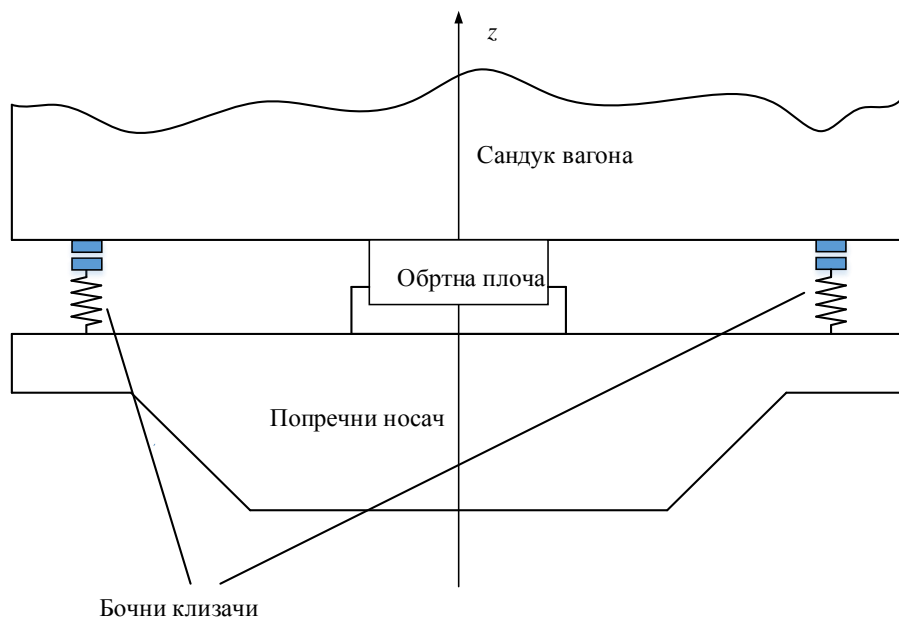
У моделу је усвојено да су клинови у секундарном вешајном систему вагона (слика 5-11) елементи који немају масу. Помераји и силе које делују на клин могу се одредити из услова равнотеже сила које делују на клин [78, 89, 91, 92], као што је то приказано на слици 5-14, на основу следећих једначина:

$$\begin{aligned} x: N_{bw} \sin \alpha - N_{sfw} + F_{\mu sfw} \cos \alpha &= 0 \\ z: F_z - N_{bw} \cos \alpha + F_{\mu bw} \sin \alpha - F_{\mu sfw} &= 0 \end{aligned} \quad (5-5)$$

5.2.4 Модел везе обртног постоља са сандуком вагона

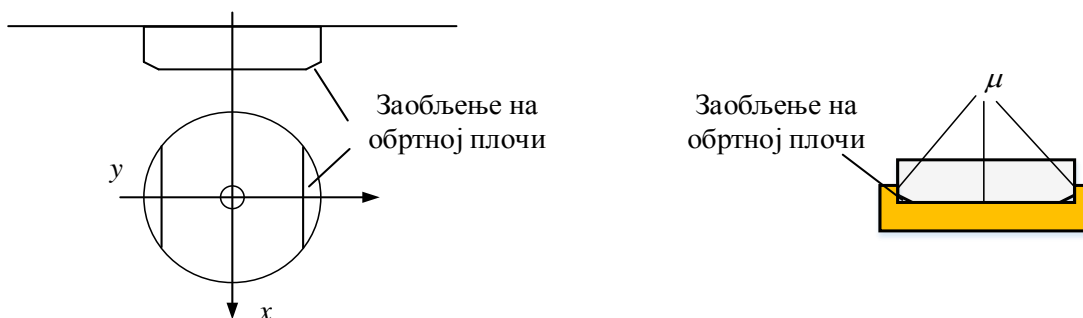
Веза између сандука вагона и обртног постоља остварена је преко обртне плоче и бочних клизача. С обзиром да се код овог типа вагона на обртна постоља преносе масе од 50 t, веза између обртног постоља и сандука вагона је остварена, уместо обртних шоља, помоћу обртних плоча [93], као што је приказано на слици 5-15.

Обртна плоча се налази на средини попречног носача на обртном постољу. Током кретања натовареног возила, 90% вертикалног оптерећења од сандука вагона се преноси на обртно постоље преко обртне плоче, док се осталих 10% оптерећења преноси преко бочних клизача [94].



Слика 5-15. Положај бочних клизача

При кретању празног возила на колосеку, 90% вертикалног оптерећења од сандука вагона се преноси преко бочних клизача, док се остатак оптерећења преноси преко обртне плоче.



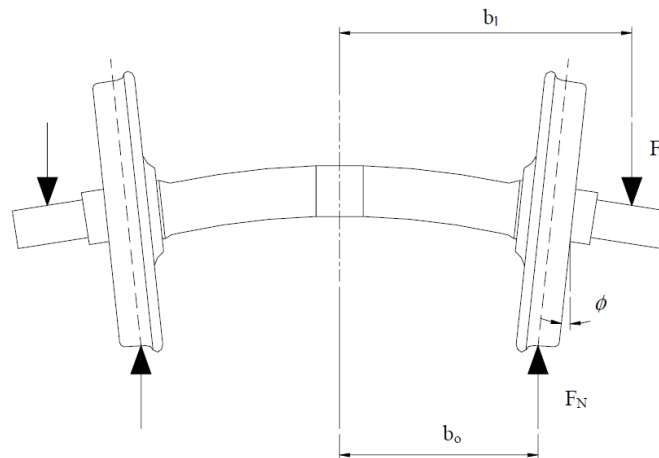
Слика 5-16. Модел обртне плоче

Оптерећења са сандука вагона на обртно постоље се преносе преко равне кружне плоче, као што је то приказано на слици 5-16 а). Да би се обезбедило да сандук вагона може да врши ротацију око подужне осе вагона, обртна плоча је израђена са одговарајућим заобљењима, као што је то приказано на слици 5-16 б).

5.2.5 Осовински склоп

Осовински склоп чине два точка која су круто спојена са осовином. Основна намена осовинских склопова је да:

- Носе укупну масу возила,
- Усмеравају кретање возила по колосеку,
- Преносе лонгитудиналне силе (силе кочења и вучну силу) на колосек,



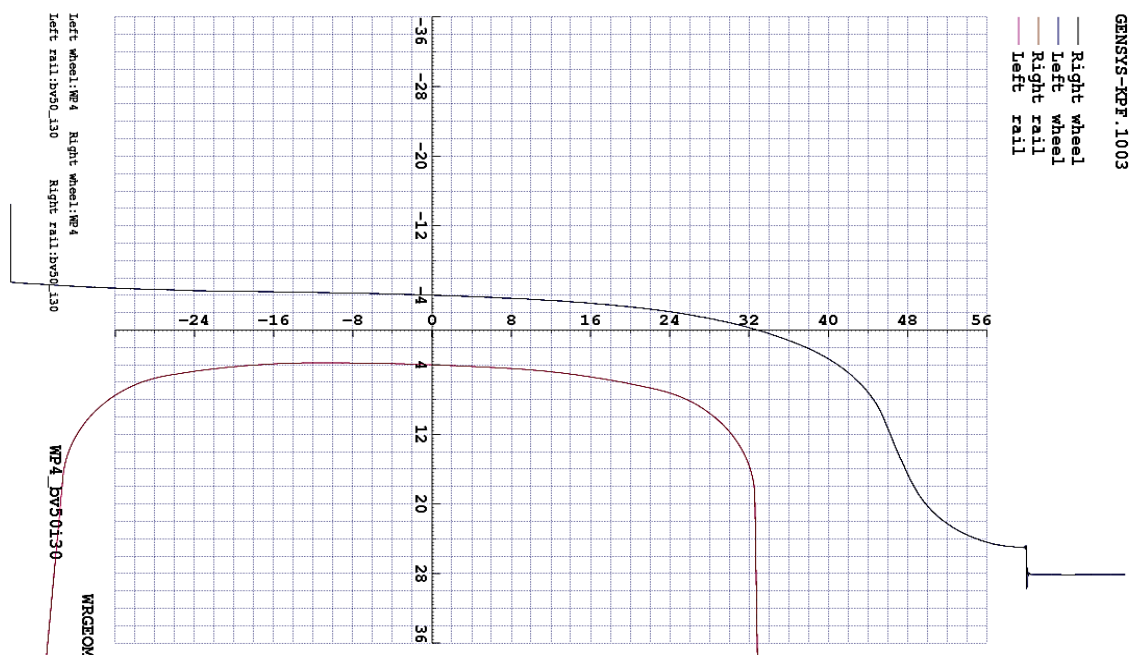
Слика 5-17. Савијање осовинског склопа натовареног возила

У истраживањима N. Чааг [95] показано је да еластичност осовинског склопа може значајно да утиче на динамичко понашање железничког возила. Међутим, приликом формирања модела претпостављено је да је осовински склоп круто тело. С обзиром да деформација осовинског склопа, посебно код натовареног возила, може имати значајан утицај на контакт точка и шине, приликом прорачуна основних параметара узета је у обзир деформација осовинских склопова натовареног возила, као што је то приказано на слици 5-17.

Вагон за превоз руде гвожђа, возило за које се формира нумерички модел, користи специјални оптимизовани профил точкава UNO-WP-4 МТАВ, који је приказан на слици 5-18.

Еквивалентна коничност за комбинацију UNO-WP-4 МТАВ профила точка и BV50 са нагибом колосека 1:30, који су коришћени приликом прорачуна контакта у софтверском пакету Gensys, дат је на слици 5-19.

Осовински склопови имају сопствене учестаности у дијапазону од 50-500 Hz [90], при чему су ове сопствене учестаности узете у обзир приликом прорачуна такозване функције контактних тачака за различите узајамне положаје точка и шине (за више информација погледати Прилог А). Одговарајуће $krft$ функције, које су саставни део софтверског пакета Gensys, описују контакт точка и шине са три контакте тачке, при чему се одговарајућа контактна геометрија, оптерећења и силе у контакту рачунају према Hertz-овој теорији [90], односно према упрошћеној Kalker-овој нелинеарној теорији [90].



Слика 5-18. Профил UNO-WP-4 МТАВ точка и профил шине BV50

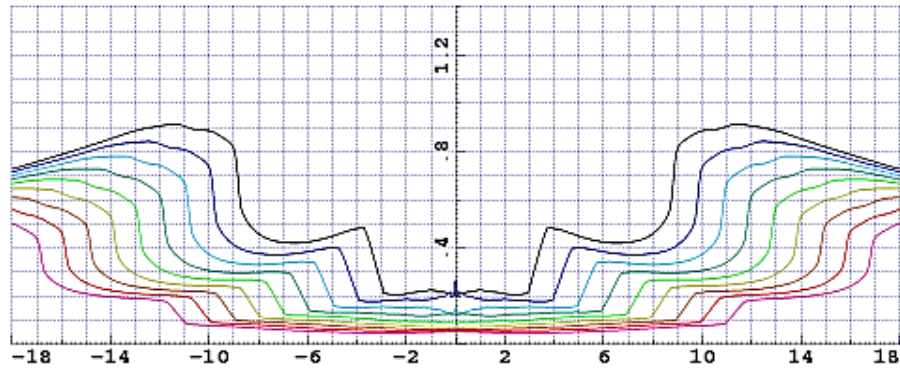
5.3 МОДЕЛ КОЛОСЕКА

Колосек има веома важну улогу у динамичком понашању железничких возила. Још од првих дана успостављања железничког саобраћаја, колосек, више или мање, треба да обезбеди сличне захтеве, као што су да:

- Обезбеди одговарајућу носивост,
- Обезбеди одговарајућу поузданост и сигурност кретања железничког возила,
- Спречи физичка оштећења и пренос нежељених вибрација на околину.

GENSYS-KPF.1003

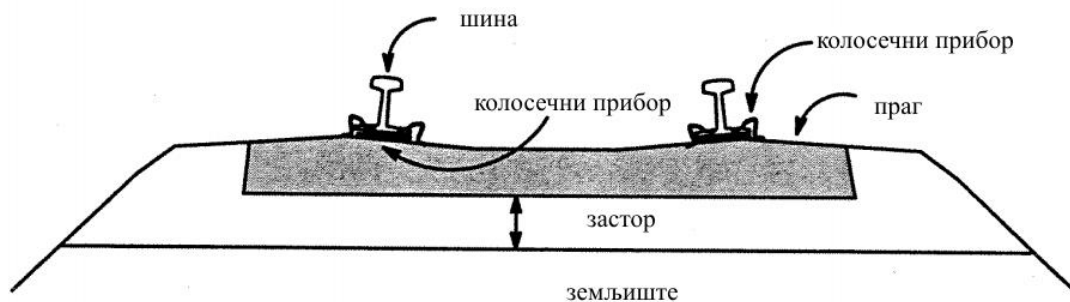
| Delta_Y= | | .1 | .5 | 2 | 3 | 4 | 6 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| Gauge= | 1425 | .215 | .217 | .209 | .244 | .480 | .425 |
| | 1427 | .203 | .197 | .187 | .179 | .207 | .384 |
| | 1429 | .132 | .138 | .153 | .156 | .152 | .341 |
| | 1431 | .124 | .126 | .121 | .126 | .132 | .156 |
| | 1433 | .087 | .088 | .096 | .101 | .108 | .117 |
| | 1435 | .063 | .071 | .077 | .082 | .088 | .101 |
| | 1437 | .065 | .060 | .064 | .068 | .071 | .083 |
| | 1439 | .057 | .056 | .055 | .056 | .058 | .067 |
| | 1441 | .054 | .051 | .047 | .047 | .048 | .055 |



Left wheel:WP4 Right wheel:WP4
 Left rail:bv50_130 Right rail:bv50_130
 WP4_bv50i30

Слика 5-19. Еквивалентна коничност на правом колосеку

Најважнији задатак колосека је да пренесе оптерећења која се јављају у контакту точак-шина на земљиште, као и да обезбеди вођење возила по унапред задатој траси. Ово је обезбеђено формирањем колосека кроз неколико слојева, ако што је то приказано на слици 5-20.

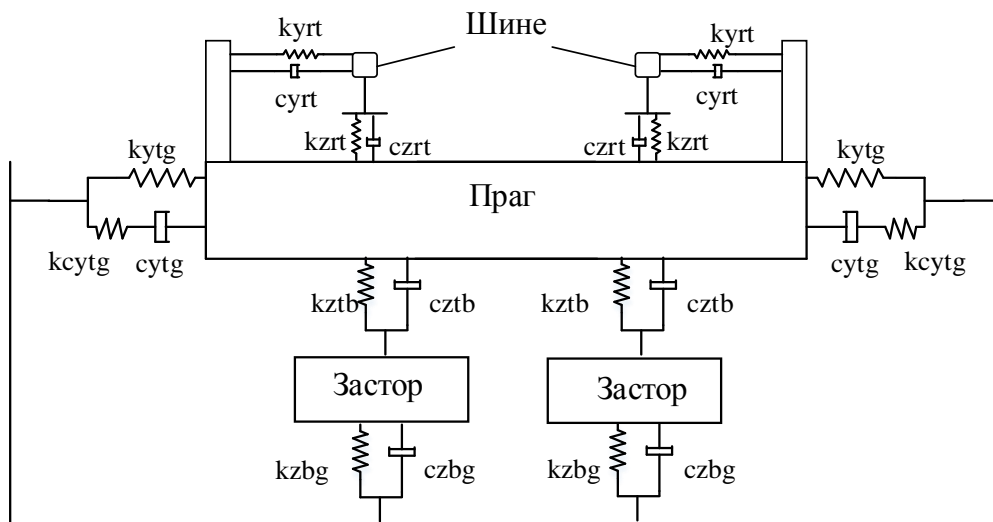


Слика 5-20. Структура колосека

Као што се може видети са слике 5-20, основне компоненте колосека су:

- Шине
- Прагови
- Колосечни прибор

Шине преносе оптерећења која се генеришу у контакту са точковима железничког возила, преко колосечног прибора и прагова, на застор и околно земљиште. У



Земљани труп

Слика 5-22. Модел колосека

Карактеристика колосека утиче на понашање возила, а посебно на генерисање сила у контакту точак-шина на вишим фреквенцијама. Крутости k и пригушење c одговарајућих елемената у моделу колосека су одабране на основу измерене карактеристике колосека која је приказана на слици 5-23 [96]. Важно је напоменути да је вредност крутости k_{zrt} променљива током кретања возила по колосеку, услед промене крутости при преласку преко прагова, и дата једначином 5-6.

За разлику од стандардних мерења карактеристика колосека, у Шведској се мери и статичка и динамичке карактеристике колосека. Шведско мерно возило (Rolling Stiffness Measurement Vehicle - RVMS) мери динамичке карактеристике колосека до 50 Hz.

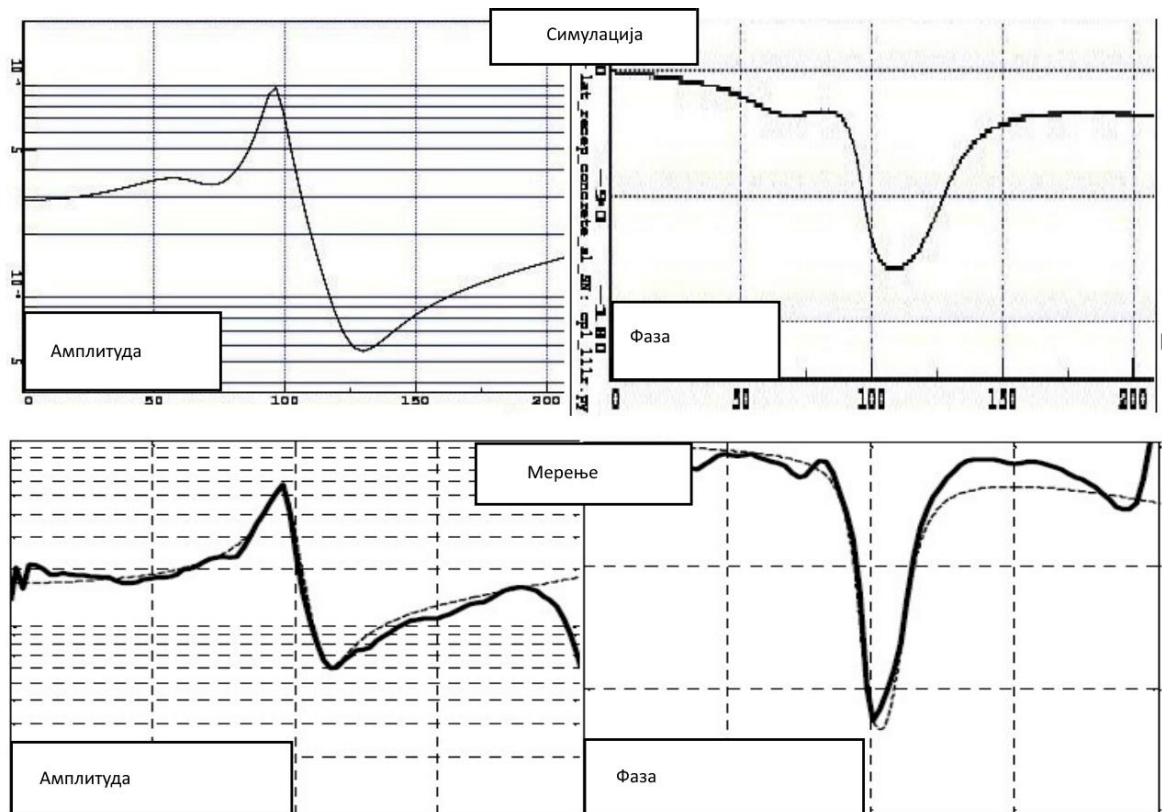
При брзини кретања од 60 km/h, RVMS колосек је оптерећен са две масе које имају синусну промену у току времена са учестаношћу до 50 Hz. У основи, RVMS мери убрзања и силе које се јављају на колосеку [96], а на основу којих је могуће одредити динамичку вертикалну крутост колосека помоћу једначине:

$$H(f) = \frac{x(f)}{F(f)} = \frac{\frac{1}{k}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j2\zeta\left(\frac{f}{f_0}\right)} \quad (5-7)$$

при чему је са f_0 представљена сопствена учестаност колосека, а са ζ је описана вредност коефицијента пригушења колосека.

Бочну крутост колосека није могуће измерити са RVMS колима. Ова крутост је такође битна за кретање возила по колосеку, и она је одређена на основу вредности

у вертикалном правцу, применом предлога датих у истраживањима Afferrante-a и Ciavarella-e [95].



Слика 5-23. Преносне функције колосека

Модел колосека формиран на овај начин омогућује да се, приликом симулације динамичког понашања возила, узму у обзир:

- Промена крутости колосека услед преласка возила изнад прагова,
- Изменом крутости k_{zrt} могуће је испитати понашање возила при кретању на колосеку са дрвеним као и са бетонским праговима,
- Променом крутости и коефицијената пригушења на колосеку могуће је симулирати кретање возила у различитим временским условима (летњи период, зимски период)

5.4 КОЕФИЦИЈЕНТ ТРЕЊА У КОНТАКТУ ТОЧАК ШИНА

Динамичко понашање возила, поред других битних параметара, битно зависи од коефицијента трења у контакту точак-шина. Са једне стране, висока вредност коефицијента трења резултује са бољим радијалним управљањем возила при проласку кроз кривину, док са друге стране доводи до повећања сила клизања у контакту точак-шина па самим тим и до повећања трења и хабања точкова и шина [88, 90]. Коефицијент трења у највећој мери зависи од временских услова у којима се креће возило. У јесен и пролећа, током дужих кишних периода, вредност коефицијента трења се спушта до 0,1. Са друге стране, током дужих сушних

периода у лето или зиму вредности коефицијента трења расту и до 0,6. Средња вредност коефицијента трења током године најчешће износи између 0,3 и 0,5 [96].

При симулацији динамичког понашања возила усвојена је вредност коефицијента трења од 0,4, као најчешћу вредност коју коефицијент трења има током године.

5.5 НЕПРАВИЛНОСТИ КОЛОСЕКА

Свако одступање колосека од идеалног профила назива се неправилност колосека. Ове неправилности имају велики утицај на генерисање сила и вибрација у контакту точак-шина, а самим тим и на читав систем колосек-возило. Са мерним колима у Шведској се снимају четири типа неправилности, као што је то приказано на слици 5-24, и то:

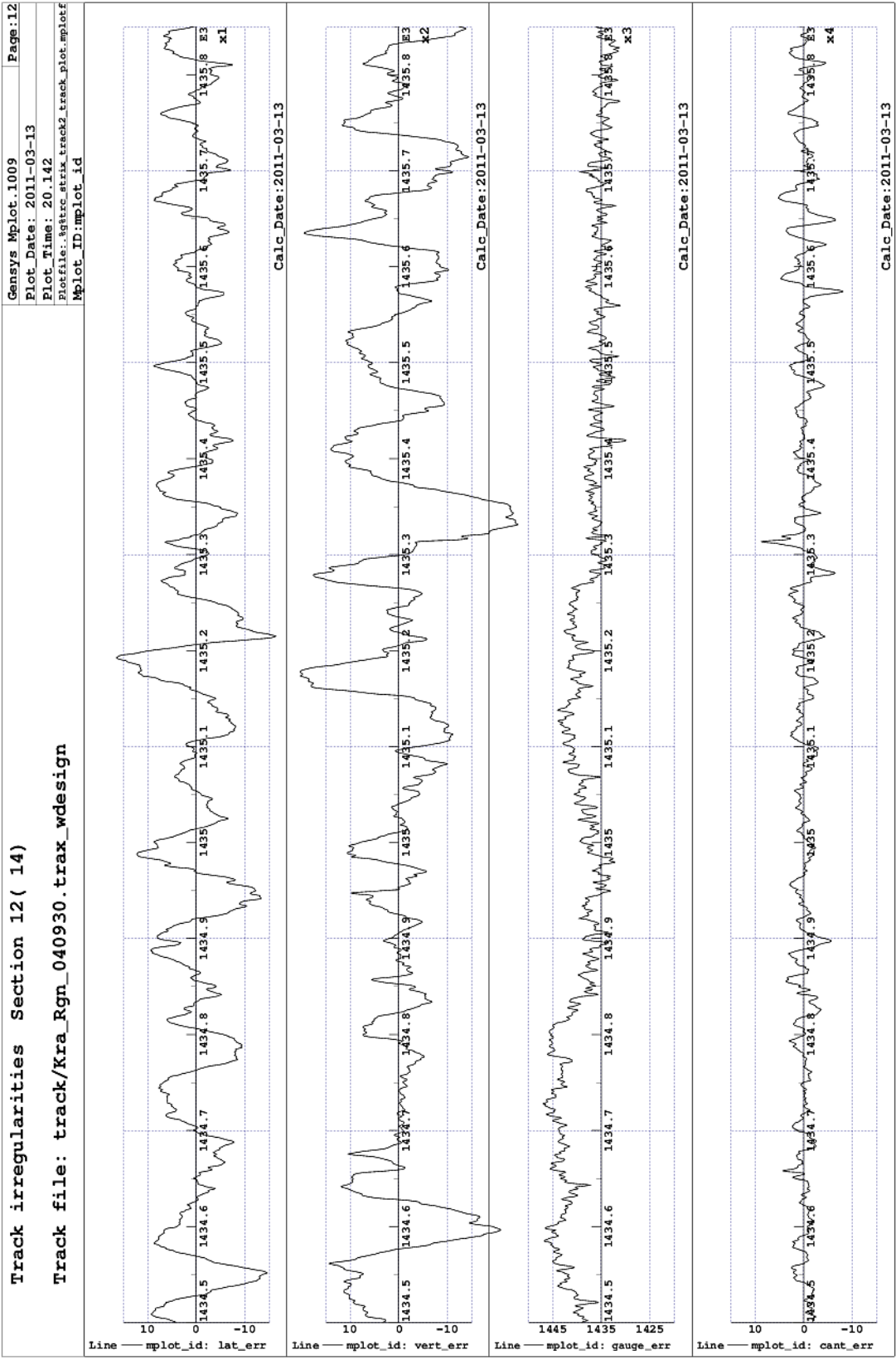
- Одступања колосека у вертикалном правцу,
- Одступања колосека у бочном правцу,
- Одступања колосека од номиналне ширине,
- Одступања колосека од пројектованог надвишења.



Слика 5-24. Неправилности на колосеку

Прикупљени подаци о неправилностима на колосеку су приказани у одговарајућем дигиталном формату и представљају један од улазних података у модел за симулацију динамичког понашања железничког возила.

Графички приказ података о неправилностима на колосеку коришћеним у симулацији динамичког понашања дат је на слици 5-25, док је целокупан приказ података о траси на којој је извршено експериментално испитивање дат у прилогу Б.



Слика 5-25. Неправилности на колосеку

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ

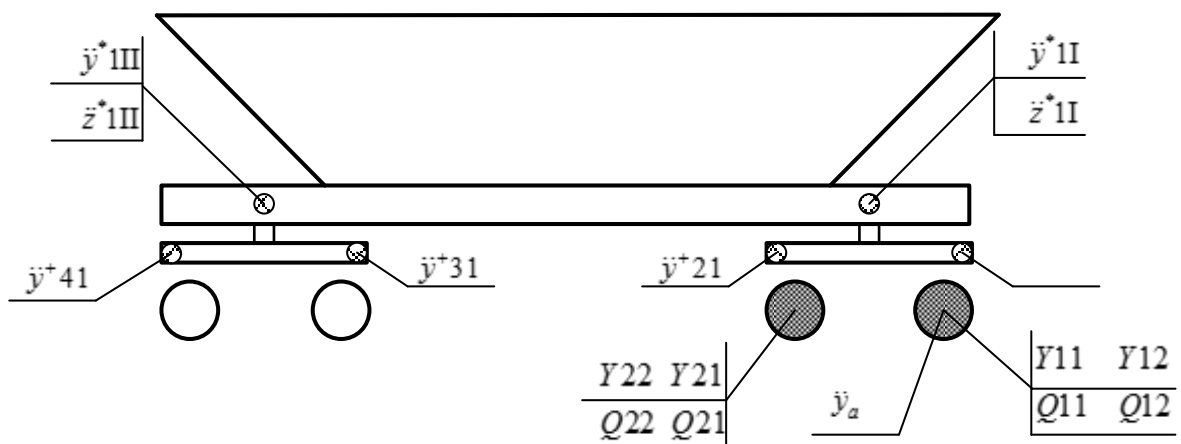
Као што је већ ређено, валидација модела подразумева поређење резултата добијених на основу развијеног модела и резултата експерименталног испитивања реалног система.

У овом поглављу дат је опис експерименталног испитивања железничког вагона за превоз руде гвожђа типа „Fano040“. Експериментално испитивање је извршено од стране компаније “Interfleet”, која је овлашћена за експериментално испитивање и издавање сертификата за кретање железничких возила на комерцијаним линијама у Шведској.

6.1 МЕРЕНЕ ВЕЛИЧИНЕ И РАСПОРЕД МЕРНИХ МЕСТА

Све мерене величине при експерименталном испитивању су прикупљане са фреквенцијом узорковања од 600 Hz и чуване у дигиталном облику. Мерена опрема и њен распоред на железничком возилу су (слика 6-2):

- Четири сензора за мерење убрзања (2 у вертикалном и 2 у бочном правцу) постављена изнад обртних плоча обртних постоља, на раму сандука вагона
- Четири сензора за мерење убрзања на обртним постољима, монтирани изнад осовина
- Један сензор за мерење убрзања, постављен на водећој мерној осовини за мерење некомпензованог убрзања у бочном правцу
- Два мерна осовинска склопа за мерење бочних и вертикалних сила
- Брзина је мерена на доданом точку који није опремљен кочионим системом
- Позиција возила је одређивана помоћу GPS система



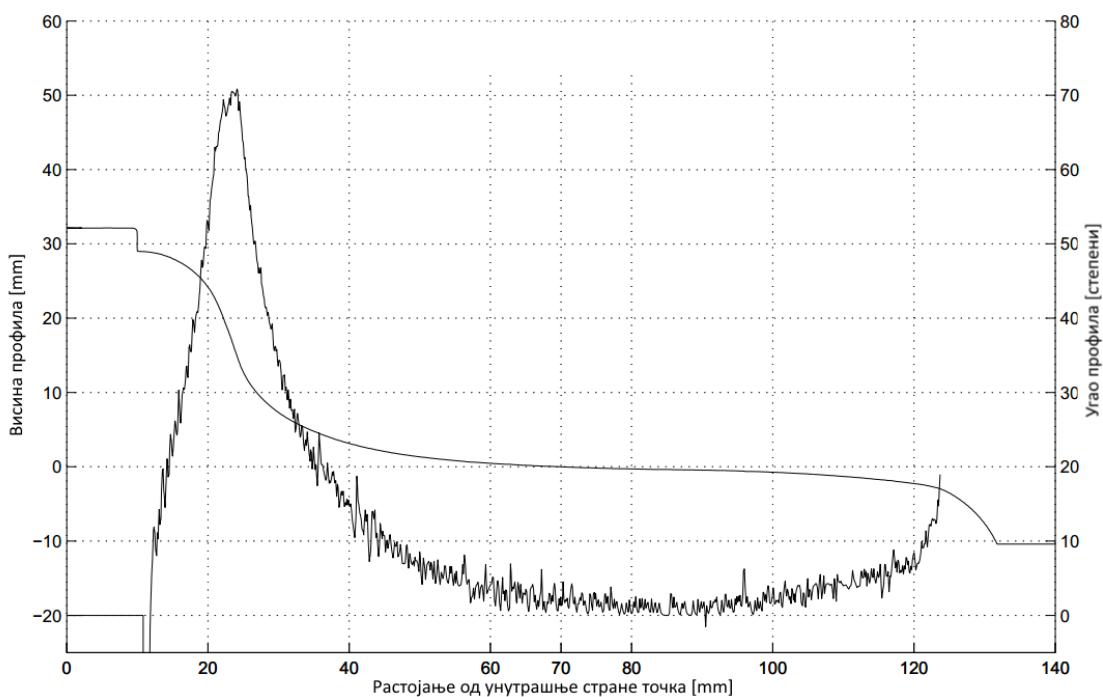
Слика 6-1. Распоред мерних места и мерене величине приликом експерименталног испитивања вагона типа „Fano040“

Приликом експерименталног испитивања мерене су следеће величине:

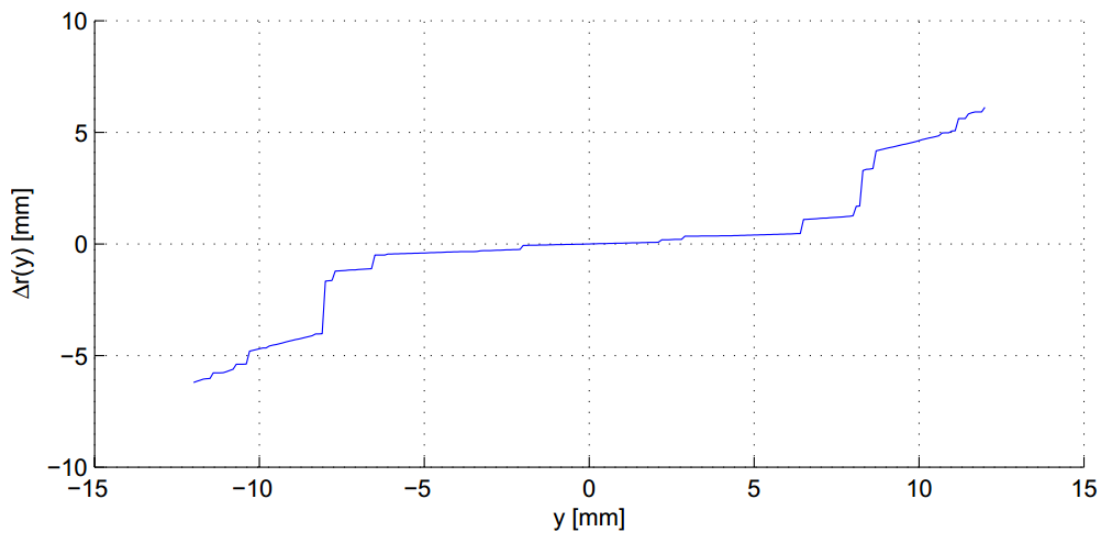
- Убрзања на раму сандука вагона изнад водећег обртног постоља у вертикалном и хотизонталном правцу $\ddot{z}^*1I, \ddot{y}^*1I$
- Убрзања на раму сандука вагона изнад вођеног обртног постоља у вертикалном и хотизонталном правцу $\ddot{z}^*1II, \ddot{y}^*1II$
- Убрзања у бочном правцу на крајевима бочних носача на водећем $\ddot{y}^+11, \ddot{y}^+21$, и вођеном $\ddot{y}^+31, \ddot{y}^+41$, обртном постољу
- Силе у контакту точак-шина, у хоризонталном и вертикалном правцу на точковим на водећој осовини $Y11, Y12, Q11, Q12$, и вођеној $Y21, Y22, Q21, Q22$, осовини водећег обртног постоља
- Убрзање у бочном правцу водеће осовине на водећем обртном постољу \ddot{y}_a

6.2 ПРОФИЛИ ТОЧКОВА И ШИНА

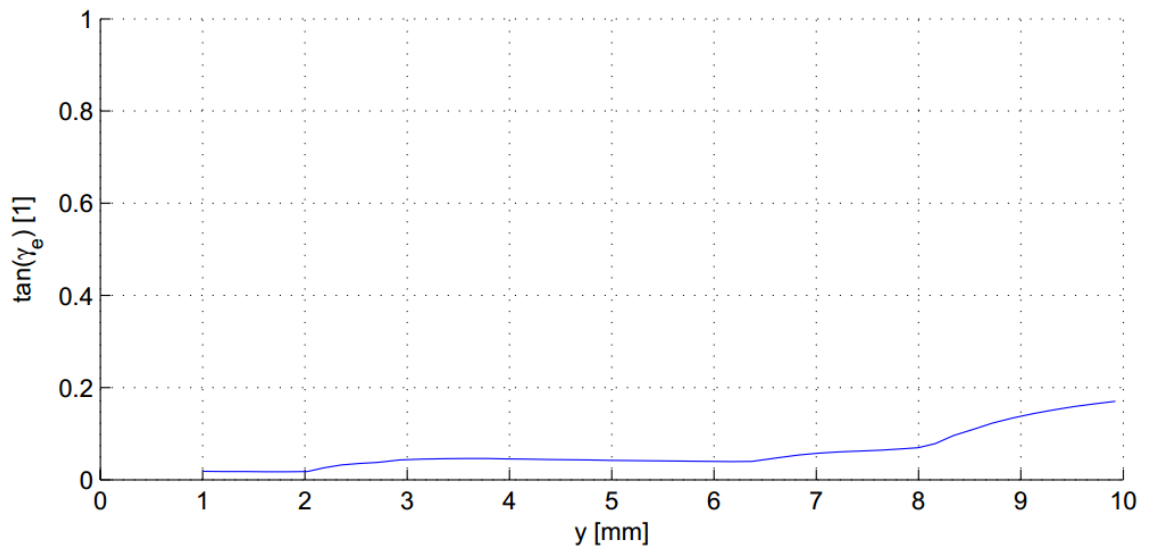
Као што је већ објашњено, испитивани вагон за превоз руде гвожђа користи посебно оптимизоване профиле точкова ознаке UNO-WP 4 MB, са пречником од 915 мм. Пре експерименталног испитивања профиле свих точкова су измерени помоћу СПАК мерног уређаја, при чему су измерени профиле точка и шине приказана на слици 6-3. На основу добијених података о профилу точкова и профилу шине израчунате су одговарајуће карактеристичне величине (разлика радијуса котрљања, положаји додирних тачака, и др), као што је приказано на сликама од 6-4 до 6-7.



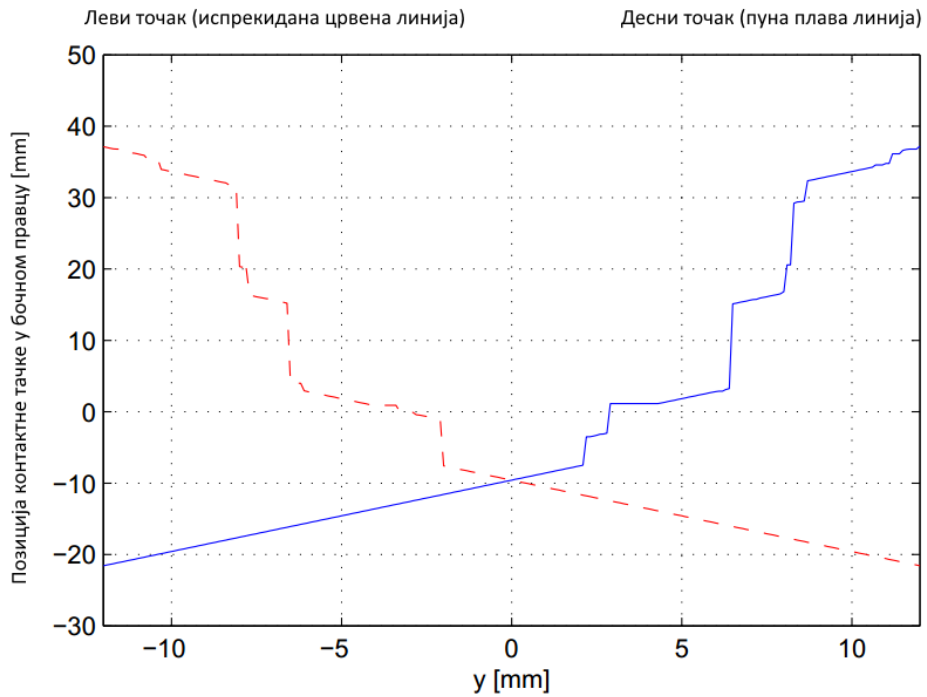
Слика 6-2. Снимљен профил точка UNO-WP 4 MB



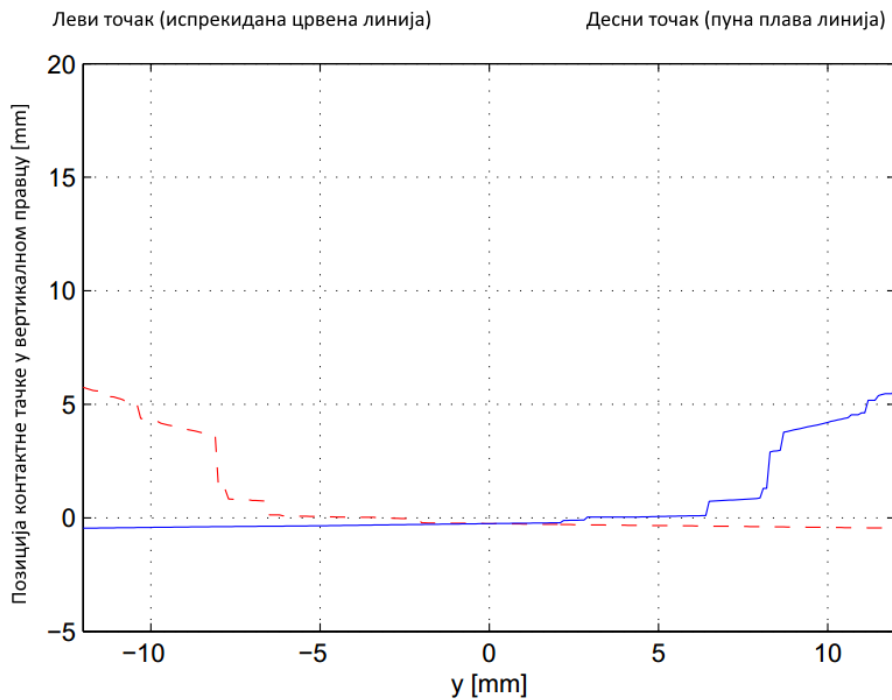
Слика 6-3. Разлика пречника котрљања UNO-WP 4 MB



Слика 6-4. Угао контакта точка UNO-WP 4 MB и шине BV50



Слика 6-5. Позиција контактне тачке између точка и шине у бочном правцу за комбинацију профила точка UNO-WP 4 MB и профила шине BV50 I30



Слика 6-6. Позиција контактне тачке између точка и шине у вертикалном правцу за комбинацију профила точка UNO-WP 4 MB и профила шине BV50 I30

6.3 ТРАСА КОЛОСЕКА НА КОЈОЈ ЈЕ ИЗВРШЕНО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ

Експериментално испитивање извршено је на колосецима које се налазе на северу Шведске и Норвешке, у току летњег периода. Основни подаци о свакој појединачном тесту при експерименталном испитивању дате су у табели 6-2, при чему су ознаке полазних и крајњих станица дате у табели 6-1.

Табела 6-1. Ознаке полазних и долазних станица

| SKRACENICA | KMB | RGN | XNK | HRT | BDN | LE | GV | PC |
|-------------|--------|-------------|--------|----------|-------|-------|-----------|------------|
| GRAD | Kiruna | Riksgränsen | Narvik | Harträsk | Boden | Luleå | Gällivare | Polcirkeln |

Табела 6-2. Основни подаци о тест вожњама при експерименталном испитивању

| ТЕСТ БР | ПОЛАЗНА СТАНИЦА | КРАЈЊА СТАНИЦА | ВРЕМЕНСКИ УСЛОВИ | ТЕМПЕРАТУРА | ПАДАВИНЕ | ОСОВИНСКИ ПРИТИСАК |
|---------|-----------------|----------------|------------------|-------------|----------|--------------------|
| 1 | Kmb | Rgn | сунчано | 5 | не | 5.4 |
| 2 | Rgn | xNk | сунчано | 7 | не | 5.4 |
| 3 | xNk | Rgn | облачно | 9 | не | 5.4 |
| 4 | Rgn | Kmb | облачно | 8 | не | 5.4 |
| 6 | Kmb | Hrt | сунчано | 6 | не | 5.4 |
| 8 | Hrt | Bdn | сунчано | 9 | не | 5.4 |
| 9 | Bdn | Le | сунчано | 12 | не | 5.4 |
| 10 | Le | Bdn | облачно | 9 | не | 31 |
| 11 | Bdn | Gv | облачно | 9 | не | 31 |
| 13 | Gv | Kmb | сунчано | 12 | не | 31 |
| 15 | Kmb | Rgn | облачно | 6 | не | 31 |
| 16 | Rgn | xNk | магловито | 6 | не | 31 |
| 17 | xNk | Rgn | магловито | 8 | не | 31 |
| 18 | Rgn | Kmb | магловито | 7 | не | 31 |
| 20 | Kmb | Pc | облачно | 3 | да | 31 |
| 22 | Pc | Bdn | облачно | 6 | не | 31 |
| 23 | Bdn | Le | облачно | 6 | не | 31 |
| 24 | Le | Bdn | облачно | 8 | не | 31 |
| 25 | Bdn | Gv | сунчано | 8 | не | 31 |
| 27 | Gv | Kmb | сунчано | 8 | не | 31 |

Извод из резултата експерименталног испитивања, о брађених према UIC [30], прописима дати су у прилогу Ц.

Колосек на коме је извршено експериментално испитивање је класификован према табели 6-3.

Табела 6-3. Класификација колосека са аспекта полупречника кривине

| Правац | $R = \infty$ |
|------------------------------|------------------|
| Кривине малог полупречника | 250 m < R < 400m |
| Кривине средњег полупречника | 400 m < R ≤ 600m |
| Кривине великог полупречника | R > 600m |

Класификација према квалитету $QN1$, $QN2$, $QN3$, неправилности као и геометријске карактеристике колосека на коме је извршено експериментално испитивање железничког возила дата је у прилогу.

6.4 РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

На основу спроведених експерименталних испитивања, добијени резултати, сагласно препорукама UIC 518, су дати у табели 6-4.

Табела 6-4. Резултати експерименталног испитивања

| Параметар | Осовинск и притисак | Ограничење | Правац | Кривина | | | |
|--------------------------|------------------------------|------------|--------|---------|-----------|-----------|------|
| | | | | R>600 | 400<R<600 | 250<R<400 | |
| Безбедност | $\Sigma Y [kN]$ | 5,4 тоне | 23,5 | 11 | 17 | 19 | 21 |
| | | 31 тона | 94,7 | 38 | 53 | 53 | 58 |
| | Y / Q | 5,4 тоне | 0,8 | - | 0,52 | 0,72 | 0,68 |
| | | 31 тона | 0,8 | - | 0,33 | 0,42 | 0,64 |
| | $s\Sigma Y$ | 5,4 тоне | - | - | - | - | - |
| | | 31 тона | - | - | - | - | - |
| \ddot{y}_s^+ | 5,4 тоне | 11 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 3,3 | |
| | 31 тона | 11 | 2,3 | 1,6 | 1,6 | 2,1 | |
| Сигурност | $Q [kN]$ | 5,4 тоне | 114,5 | 34 | 36 | 37 | 38 |
| | | 31 тона | 210 | 182 | 186 | 189 | 194 |
| | $Q_{qst} [kN]$ | 5,4 тоне | 145 | - | - | 27 | 29 |
| | | 31 тона | 155 | - | - | 151 | 157 |
| | $Y_{qst} [kN]$ | 5,4 тоне | 60 | - | - | 3,7 | 8,2 |
| | | 31 тона | 60 | - | - | 12 | 32 |
| Динамичке карактеристике | $\ddot{y}_q^* [m/s^2]$ | 5,4 тоне | 3 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,2 |
| | | 31 тона | 3 | 0,95 | 0,63 | 0,69 | 0,74 |
| | $\ddot{z}_q^* [m/s^2]$ | 5,4 тоне | 5 | 2,0 | 1,8 | 1,5 | 1,5 |
| | | 31 тона | 5 | 2,0 | 1,7 | 1,6 | 1,3 |
| | $\ddot{y}_{q,RMS}^* [m/s^2]$ | 5,4 тоне | 1,3 | 0,24 | 0,33 | 0,32 | 0,38 |
| | | 31 тона | 1,3 | 0,20 | 0,19 | 0,23 | 0,27 |
| | $\ddot{z}_{q,RMS}^* [m/s^2]$ | 5,4 тоне | 2 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,41 |
| | | 31 тона | 2 | 0,52 | 0,40 | 0,50 | 0,37 |
| | $\ddot{y}_{qst}^* [m/s^2]$ | 5,4 тоне | 1,3 | - | 0,18 | 0,35 | 0,62 |
| | | 31 тона | 1,3 | - | 0,14 | 0,21 | 0,27 |

Граничне вредности величина приказаних у табели 6-4, за случај када гранична вредност није могла да се одреди на основу осовинског оптерећења (5,4 t за празан односно 31 t за натоварен вагон), узете су вредности за осовинско оптерећење од 25t, јер то представља строжији критеријум.

7 ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ВАЛИДАЦИОНЕ МЕТРИКЕ

Валидација модела железничког возила представља комплексан и обиман задатак, који треба да обухвати велики број случајева кретања возила на колосеку, уз обраду великог броја података. У овом поглављу је приказана имплементација предложене валидационе метрике примењене за случајеве:

- Празан вагон на правцу,
- Празан вагон при кретању у кривини,
- Натоварени вагон на правцу,
- Натоварен вагон при кретању у кривини.

Избор деоница за валидацију модела је првенствено условљен расположим подацима, као и квалитетом и карактеристикама колосека по коме је се возило кретало током експерименталног испитивања.

7.1 ИЗБОР ДЕОНИЦА ЗА ВАЛИДАЦИЈУ

С обзиром да се валидациона метрика заснива на статистичкој оцени поређења резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањима, није потребно да дужина деонице изабране за валидацију модела буде сагласна са препорукама важећих прописа за издавање дозволе за кретање возила. Штавише, уколико се за валидацију модела усвоје дужине деоница веће од препоручених, веродостојност процене слагања експерименталних и нумеричких резултата биће боља. Свакако, није могуће извршити веродостојну процену на кратким деоницама, па је стога при валидацији модела усвојено да су минималне дужине деоница за валидацију модела једнаке дужинама деоница које су дате у важећим прописима датим у UIC 518 [30].

Други важан аспект приликом валидације модела је обрада и филтрирање података у складу са важећим препорукама и прописима. Да би се у највећој мери избегле грешке које могу да настану приликом филтрирања и обраде података, исти софтверски пакети су коришћени приликом формирања дијаграма у просторно-временском домену и при формирању дијаграма кумулативних функција. За обраду и филтрирање података написани су одговарајући модули у софтверском пакету Gensys, тако да су нумеричке грешке направљене приликом обраде података добијених и експериментом и симулацијом.

Примена валидационе метрике за валидацију модела железничког возила приказана је за случајеве:

- Натовареног возила
 - Кретање у кривини
 - Кретање на правцу
- Празног возила
 - Кретање у кривини
 - Кретање на правцу

Параметри који се пореде приликом валидације модела су:

- Убрзање на сандуку вагона изнад водећег обртног постоља
 - У бочном правцу
 - У вертикалном правцу
- Силе на точковима у контакту точак шина на водећој осовини водећег обртног постоља
 - У бочном правцу
 - У вертикалном правцу

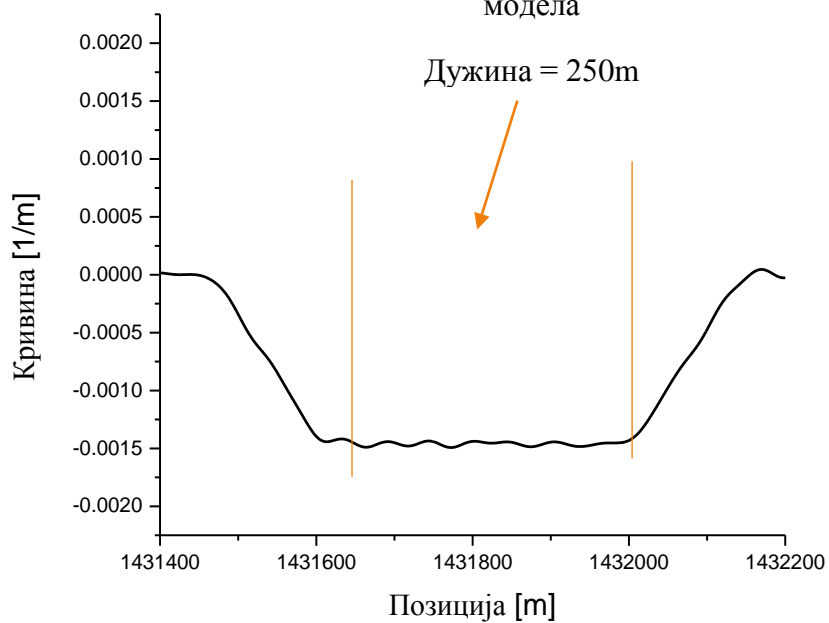
Резултати поређења изабраних параметара предложеном валидационом метриком су приказани упоредо са резултатима валидационе метрике коју је предложио Polach [65].

7.2 НАТОВАРЕН ВАГОН У КРИВИНИ

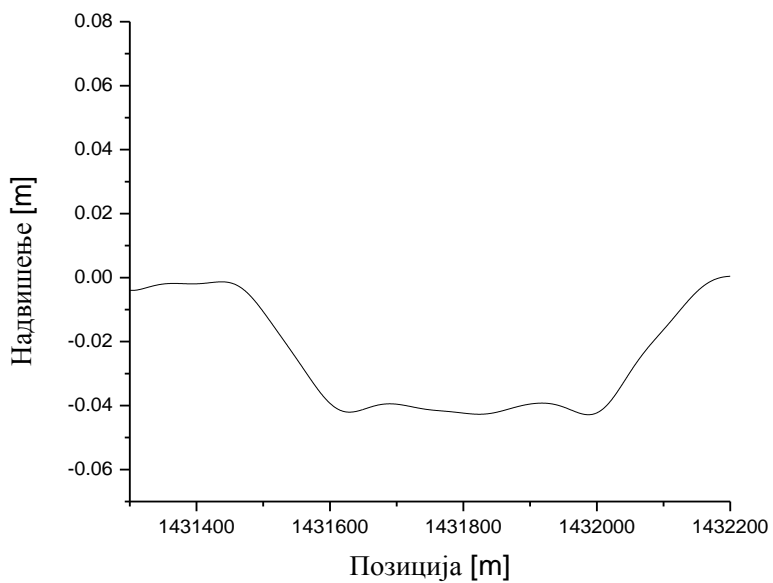
За валидацију модела натовареног возила које се креће у кривини одабрана је деоница пруге чији су стварни полупречник кривине и надвишење колосека дати на сликама 7-1 и 7-2, респективно.

При нумеричкој симулацији динамичког понашања возила, поред стварних профила точкова и шина, реалних неправилности на колосеку, и геометрије колосека, као улазни податак је узет и стварни профил брзине на посматраној деоници колосека, који је приказан на слици 7-3.

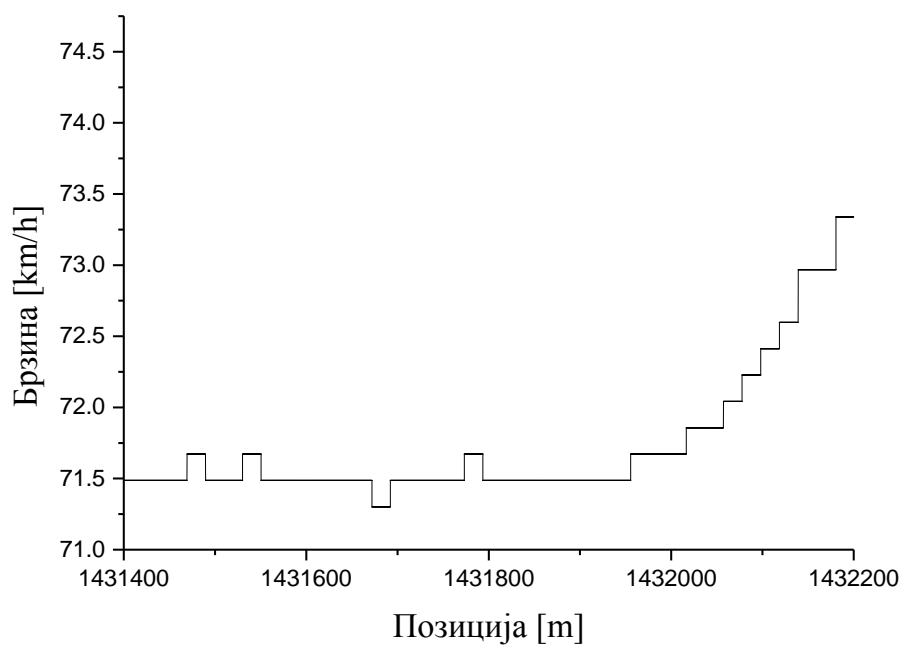
Изабрана секција за валидацију
модела



Слика 7-1. Полупречник кривине за изабрану деоницу



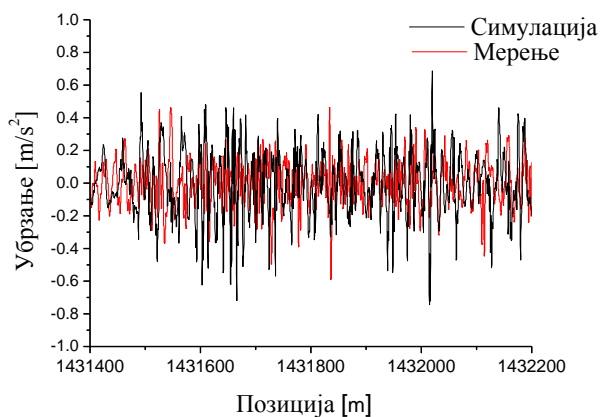
Слика 7-2. Надвишење колосека за изабрану деоницу



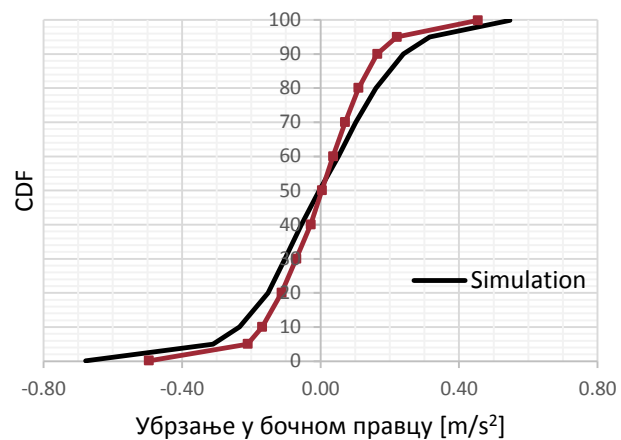
Слика 7-3. Профил брзине при кретању возила кроз кривину

Увођење стварне брзине возила при експерименталном испитивању на одабраној деоници као улазног параметра за симулацију динамичког понашања возила омогућава да резултати добијени симулацијом буду врло блиски резултатима добијеним експериментом.

а)



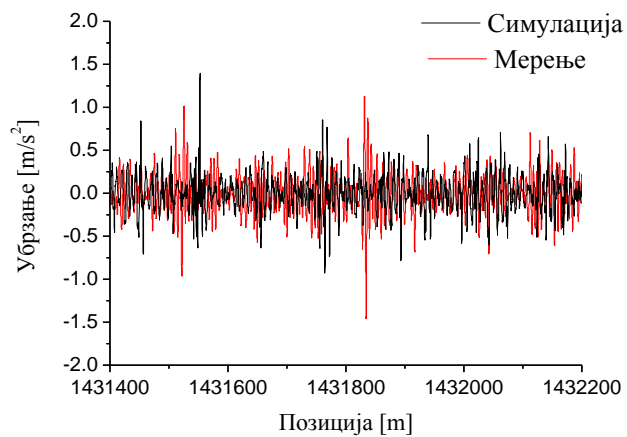
б)



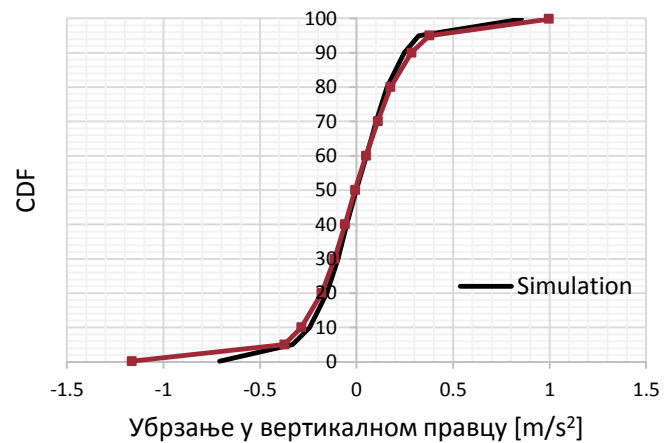
Слика 7-4. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља,

а) Приказ сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену, б) Кумулативне функције убрзања

а)



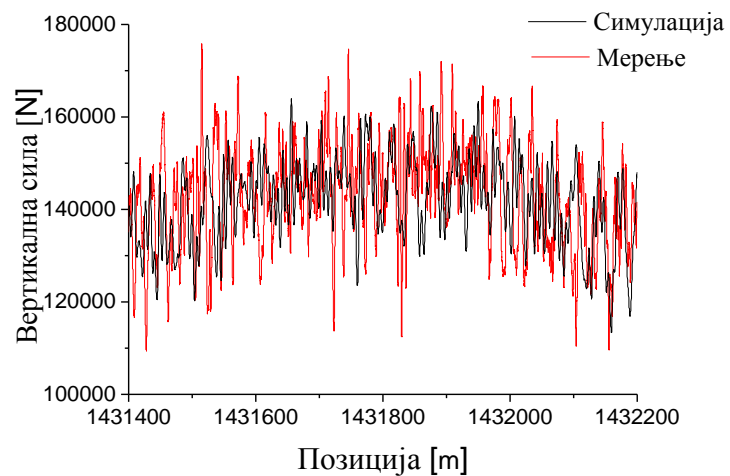
б)



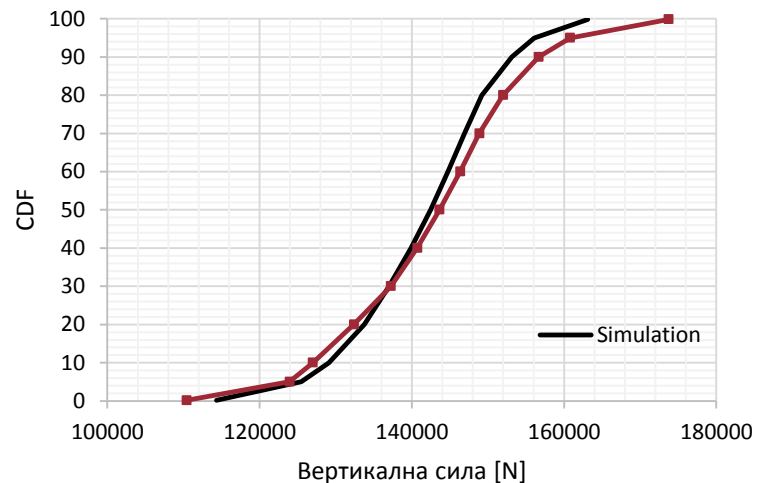
Слика 7-5. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља,

а) Приказ сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену, б) Кумулативне функције

а)

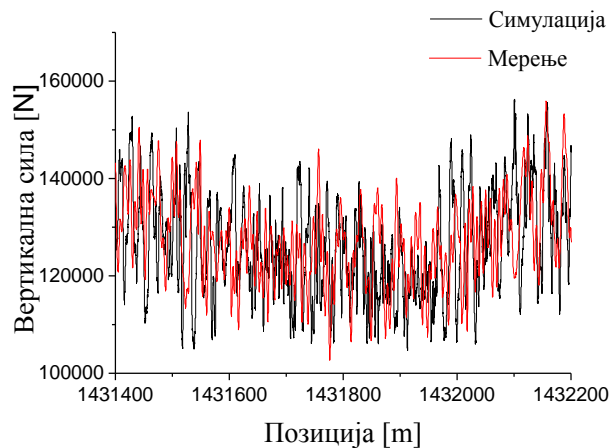


б)

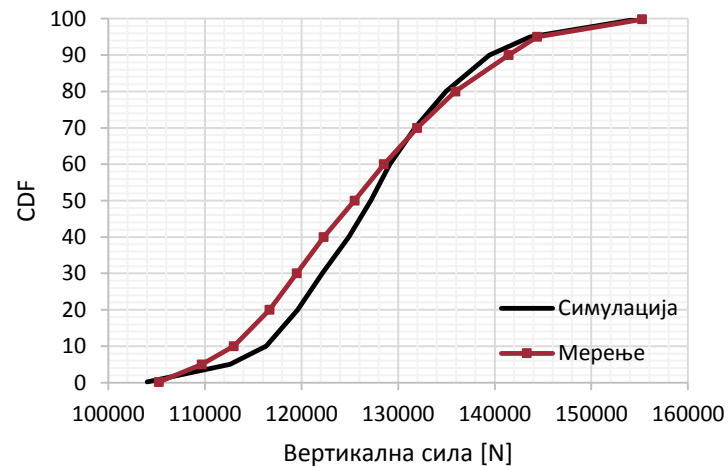


Слика 7-6. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

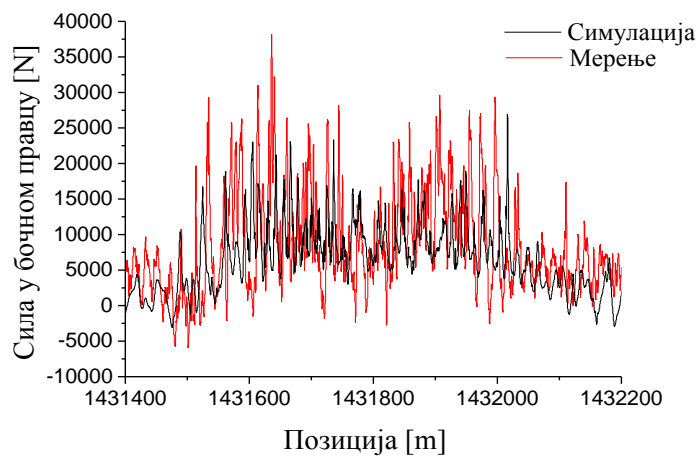


б)

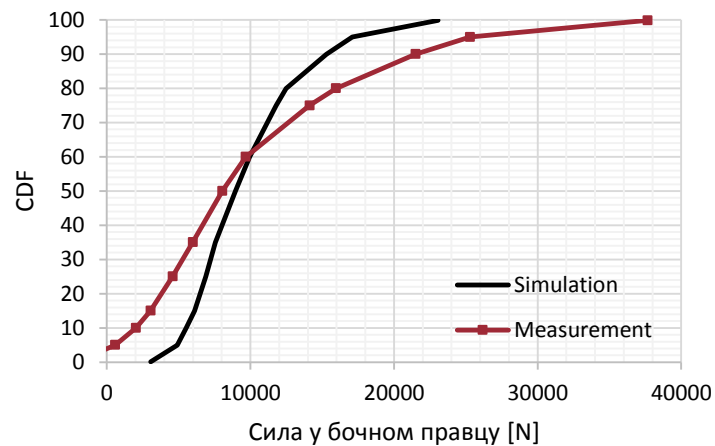


Слика 7-7. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

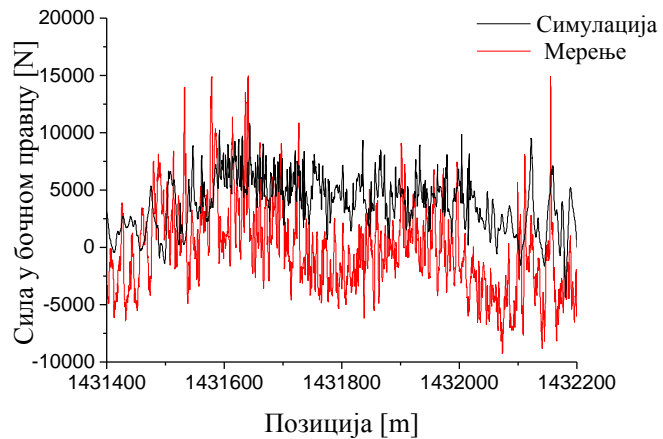


б)

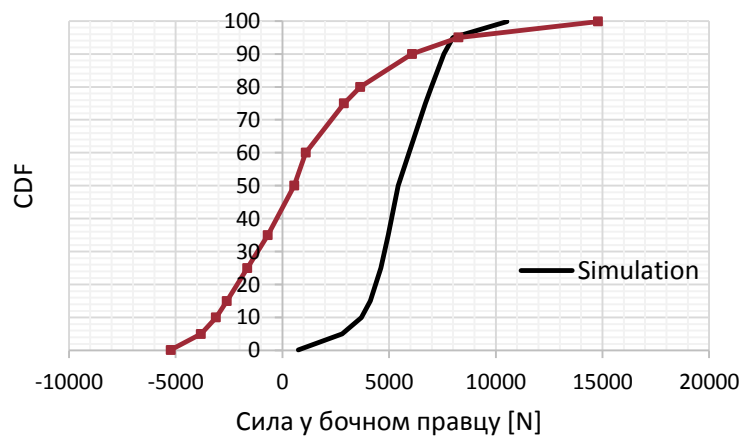


Слика 7-8. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)



б)



Слика 7-9. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

Табела 7-1. Резултати валидације модела железничког возила за случај када се натоварено возило креће у кривини

| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | RMS | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
|--|-----|-----------|----------|-----------------|------------|-----------------|----------------|--------------|
| Убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља | | | | | | | | |
| \ddot{y} [m/s ²] | Сим | -1.49E-03 | 1.91E-01 | -0.678 | 0.0034 | 0.54737 | RMS -OK | 0.309 |
| | Екс | -1.13E-04 | 1.36E-01 | -0.496E | 0.00405 | 0.45427 | MAX-OK | |
| \ddot{z} [m/s ²] | Сим | 0.00186 | 0.20681 | -0.7096 | 5.86E-04 | 0.85379 | RMS OK | 0.283 |
| | Екс | -0.00223 | 0.23929 | -1.16451 | 0.0076 | 0.99641 | MIN- HE | |
| Силе на точковима на водећој осовини | | | | | | | | |
| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | Median MED | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
| Q_{in} [N] | Сим | 127404.7 | 9108.3 | 104041.2 | 127174.7 | 154592.1 | MED - OK | 0.792 |
| | Екс | 126266.6 | 10601.3 | 105243.7 | 125494.3 | 155267.4 | MAX- OK | |
| Q_{out} [N] | Сим | 141615.9 | 9181 | 114318.2 | 142466.5 | 163084.5 | MED - OK | 0.431 |
| | Екс | 142722.8 | 11266.3 | 110411.5 | 143618.8 | 173711.3 | MAX- HE | |
| Y_{out} [N] | Сим | 9736.95 | 3928.52 | 3049.811 | 8964.09 | 23057.46 | MED- OK | 0.0195 |
| | Екс | 9917.76 | 7487.83 | -2171.877 | 8039.31 | 37645.62 | MAX- HE | |
| Y_{in} [N] | Сим | 5583.74 | 1576.11 | 749.7061 | 5420.24 | 10529.28 | MED - OK | 0.0009 |
| | Екс | 1008.72 | 3636.01 | -5235.708 | 557.09 | 14783.71 | MAX- OK | |

Као што се може видети на сликама од 7-3 до 7-8 под а), сви посматрани сигнали имају велики број промена у релативно кратком временском периоду, и као такви представљају слабу основу за процену слагања резултата добијених симулацијом (приказаних црном линијом) и резултата добијених експериментом (приказаних црвеном линијом).

Резултати валидације модела железничког возила за случај натовареног возила које се креће у кривини дати су у Табели 7-1. Поред основних статистичких података којима се описују случајни сигнали, за сваки од посматраних параметара су приказане и оцене валидације модела према валидационој метрици коју је дефинисао Polach, као и према новопредложеној метрици.

Из табеле 7-1, као и према дијаграму кумулативних функција 7-3 б) за убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља, може се видети да постоји добро слагање између резултата добијених симулацијом и експериментом. За убрзања сандука вагона у вертикалном правцу постоји значајна разлика међу минималним вредностима, што је исказано кроз неиспуњавање услова за валидацију према обе примењене метрике.

Према метрици предложеној у овом раду, вертикалне силе на спољашњем точку, приказано на слици 7-5, и на унутрашњем точку, приказано на слици 7-6, имају добро слагање према новопредложеној метрици, док према метрици коју је предложио Polach постоји значајна разлика између резултата експеримента и симулације код максималних вредности вертикалних сила на спољашњем точку водеће осовине водећег обртног постоља. Ова разлика се огледа у значајној разлици у средњим вредностима за силе у бочном правцу на унутрашњем точку, слика 7-9 б, и разлици у

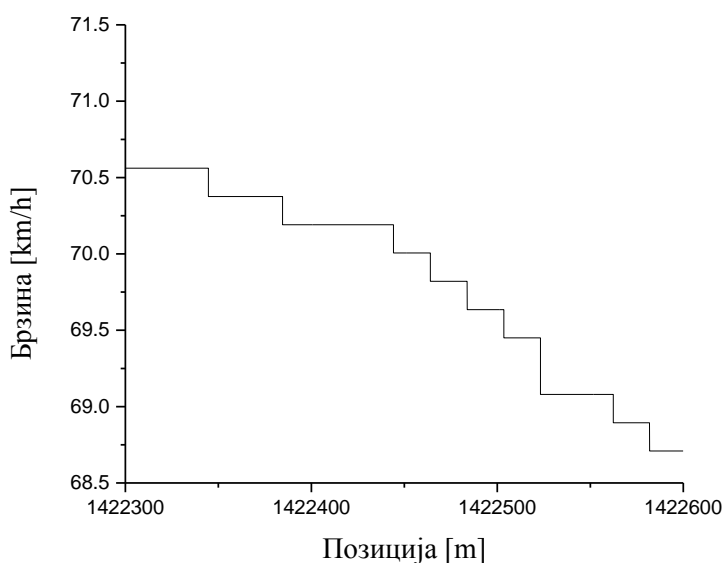
екстремним вредностима бочне силе на спољашњем точку, што је приказано на слици 7-8 б.

Из табеле 7-1 може се видети да силе у бочном правцу на оба точка не испуњавају услове за валидацију модела према новопредложеној метрици, док бочна сила на унутрашњем точку задовољава услове валидације према метрици коју је предложио О. Polach.

Из свега наведеног произилази да новопредложена метрика поставља знатно строжије услове за валидацију него што је то предложио у својим истраживањима Polach.

7.3 НАТОВАРЕН ВАГОН НА ПРАВЦУ

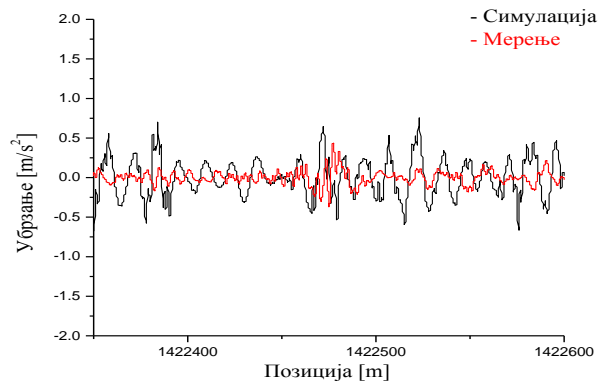
Приликом симулације кретања натовареног вагона на правцу као улазни податак је усвојен профил брзине којом је се кретао вагон током експерименталног испитивања, који је дат на слици 7-10. Укупна дужине деонице над којом се врши валидација модела ја 150 m.



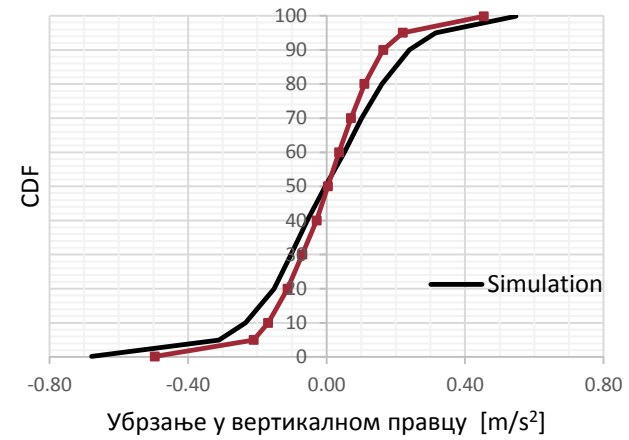
Слика 7-10. Профил брзине приликом кретања вагона на правцу

Графички приказ одабраних параметара за валидацију модела у просторном домену, и одговарајуће кумулативне функције, дате су на сликама од 7-11 до 7-16. Резултати валидације модела према методологији коју је предложио О. Polach и према новопредложеној метрици дати су у табели 7-2.

а)

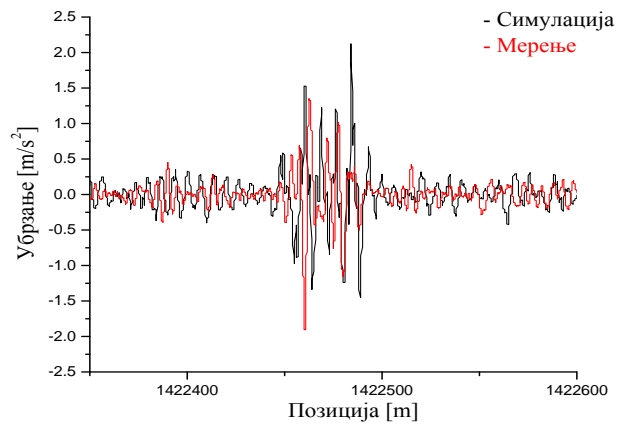


б)

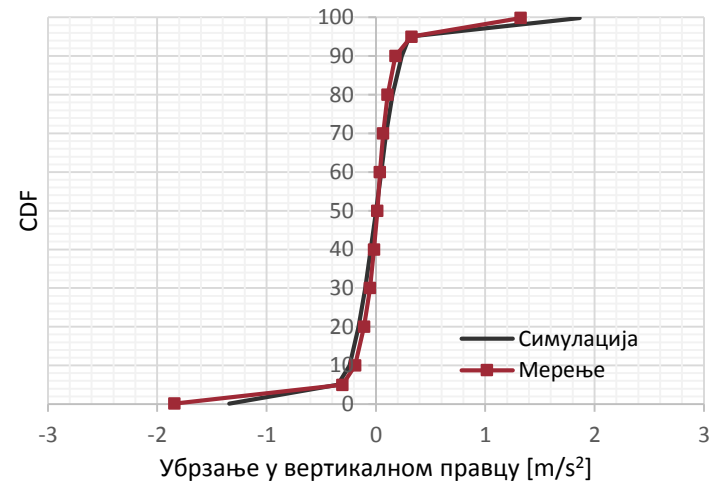


Слика 7-11. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља,
 а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

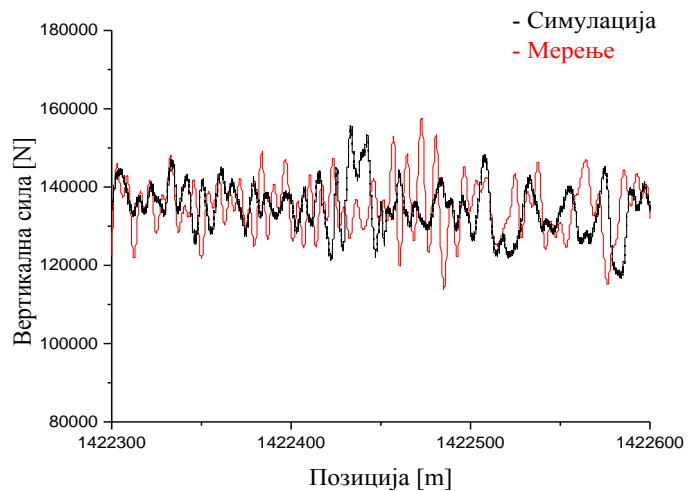


б)

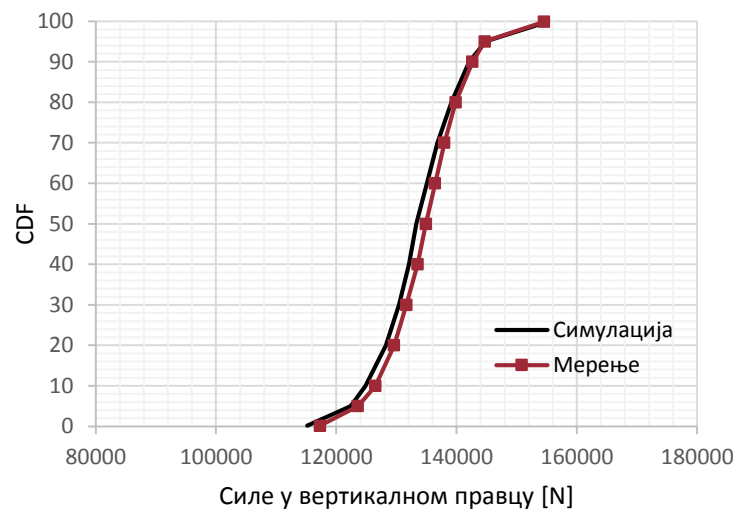


Слика 7-12. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља,
 а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

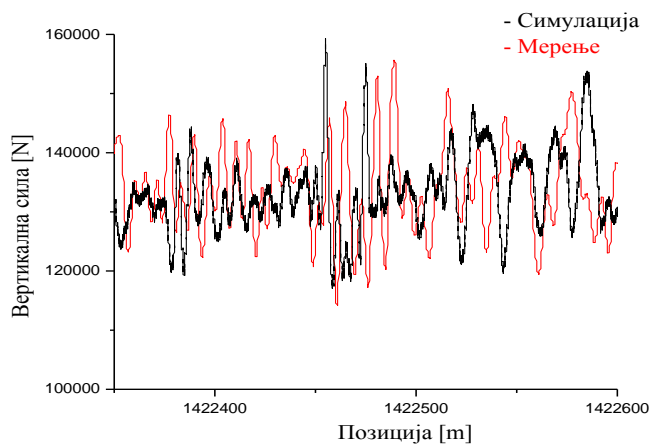


б)

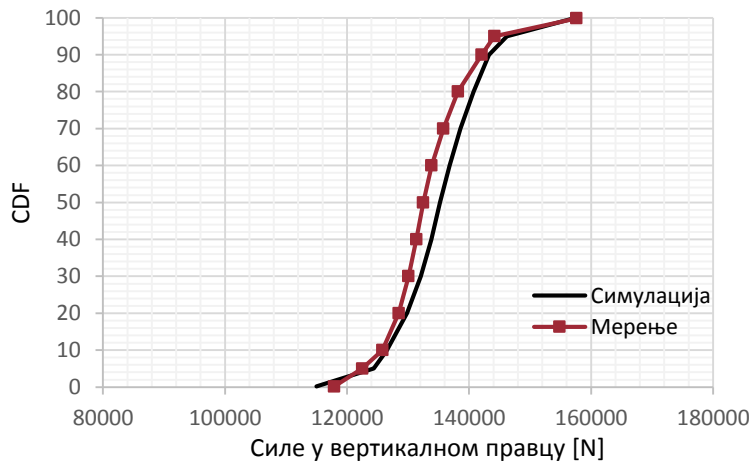


Слика 7-13. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

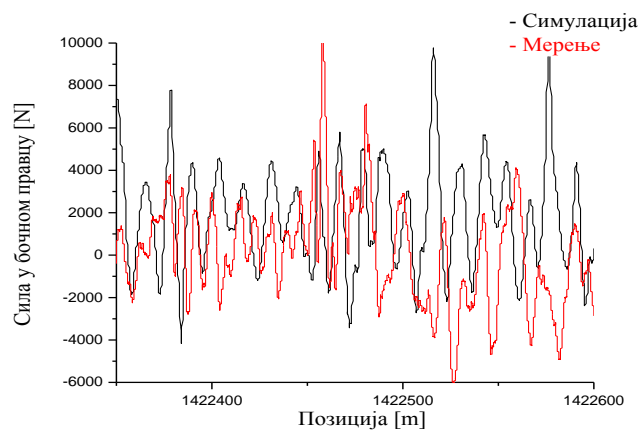


б)

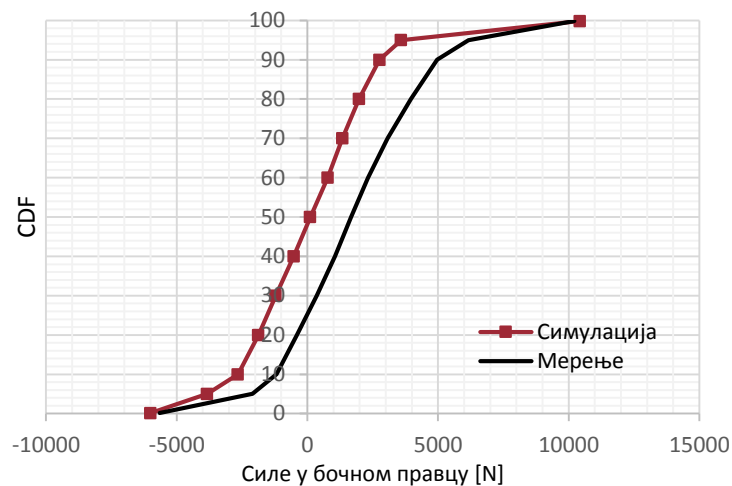


Слика 7-14. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

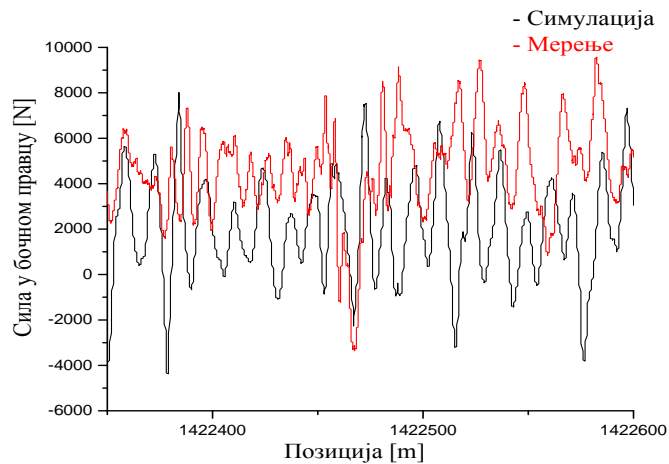


б)

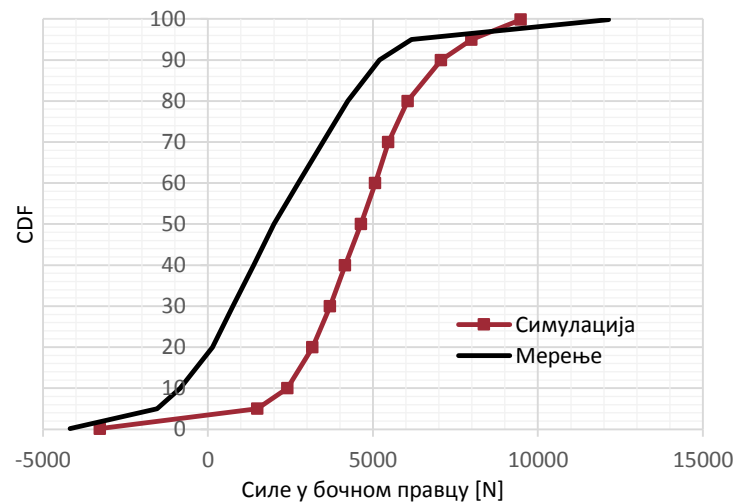


Слика 7-15. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)



б)



Слика 7-16. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

Табела 7-2. Резултати валидације модела железничког возила за случај натовареног возила које се креће на правцу

| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | RMS | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
|--|-----|-----------|----------|-----------------|------------|----------------|--------------------|--------------|
| Убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља | | | | | | | | |
| \ddot{y} [m/s ²] | Сим | 0.00199 | 0.22669 | -0.5899 | 0.226575 | 0.75204 | RMS - OK | 0.216 |
| | Екс | 0.00173 | 0.0986 | -0.36128 | 0.098596 | 0.43431 | MAX - OK | |
| \ddot{z} [m/s ²] | Сим | -6.26E-04 | 0.1343 | -0.64071 | 0.3837 | 0.74518 | RMS - OK | 0.283 |
| | Екс | -4.13E-04 | 0.18363 | -1.2606 | 0.3496 | 1.3315 | MAX, MIN-HE | |
| Силе на точковима на водећој осовини | | | | | | | | |
| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | Median MED | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
| Q_l [N] | Сим | 132612.1 | 5872.548 | 117610.5 | 13231.8 | 158299.3 | MED - OK | 0.59 |
| | Екс | 134641.1 | 7697.742 | 114116 | 133989.6 | 157478.7 | MAX - OK | |
| Q_r [N] | Сим | 135402.7 | 5967.97 | 121632.1 | 134918.1 | 155125.6 | MED - OK | 0.399 |
| | Екс | 134279.9 | 7746.38 | 114251.1 | 134673.5 | 155541.3 | MAX - OK | |
| Y_l [N] | Сим | 4340.0 | 2177.734 | -3299.91 | 4591.279 | 9092.558 | MED - OK | 0.36 |
| | Екс | 1999.2 | 2045.337 | -3173.66 | 1861.193 | 7529.668 | MAX - OK | |
| Y_r [N] | Сим | 681.807 | 2334.626 | -3876.51 | 559.145 | 10611.17 | MED - OK | 0.272 |
| | Екс | 1848.111 | 2266.803 | 3352.03 | 1805.36 | 9742.147 | MAX - OK | |

Као што се може видети из табеле 7-2, код резултата мерења и симулације убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља постоји разлика већа од 0,4 m/s² за максималне и минималне вредности (за вредности 0,15% и 99,85% из кумулативних функција), која не задовољава услове валидације према методологији коју је предложио Polach. Убрзања сандука вагона у вертикалном правцу не задовољавају услове за валидацију ни према новопредложеној метрици јер је вредност валидационе оцене мања од 0,3.

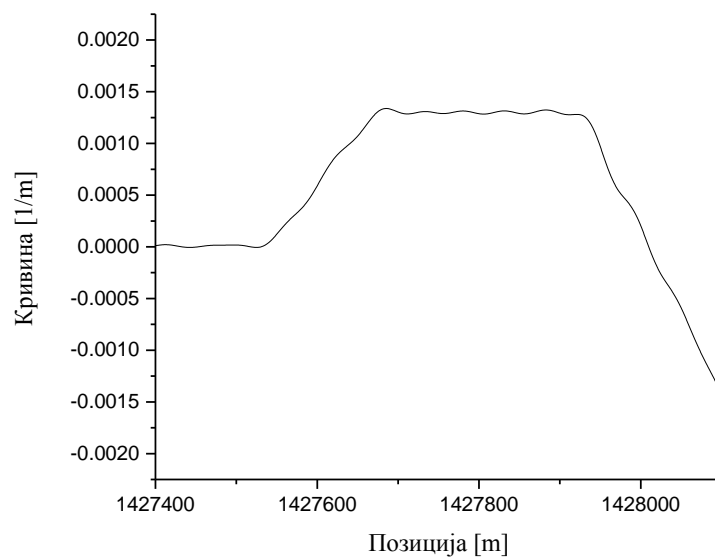
Остали параметри за валидацију у случају кретања натовареног возила на правцу, задовољавају услове валидације према валидационој метрици коју је предложио Polach. Из табеле 7-2 се може видети да валидациона метрика дефинисана у овом раду доводи до оцене да постоји значајна разлика између резултата добијеним симулацијом и експериментом између вертикалне силе на десном точку на водећој осовини водећег обртног постоља.

Вредности валидационих оцена за убрзања у вертикалном правцу, у бочном правцу и за силу у бочном правцу на десном точку су релативно блиске али и даљи испод предложене граничне вредности за валидацију модела. За предложену граничну вредност валидационе оцене новопредложена метрика поставља знатно строже захтеве за валидацију модела него што је то дефинисао Polach у својим истраживањима.

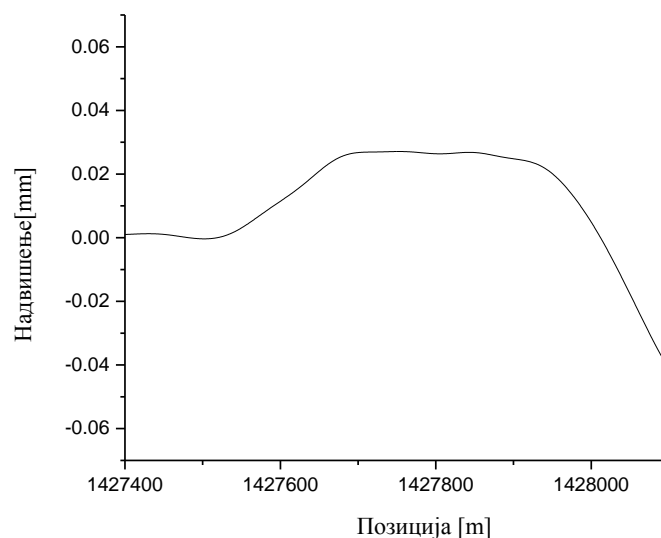
7.4 ПРАЗАН ВАГОН У КРИВИНИ

За валидацију модела натовареног возила које се креће у кривини одабрана је деоница пруге, дужине 200 m, чији су стварни полупречник кривине и надвишење колосека дати на сликама 7-17 и 7-18, респективно.

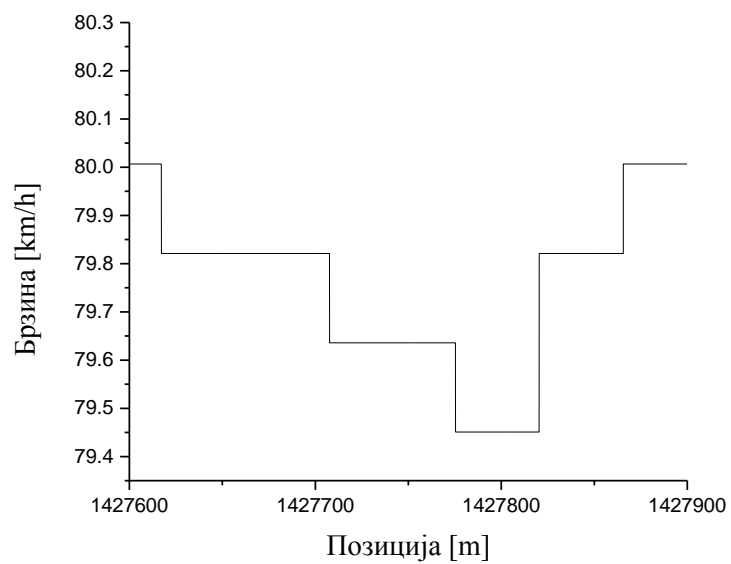
При нумеричкој симулацији динамичког понашања возила, поред стварних профила точкова и шина, реалних неправилности на колосеку, и геометрије колосека, као улазни податак је узет и стварни профил брзине на деоници посматраној колосека, дат на слици 7-19.



Слика 7-17. Полупречник кривине за изабрану деоницу

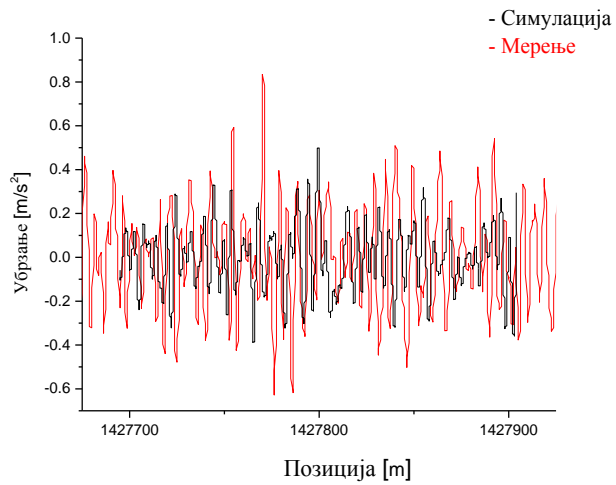


Слика 7-18. Надвишење колосека за изабрану деоницу

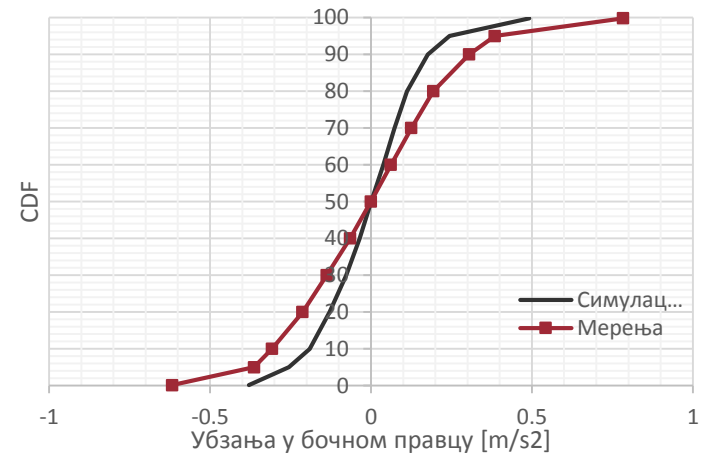


Слика 7-19. Профил брзине при кретању возила кроз кривину

а)



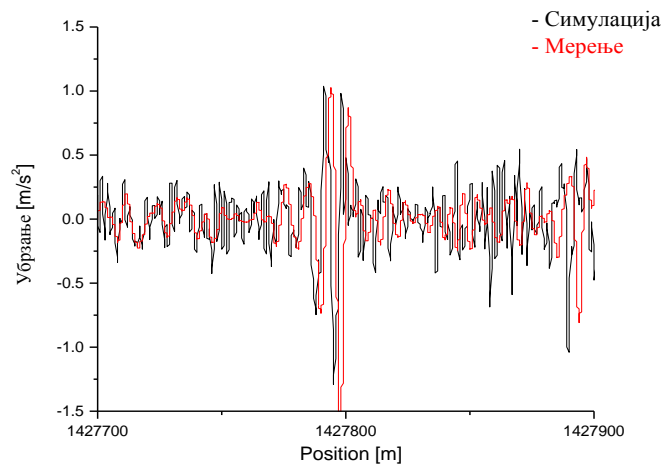
б)



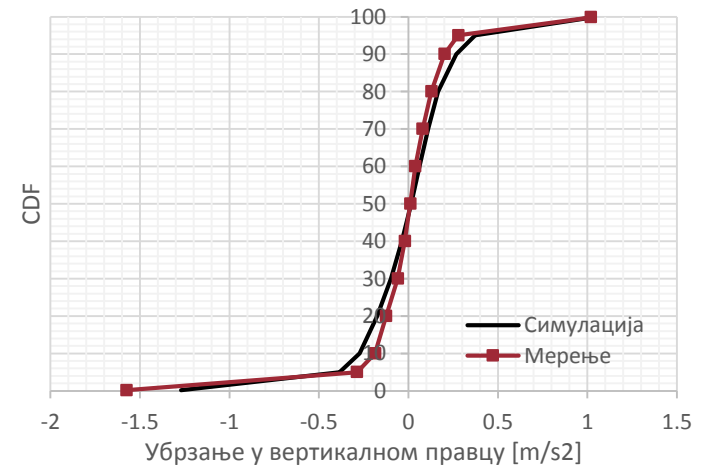
Слика 7-20. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља,

а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)



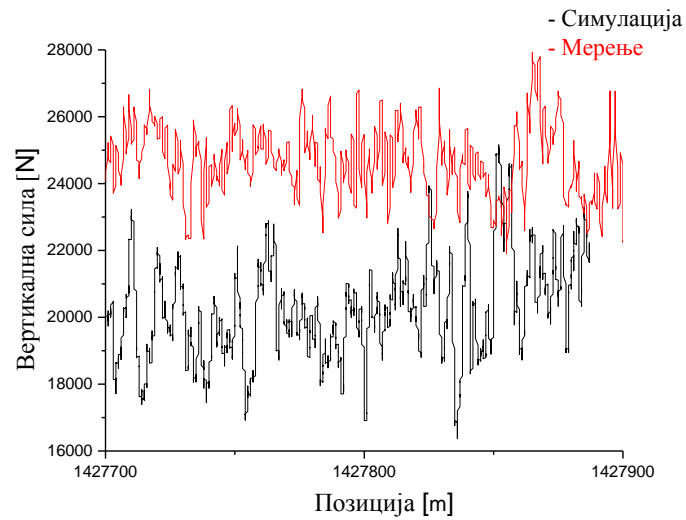
б)



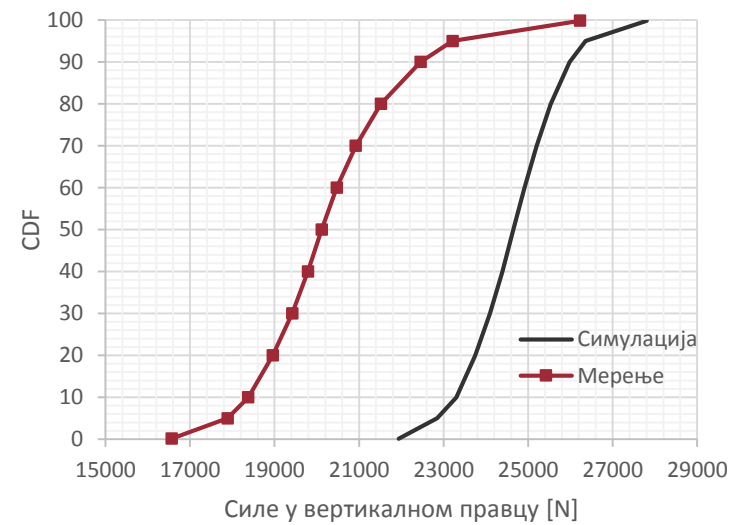
Слика 7-21. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља,

а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

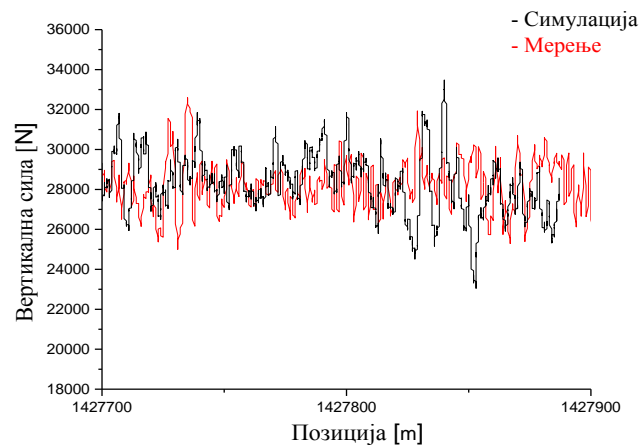


б)

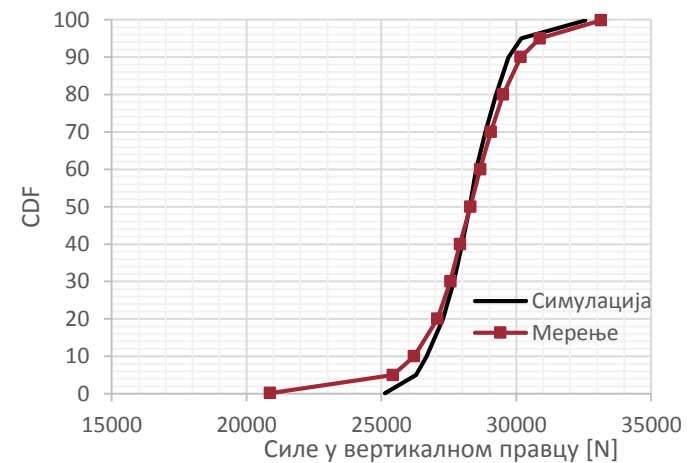


Слика 7-22. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

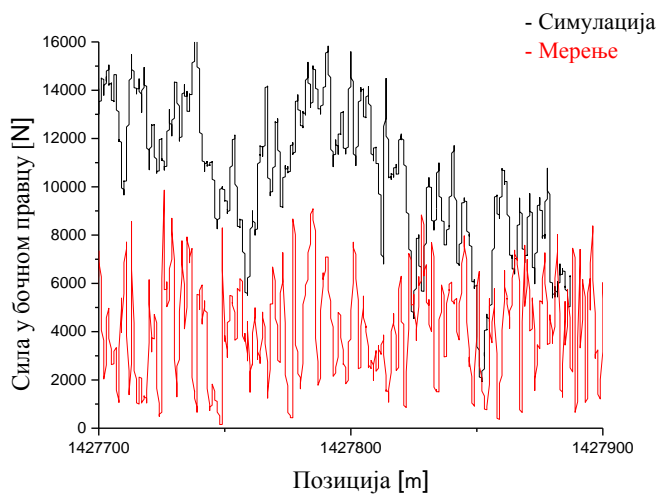


б)

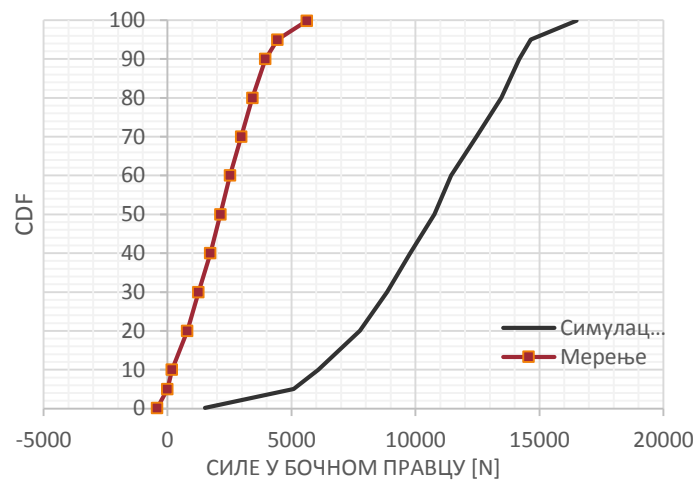


Слика 7-23. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

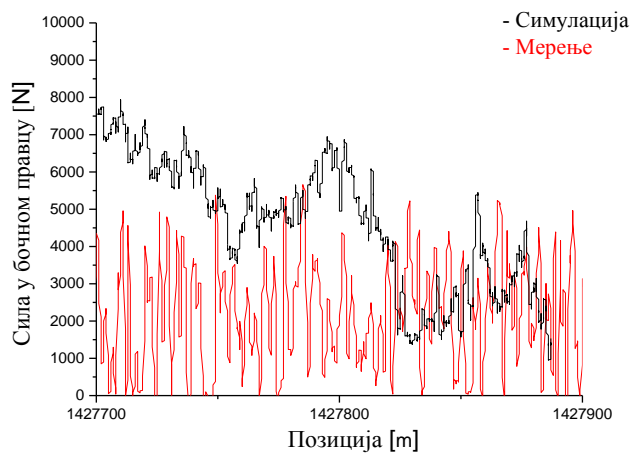


б)

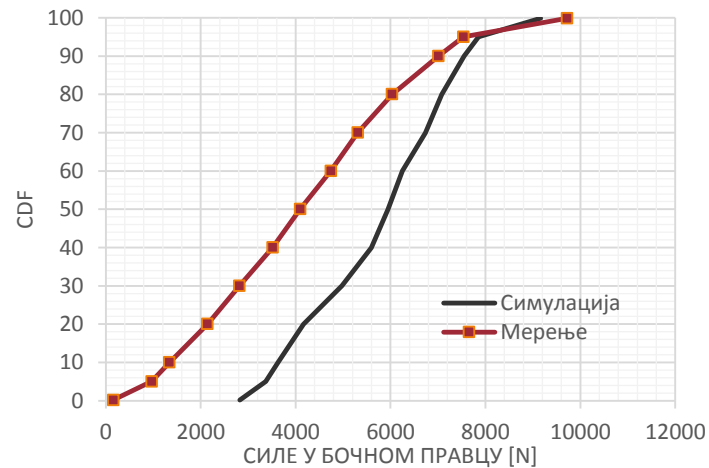


Слика 7-24. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)



б)



Слика 7-25. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

Табела 7-3. Резултати валидације модела железничког возила за случај празног возила које се креће у кривини

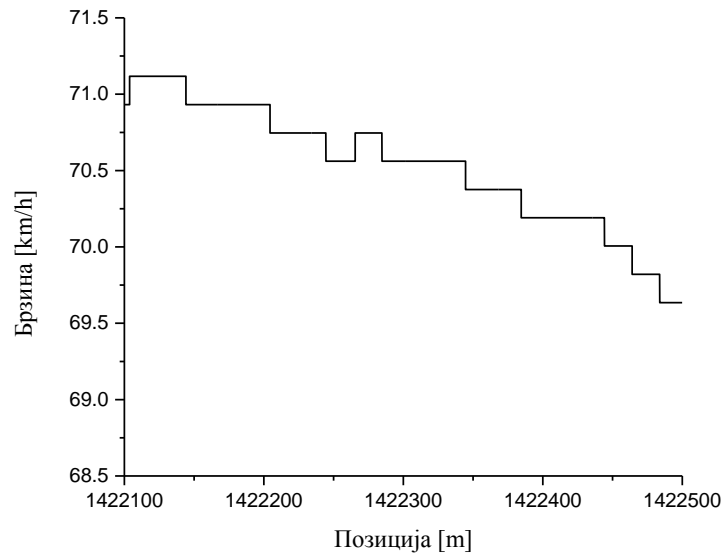
| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | RMS | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
|---|-----|-----------|----------|-----------|------------|------------|----------|--------------|
| Убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља | | | | | | | | |
| y'' [m/s ²] | Сим | -3.84E-04 | 0.27108 | -0.71413 | 0.01344 | 0.76819 | RMS - OK | 0.012 |
| | Екс | 9.80E-04 | 0.08785 | -0.34402 | 0.00324 | 0.42598 | MAX - OK | |
| z'' [m/s ²] | Сим | -2.09E-03 | 0.29773 | -1.3403 | 0.00237 | 1.86323 | RMS - OK | 0.78 |
| | Екс | 1.36E-03 | 0.26177 | -1.59526 | 1.26E-02 | 1.5003 | MAX - OK | |
| Силе на точковима на водећој осовини | | | | | | | | |
| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | Median MED | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
| Q_{out} [N] | Сим | 135225.83 | 6613.555 | 114990.1 | 135239.6 | 157105.7 | MED - OK | 0.9 |
| | Екс | 133273.7 | 6559.324 | 117919.9 | 132503 | 157627 | MAX - OK | |
| Q_{in} [N] | Сим | 133625.85 | 6659.629 | 155635.3 | 133336.1 | 155103.4 | MED - OK | 0.81 |
| | Екс | 134771.55 | 6401.264 | 155700.7 | 134926.9 | 154563.2 | MAX - OK | |
| Y_{out} [N] | Сим | 1803.0038 | 2571.283 | -5654.18 | 1667.78 | 10220.54 | MED - OK | 0.1 |
| | Екс | 113.29334 | 2370.54 | -5995.732 | 110.2326 | 10435.42 | MAX - OK | |
| Y_{in} [N] | Сим | 2171.9912 | 2484.761 | -4175.855 | 1997.935 | 12144.82 | MED - OK | 0.4 |
| | Екс | 4571.2022 | 2030.610 | -3276.353 | 4638.961 | 9484.411 | MAX - OK | |

Из табеле 7-3 произилази да постоји добро слагање између валидационих метрика. Међутим, треба уочити да су границе прихватљивих одступања између симулације и експеримента веома широке за валидациону метрику коју је предложио Polach. Наиме, дозвољена одступања убрзања од 0,4 m/s², у случају оцене код кретања празног возила су двоструку веће од мерених убрзања у бочном правцу, што се може уочити у табели 7-3. Поред тога, с обзиром да се у овом случају ради о кретању празног возила по колосеку, бочне силе су релативно мале

У случају валидације модела празног возила које се креће у кривини и на правцу новопредложена метрика се показује као знатно строжа у погледу услова валидације.

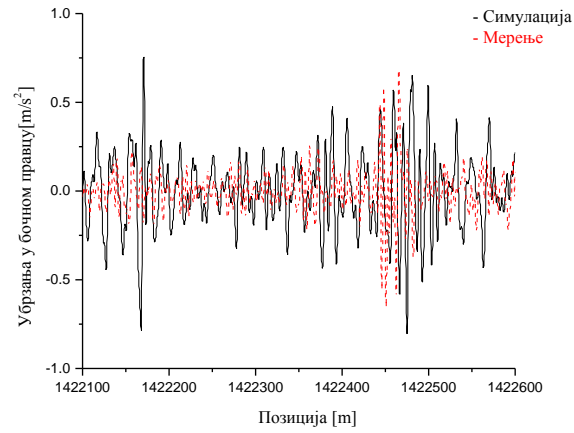
7.5 ПРАЗАН ВАГОН НА ПРАВЦУ

За валидацију модела празног вагона који се креће на правцу одабрана је деоница колосека укупне дужине 200 m. На изабраној деоници, при експерименталном испитивању, возило је се кретало брзином чији је профил дат на слици 7-26.

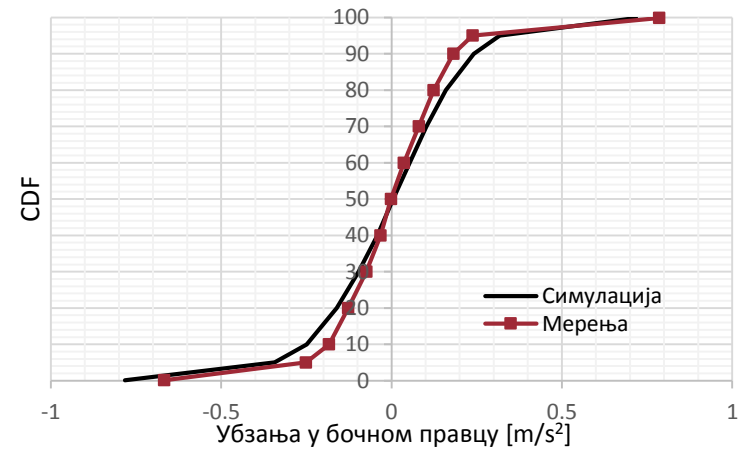


Слика 7-26. Профил брзине празног вагона приликом кретања на правцу

а)

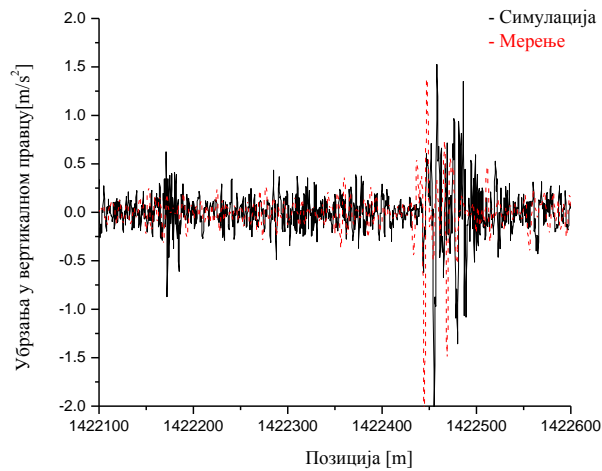


б)

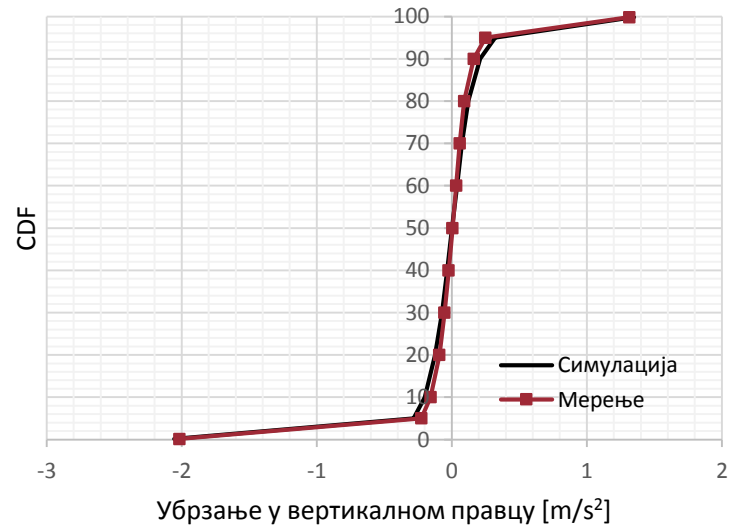


Слика 7-27. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља,
а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

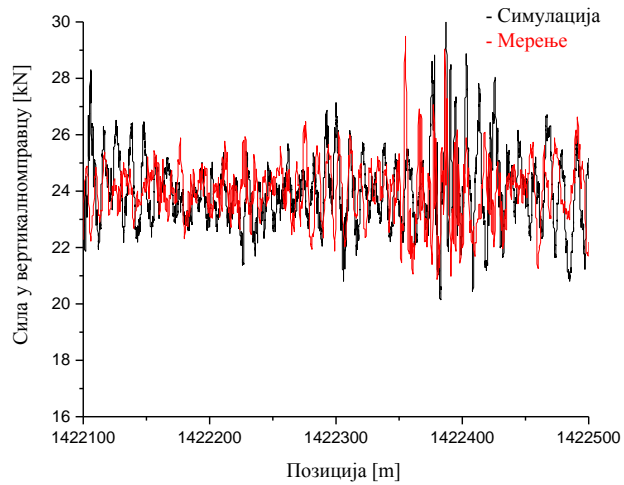


б)

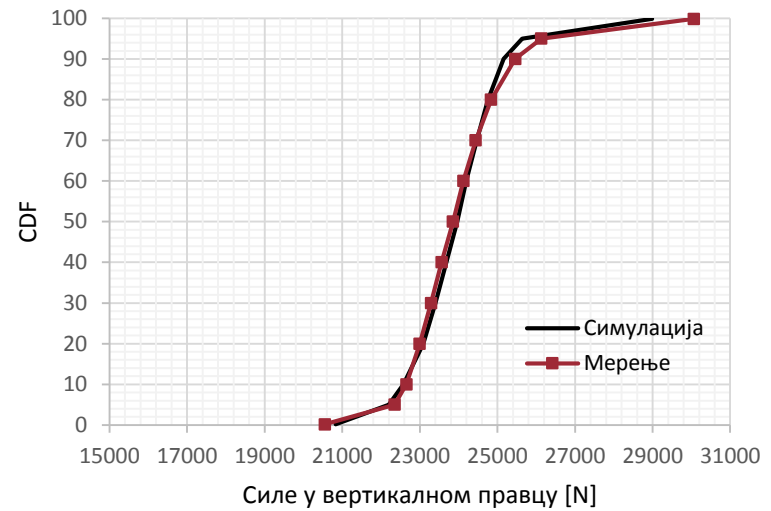


Слика 7-28. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља,
а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

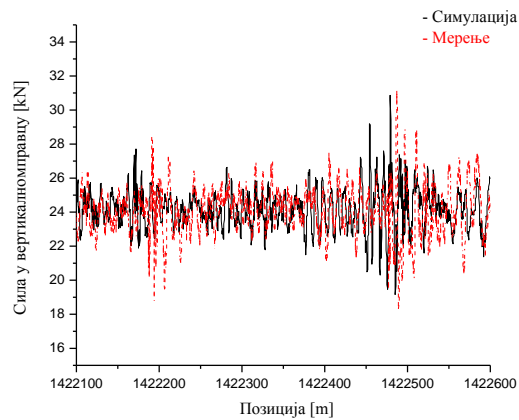


б)

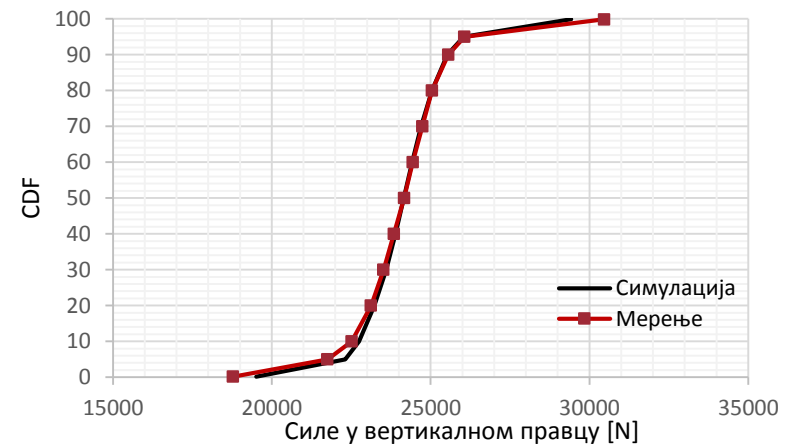


Слика 7-29. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

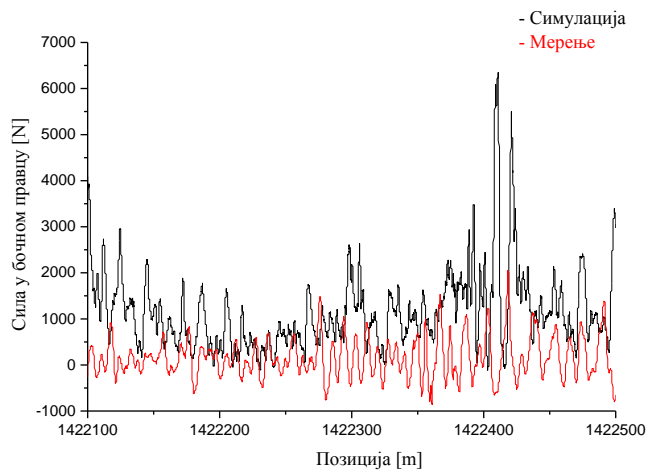


б)

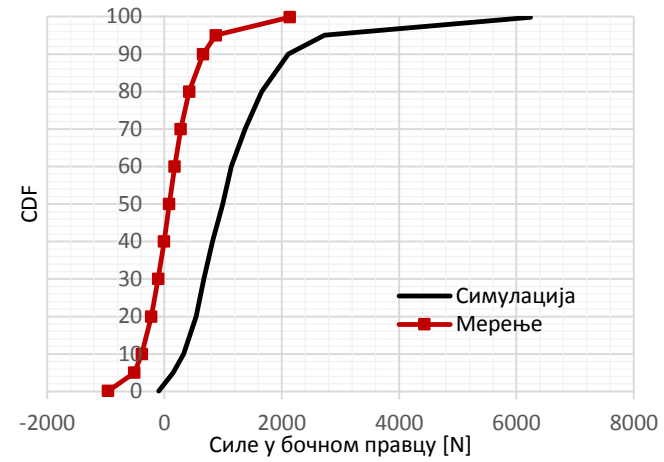


Слика 7-30. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)

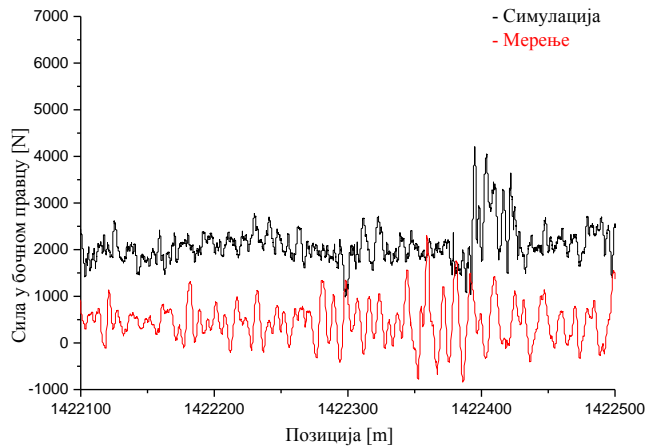


б)

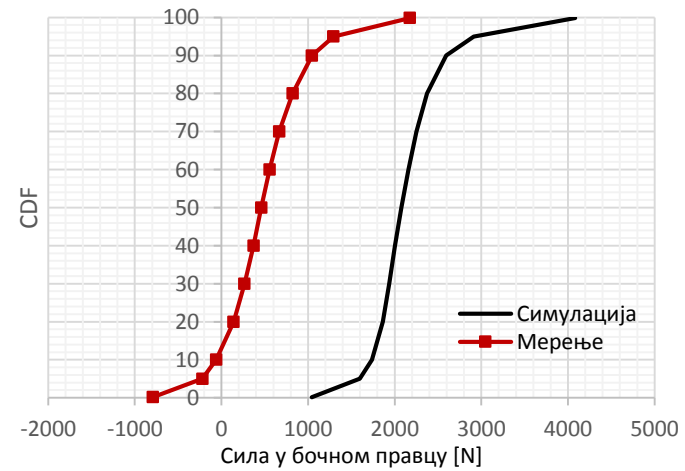


Слика 7-31. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

а)



б)



Слика 7-32. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле

Табела 7-4. Резултати валидације модела железничког возила за случај празног возила које се креће на правцу

| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | RMS | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
|---|-----|-----------|----------|-----------|------------|------------|----------|--------------|
| Убрзања сандука вагона изнад водећег обртног постоља | | | | | | | | |
| \ddot{y} [m/s ²] | Сим | 6.76E-04 | 0.20996 | -0.78211 | 0.00458 | 0.7173 | RMS - OK | 0.77 |
| | Екс | 4.23E-04 | 0.16685 | -0.667 | 0.00168 | 0.78528 | MAX - OK | |
| \ddot{z} [m/s ²] | Сим | 5.52E-04 | 0.24831 | -2.05473 | 0.00216 | 1.34969 | RMS - OK | 0.87 |
| | Екс | 6.68E-04 | 0.21693 | -2.01661 | 0.00537 | 1.31592 | MAX - OK | |
| Силе на точковима на водећој осовини | | | | | | | | |
| Параметар | | Mean | STD | 0.15% MIN | Median MED | 99.85% MAX | Polach | Нова метрика |
| Q_l [N] | Сим | 23939.58 | 1082.92 | 20831.71 | 23961.5 | 28988.73 | MED - OK | 0.616 |
| | Екс | 23977.49 | 1212.51 | 20553.55 | 23853.5 | 30060.87 | MAX - OK | |
| Q_r [N] | Сим | 24158.19 | 1212.01 | 19514.38 | 24153.5 | 29427.1 | MED - OK | 0.592 |
| | Екс | 24085.74 | 1333.62 | 18785.89 | 24168.5 | 30470.02 | MAX - OK | |
| Y_l [N] | Сим | 118.04143 | 426.0872 | -961.5673 | 80.01363 | 2133.261 | MED - OK | 0.013 |
| | Екс | 1169.2007 | 909.1868 | -99.89719 | 993.5981 | 6240.626 | MAX - OK | |
| Y_r [N] | Сим | 484.2792 | 448.3350 | -791.4368 | 460.3282 | 2176.955 | MED - OK | 0.23 |
| | Екс | 2138.4176 | 415.8552 | 1043.438 | 2075.798 | 4083.855 | MAX - OK | |

Као што се може видети са дијаграма и из приложене табеле, и у овом случају постоји добро слагање између две валидационе метрике.

Интересантно је приметити да неслагања између две примењене валидационе метрике постоје у случају сила у бочном правцу на левом и десном точку на водећој осовини водећег обртног постоља. Код бочне силе на левом точку постоје разлике како у средњим вредностима, тако и у максималним вредностима кумулативне дистрибуције (разлике у стандардној девијацији), што доводи до ниске оцене валидности према новопредложеној метрици. Код силе на десном точку су одступања средњих вредности добијених експериментално и симулацијом, приближно једнака, док међу средњим вредностима постоји значајно одступање. С обзиром да је новопредложена метрика заснована на поређењу варијације кумулативних функција, у овом случају се добија боља оцена при валидацији модела у односу на валидациону оцену за силу на другом точку, која је значајно мања услед разлике у средњим вредностима.

И у случају валидације модела празног вагона који се креће на правцу, сви параметри испуњавају услове валидности дефинисане метриком коју је предложио Polach. Међутим, новопредложена метрика и у овом случају поставља знатно строжије захтеве за валидацију модела.

7.6 ГРАНИЧНЕ ВРЕДНОСТИ ВАЛИДАЦИОНЕ ОЦЕНЕ

Избор граничне вредности валидационе оцене у процесу валидације модела представља завршни и критични корак, јер одређује границу између прихватљивог и неприхватљивог модела железничког возила. Изабрана гранична вредност валидационе оцене треба да одсликава, са једне стране, математичку сличност поређених сигнала, а са друге стране, да одговора досадашњим искуствима истраживача на валидацији модела железничких возила.

Табела 7-5. Упоредни приказ валидационих метрика са различитим граничним вредностима новопредложене валидационе метрике

| Метрика Параметар | Polach | Новопредложена метрика (Граничне вредности) | | |
|----------------------------------|--------|--|-----|-----|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| Натоварено возило у кривини | | | | |
| \ddot{y}^* [m/s ²] | Да | Да | Да | Не |
| \ddot{z}^* [m/s ²] | Не | Да | Не | Не |
| Q_{in} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{out} [N] | Не | Да | Да | Да |
| Y_{out} [N] | Не | Не | Не | Не |
| Y_{in} [N] | Да | Не | Не | Не |
| Натоварено возило на правцу | | | | |
| \ddot{y}^* [m/s ²] | Да | Да | Не | Не |
| \ddot{z}^* [m/s ²] | Не | Да | Не | Не |
| Q_{in} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{out} [N] | Да | Да | Да | Не |
| Y_{out} [N] | Да | Да | Да | Не |
| Y_{in} [N] | Да | Да | Не | Не |
| Празно возило у кривини | | | | |
| \ddot{y}^* [m/s ²] | Да | Не | Не | Не |
| \ddot{z}^* [m/s ²] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{in} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{out} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Y_{out} [N] | Да | Не | Не | Не |
| Y_{in} [N] | Да | Да | Да | Не |
| Празно возило на правцу | | | | |
| \ddot{y}^* [m/s ²] | Да | Да | Да | Да |
| \ddot{z}^* [m/s ²] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{in} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Q_{out} [N] | Да | Да | Да | Да |
| Y_{out} [N] | Да | Не | Не | Не |
| Y_{in} [N] | Да | Да | Не | Не |

У табели 7-5 дат је упоредни приказ резултата валидације модела железничког возила према валидационој матрици коју је дефинисао Polach и новопредложене валидационе метрике са различитим граничним вредностима. У приказаној табели

са ДА су означене величине које задовољавају а са НЕ су означене величине које не задовољавају услове валидационе метрике.

Уколико би се усвојила релативно ниска гранична вредност валидационе оцене, што би одговарало приказаној вредности од 0,2 у табели 7-5, тада би се омогућило да се као валидан модел прихвати онај модел чији резултати симулације у знатној мери одступају од експерименталних резултата.

Повећањем граничне вредности валидационе оцене постављају се строжији критеријуми за валидацију, што значи да се у овом случају смањују прихватљива одступања резултата симулације у односу на експерименталне резултате. Ако се, на пример, прихвати да је гранична вредност валидационе метрике за валидацију посматраног модела железничког возила 0,4, тада би се за валидацију модела поставили знатно строжи критеријуми него што је то предложено валидационом метриком Polach-a.

Гранична вредност валидационе оцене новопредложене валидационе метрике од 0,2, поредећи резултате валидације и узимајући у обзир приказане разлике величина за поређење, узрокују релативно ниску сагласност између резултата симулације и експеримента. Са друге стране, гранична вредност од 0,4 поставља врло строге критеријуме за валидацију модела и у приказаним примерима валидације, за већину посматраних величина оценила модел као неадекватан, па чак и у оним случајевима када досадашња истраживања сматрају да постоји релативно добро слагање између величина које се пореде, као што је то приказано у табели 7-5 за случај натовареног возила које се креће на правцу.

У овом раду, за граничну вредност валидационе оцене предложена је вредност од 0,3 како би се постигло добро слагање са постојећом метриком коју је дефинисао Polach сем у оним случајевима када су границе валидације прешироке, као што је то у случају кретања празног возила на правцу и кривини.

8 ЗАКЉУЧАК

Основни циљ ове докторске дисертације је дефинисање методологије за оцену квалитета симулације кретања железничких возила. Методологија се састоји од избора параметара за оцену, дефинисања валидационе метрике и дефинисања граничних вредности за прихватање односно одбијање нумеричких модела.

Дефинисање методологије за оцену динамичког понашања модела представља мултидисциплинаран задатак који обухвата познавање метода обраде и поређења стохастичких сигнала, познавање експерименталног испитивања железничких возила, као и познавање израде нумеричких модела железничких возила.

У циљу формирања одговарајуће методологије за оцену симулације понашања железничких возила, у оквиру докторске дисертације, објашњен је појам валидације и верификације модела, као и значај примене ових методологија у области железничког машинства. У оквиру тог поглавља посебна пажња посвећена је значају примене валидације и верификације нумеричких модела железничких возила са аспекта смањења обима експерименталних испитивања и могућности замене одговарајућим симулационим моделима [65].

Величине које су битне за сертификацију и издавање дозволе железничких возила, а које су дефинисане у важећим UIC прописима [30] и EN нормама [31], по карактеру представљају стохастичке величине. Оцена квалитета симулације нумеричких модела одређује се на основу поређења резултата добијених симулацијом и експериментом примењујући одговарајућу валидациону метрику. Поређење стохастичких сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем представља посебан изазов, јер није могуће применити неку од познатих валидационих метрика и/или поредити основне параметре стохастичких сигнала, као што је то показао Polach у својим истраживањима [65].

У области железничког машинства и динамици железничких возила поређење резултата добијених симулацијом и резултата експерименталних испитивања се заснива на визуелном поређењу графикана одабраних величина за валидацију модела, при чему се степен слагања сигнала формира на основу искуства експерта који врше валидацију модела. Овакав приступ је изузетно субјективан и оцена у великој мери зависи од искуства експерта задуженог за оцену нумеричког модела. Поред наведеног, овакав приступ валидације карактерише и постојање велике

несагласности у оцени формираној од стране различитих истраживача над истим подацима одабраним за валидацију модела.

Сертификација железничких возила, дата UIC 518 [30] прописима, базира се на поређењу карактеристика сигнала који се одређују на основу кумулативних функција вероватноће. Недостатак методологије за валидацију предложене од стране UIC-а [30] огледа се у томе да се сигнали пореде само у три тачке, што није довољно за добру процену слагања резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем.

Успостављање одговарајућих корелација између неке од већ познатих валидационих метрика и оцене формиране од стране експерата представља још један од проблема са којима се суочавамо приликом валидације модела железничких возила, што је Polach приказао у својим истраживањима. Поред тога, оцена слагања резултата симулације динамичког понашања железничких возила и резултата експерименталног испитивања применом основних својстава стохастичких сигнала (амплитуда, фреквенција и фаза) може довести до контрадикторних резултата, посебно ако се истовремено пореде са оценама експерата.

Базирајући се на препорукама UIC 518 [30], као и на познатим валидационим метрикама, у овој докторској дисертацији је предложена је нова валидациона метрика за оцену слагања резултата симулације и експерименталних резултата, такође заснована на поређењу кумулативних функција стохастичких сигнала. Поређење кумулативних функција у новопредложеној метрици се заснива на Фишеровој статистици, при чему се степен слагања поређених функција формира на основу вероватноће добијене из Фишерове расподеле, и на основу разлика у средњим вредностима поређених сигнала. Резултати поређења формиран на основу ове метрике у суштини одражавају сличност облика кумулативних функција расподеле које се пореде.

Валидација модела железничког возила базирана на новопредложеној валидационој метрици, представља објективну оцену слагања резултата добијених симулацијом и експерименталним испитивањем

За предложену граничну вредност валидационе оцене 0,3 новопредложена валидациона метрика има релативно добро слагање са метриком која је настала као резултат истраживања у оквиру пројекта „DYNOTrain“. У дисертацији је показано да валидациона метрика дефинисана од стране Polach-а у појединим случајевима дозвољава релативно велике разлике између величина које се пореде, што је нарочито исказано код валидације модела празног железничког возила.

Валидација модела према препорукама UIC 518 [30], као и спроведена валидација од стране Polach-а, се базирају на визуелном поређењу графика одабраних величина и на поређењу њихових карактеристичних особина (максималне и

минималне вредности сигнала, RMS вредности за убрзања и средњих вредности за силе). За разлику од ове две наведене методе валидације, новопредложена методологија валидације формира оцену о слагању резултата симулације и експеримента на основу поређења кумулативних функција вероватноће у већем броју тачака (тринаест). Укључивање досадашњих сазнања при валидацији модела је могуће кроз формирање граничне вредности валидационе оцене, која дефинише праг за прихватање валидности посматраног модела.

Приликом формирања валидационе метрике за поређење кумулативних функција вероватноће нису увођене претпоставке о расподели поређених сигнала (нормална расподела, студентова расподела, итд), што омогућава да се пореди широки спектар сигнала са различитим расподелама.

Избор граничних вредности валидационе оцене за предложену валидациону метрику представља веома битан корак у оцени валидности модела железничког возила. Гранична вредност валидационе оцене даје квантитативну оцену слагања два сигнала која се пореде и укључује стечена искуства истраживача на валидацији модела железничких возила. Предложеном граничном вредношћу од 0,3 новопредложена валидациона метрика стожије критеријуме за валидацију модела железничких возила у односу на валидациону метрику коју је предложио Polach, што је приказано у седмом поглављу.

Новопредложена валидациона метрика омогућава да се изврши објективна оцена слагања резултата симулације и експеримента за сваку од изабраних величина за поређење. Валидација модела извршена коришћењем новопредложене метрике даје могућност да се смањи обим експерименталних испитивања.

Валидациона метрика представљена у овом раду је примењена на валидацију теретног железничког возила типа „Fapoo040“. Даља истраживања која су започета треба да се развијају у правцу примене валидационе методологије за оцену путничких железничких возила и локомотива, како би се она верификовала за примену над свим моделима железничких возила.

Други правац истраживања требало би усмерити на укључивање мишљења већег броја истраживача за валидацију модела у циљу провере и тачнијег одређивања предложене граничне вредности за оцену валидности модела железничких возила.

Литература

- [1] Hao Pan, Michael Kokkolaras, Gregory Hulbert, “MODEL VALIDATION FOR SIMULATIONS OF VEHICLE SYSTEMS”, 2012 NDIA ground vehicle systems engineering and technology symposium, Modeling & simulation, testing and validation (MSTV) mini-symposium august 14-16, Michigan, paper no 23051
- [2] Ferhat Dikmen, Meral Bayraktar and Rahmi Guclu, “Dynamic analysis of rail vehicle axle”, Sadhan a Vol. 38, Part 2, April 2013, pp. 265–280. Indian Academy of Sciences
- [3] J.R. Evans & P.J. Rogers (1998): “Validation of dynamic simulations of rail vehicles with friction damped y25 bogies”, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 29:S1, 219-233, <http://dx.doi.org/10.1080/00423119808969561> (M23)
- [4] Pelle Carlbom, Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics, Doctoral Thesys, TRITA - FKT 2000:48, ISSN 1103 - 470X, ISRN KTH/FKT/D--00/48-SE
- [5] Jönsson P-A, Persson I and Stichel S: “New Simulation Model for Freight Wagons with UIC Link Suspension“, Vehicle System Dynamics, Volume 46, Supplement, pp 695-704, 2008. (M22)
- [6] S. Stichel, "Western European freight bogies", Workshop of rail vehicle dynamics, April 13-14, Kraljevo, Serbia
- [7] Jerry Evans & Mats Berg, “Challenges in simulation of rail vehicle dynamics”, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Volume 47, Issue 8, 2009 Special Issue: STATE OF THE ART PAPERS OF THE 21ST IAVSD SYMPOSIUM, pages 1023-1048, DOI:10.1080/00423110903071674
- [8] S.D. Iwnicki, A.H. Wickens, “Validation of a MATLAB Railway Vehicle Simulation Using a Scale Roller Rig”, Vehicle System Dynamics (1998), Volume: 30, Issue: 3, Publisher: Citeseer, Pages: 257–270, ISSN: 00423114, DOI:10.1080/00423119808969451 (M23)
- [9] Hans VERBRAKEN, Geert LOMBAERT, Geert DEGRANDE “Experimental and numerical prediction of railway induced vibration”, Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering) ISSN 1673-565X (Print); ISSN 1862-1775 (Online)
- [10] E. Meli-L. Pug, “Preliminary development, simulation and validation of a weigh in motion system for railway vehicles”, Meccanica (2013) 48:2541-2565, DOI 10.1007/s11012-013-9769-9

- [11] Oberkampf, W. L., Trucano, T. G., and Hirsch, C., 2004, “Verification, Validation, and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics”, *Appl. Mech. Rev.*, 57(3), pp. 345–384.
- [12] Sornette, D., Davis, A. B., Ide, K., Vixie, K. R., Pisarenko, V., and Kamm, J. R., 2007, “Algorithm for Model Validation: Theory and Applications”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104(16), pp. 6562–6567.
- [13] Ben H. Thacker, Scott W. Doebbling, Francois M. Hemez, Mark C. Anderson, Jason E. Pepin, Edward A. Rodrigez, „Concepts of model verification and validation“, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, October 2004
- [14] William L. Oberkampf, Matthew F. Barone, 2006, :”Measures of agreement between computation and experimentation: Validation metrics”, *Journal of Computational Phisics*, 217(2006) 5-36, doi: 10.1016/j.jcp.2006.03.037
- [15] Trucano, T.G., R.G Easerling, K.J. Dowding. At all., “Description of the Sandia validation metrics project”, SAND2001-1339, July 2001.
- [16] Jack P.C. Kleijnen, “Verification and validation of simulation models”, *European Journal of Operational Research* 82 (1995) 145-162, ELSEVIER,
- [17] M. Frechet, “Sur quelques points du calcul fonctionnel”, (These), *Rendiconti Circolo Mathematico di Palermo* 22 (1906) 1–74
- [18] American Institute of Aeronautics and Astronautics, “Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations”, Report AIAA-G-077-1998, 1998. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA 20191-4349
- [19] Roache PJ. “Verification and validation in computational science and engineering”, Albuquerque, NM: Hermosa Publishers, 1998
- [20] Barls Y and Carpenter S. “Philosophic roots of model validation: two paradigms”, *Syst Dyn Rev* 1990; 6(2): 148–166.
- [21] Law AM and Kelton WD. “Simulation modeling and analysis”, Second ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1991.
- [22] Ferson S, Oberkampf WL and Ginzburg L.”Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem”, *Comput Methods Appl Mech. Engng* 2008; 197: 2408–2430.
- [23] Lamb D, Castanier M, Pan H, et al. “Model validation for simulation of vehicle systems”, In: The 2012 NDIA ground vehicle systems engineering and technology, modeling & simulation, testing and validation (MSTV) mini symposium, 14–16 August, 2012, Troy, MICHIGAN, Issue: TARDEC-2305
- [24] Sprague MA and Geers TL. “A spectral-element method for modelling cavitation in transient fluid-structure interaction”, *Int J Numer Methods Engng* 2004; 15: 2467–2499.
- [25] Russell DM. “Error measures for comparing transient data: part I, development of a comprehensive error measure“, In: The 68th shock and vibration symposium, pp. 175-184, November 3-6,1997, Hunt Valley, Maryland

- [26] Russell DM. “Error measures for comparing transient data: part II, error measures case study” In: The 68th shock and vibration symposium, pp. 185-198, November 3-6,1997, Hunt Valley, Maryland
- [27] Sarin H, Kokkolaras M, Hulbert G, et al. “A comprehensive metric for comparing time histories in validation of simulation models on emphasis on vehicle safety applications”, The ASME Proceedings, 34th Design Automation Conference (DAC), August 30 - September 2, 2009, San Diego, California, Paper No. DETC2008-49669, pp. 1275-1286; 12 pages, doi:10.1115/DETC2008-49669
- [28] Kolmogoroff A. “Confidence limits for an unknown distribution function”, Ann Math Stat 1941; 12: 461–463.
- [29] Anderson TW and Darling DA.” Asymptotic theory of certain 'goodness-of-fit' criteria based on stochastic processes”, Ann Math Stat 1952; 23: 193–212.
- [30] UIC code 518: 2009. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – safety – track fatigue – running behaviour.
- [31] EN 14363: 2005. Railway applications – testing for acceptance of running characteristics of railway vehicles – testing of running behaviour and stationary test.
- [32] Andersson E, Berg M and Stichel S. Rail vehicle dynamics textbook. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2007.
- [33] Simon Iwnicky, Handbook of railway vehicle dynamics, CRC press, Taylor and Francis Group, 2006
- [34] O. Polach, “Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit”, Wear 258 (2005) 992–1000, Elsevier, doi:10.1016/j.wear.2004.03.046
- [35] Rob J. Hyndman, Anne B. Koehler, “Another look at measures of forecast accuracy”, International Journal of Forecasting, Volume 22, Issue 4, October–December 2006, Pages 679-688, ISSN 0169-2070, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.
- [36] Matías Salibián-Barrera & Stefan Aelst & Gert Willems, 2008. "Fast and robust bootstrap," Statistical Methods and Applications, Springer, vol. 17(1), pages 41-71, February.
- [37] Wackerly, Dennis; Scheaffer, William (2008). Mathematical Statistics with Applications (7 ed.). Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education. ISBN 0-495-38508-5.
- [38] D.M. Russell, “Error measures for comparison transient data”, Proceedings of the 68th Shock and vibration Symposium, 1997
- [39] M.A. Sprague and T.L. Geers, “Spectral elements and field separation for an acoustic fluid subject to cavitation”, J Comput. Phys., pp. 184:149, Vol. 162, (2003)
- [40] Geers TL (1984) “An objective error measure for the comparison of calculated and measured transient response histories”, Shock. Vib. Bull. 54:99–107

- [41] Knowles CP, Gear CW (2004) "Revised validation metric", Unpublished manuscript, 16 June 2004 (revised July 2004)
- [42] Leonard E. Schwer, "Validation metrics for response histories: perspectives and case studies", *Engineering with Computers*, 23:295-309, 207, <http://DOI10.1007/s00366-007-0070-1>
- [43] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, R.-J. Yang, "A comprehensive metric for comparing time histories in validation of simulation models with emphasis on vehicle safety applications", *Proceedings of DETC'08 ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* New York City, New York, August 3-6, 2008
- [44] C. S. Myers and L. R. Rabiner. "A comparative study of several dynamic time-warping algorithms for connected word recognition", *The Bell System Technical Journal*, 60(7):1389-1409, September 1981.
- [45] Peacock J.A. (1983). "Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 202: 615–627. Bibcode:1983MNRAS.202..615P. doi:10.1093/mnras/202.3.615
- [46] Anderson, T. W.; Darling, D. A. (1952). "Asymptotic theory of certain "goodness-of-fit" criteria based on stochastic processes". *Annals of Mathematical Statistics* 23: 193–212. doi:10.1214/aoms/1177729437 .
- [47] Corder, G.W., Foreman, D.I. (2009). *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach* Wiley, [ISBN 978-0-470-45461-9](https://doi.org/10.1002/9780470454619)
- [48] Scott Ferson, William L. Oberkampf, Lev Ginzburg, "Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 197 (2008), 2408-2430
- [49] Scott Ferson, William L. Oberkampf and Lev Ginzburg, "Model validation and predictive capability for the thermal challenge problem", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 197, Issues 29–32, 1 May 2008, Pages 2408–2430, DOI: 10.1016/j.cma.2007.07.030
- [50] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 10.03.2013.
- [51] S. Brandt, *Statistical and Computational Methods in Data Analysis*, North Holland, 1983.
- [52] Branham, *Scientific Data Analysis, An Introduction to Overdetermined Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1990
- [53] Berger, J.O. Bayesian Analysis: "A Look at Today and Thoughts for Tomorrow", *Journal of the American Statistical Association*, 2000, 95(452), pp. 1269-1276
- [54] Fisher, R. A. (1922). "On the interpretation of χ^2 from contingency tables, and the calculation of P". *Journal of the Royal Statistical Society* 85 (1): 87–94. doi:10.2307/2340521. JSTOR 2340521.

- [55] Agresti, Alan (1992). "A Survey of Exact Inference for Contingency Tables". *Statistical Science* 7 (1): 131–153. doi:10.1214/ss/1177011454. JSTOR 2246001.
- [56] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat and R.J. Yang, "A comprehensive metric for comparing time histories in validation of simulation models on emphasis on vehicle safety applications", Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, 2009
- [57] George E. P. Box, "Sampling and Bayes' Inference in Scientific Modelling and Robustness", *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, Vol. 143, No. 4 (1980), pp.383-430, Published by: Blackwell Publishing for the Royal Statistical Society,
- [58] Dalal S.R., „Bayesian non-parametric theory, Bayesian Statistics”, Proceedings of the First International Meeting, May 28- June 2, 1979, Valencia, Spain
- [59] Shuchun WANG, Wei CHEN, Kwok-Leung TSUI, "Bayesian Validation of Computer Models, American Statistical Association and the American Society for Quality Technometrics", November 2009, vol. 51, no. 4 doi 10.1198/tech.2009.07011
- [60] Rodrigo F. Díaz, José M. Almenara, Alexandre Santerne, Claire Moutou, Anthony Lethuillier, Magali Deleuil, "Bayesian extrasolar planet validation. I. General framework, models, and performance", *Earth and Planetary Astrophysics, MNRAS* 441, 983-1004 (2014), [10.1093/mnras/stu601](https://doi.org/10.1093/mnras/stu601)
- [61] Isabelle Guyon, Amir Saffari, Gideon Dror, Gavin Cawley, "Model Selection: Beyond the Bayesian/Frequentist Divide", *Journal of Machine Learning Research* 11 (2010), pp. 61-87
- [62] Milan Merkle, *Verovatnoća i statistika za inžewere i studente tehnik*, Akademska misao, Beograd, 2002
- [63] Wei Chen, Ying Xiong, Kwok-Leung Tsui and Shuchun Wang, "A Design-Driven Validation Approach Using Bayesian Prediction Models", *J. Mech. Des.* 130(2), 021101 (Dec 27, 2007) (12 pages), doi:10.1115/1.2809439
- [64] Nebojša Bogojević, Vojkan Lučanin, „Validation of a railway vehicle with three piece bogie“, *IMK-14 – Istraživanje i razvoj*, 18(2012)1, EN UDK 621 ISSN 0354-6829
- [65] O. Polach, A. Böttcher, "A new approach to define criteria for rail vehicle model validation", 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Track, Qingdao, Chin, August 19-23, 2013, paper No.2.2 (ID278)
- [66] Evans, J. R., and Rogers, P. J., 1998, "Validation of dynamic simulations of rail vehicles with friction damped Y25 bogies", *Vehicle System Dynamics* 29(sup1), pp. 219-233.
- [67] Alfred Jaschinski, Hugues Chollet, Simon Iwnicki, Alan Wickens, Jurgen Von Wurzen, "The Application of Roller Rigs to Railway Vehicle Dynamics",

Vehicle System Dynamics - VEH SYST DYN , vol. 31, no. 5-6, pp. 345-392, 1999

- [68] Jens C.O. Nielsen, “High-frequency vertical wheel–rail contact forces— Validation of a prediction model by field testing”, *Wear*, Volume 265, Issues 9–10, 30 October 2008, Pages 1465-1471, ISSN 0043-1648, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.038>.
- [69] Prud’Homme MA: “La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant”, *Revue générale des chemins de fer* 1967, pp1-23
F. W. Carter, “On the action of a locomotive driving wheel”, *Proc. R. Soc. London. A*, 112 (1926) 151-157.
- [70] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [71] Kalker, J. J.: “A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact”, *Vehicle System Dynamics* 11, 1-13, 1982
- [72] J. Piotrowski & H. Chollet, “Wheel–rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact”, *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* Volume 43, Issue 6-7, 2005 Special Issue: IAVSD: STATE-OF-THE-ART
- [73] Piotrowski, J.(2010) “Smoothing dry friction damping by dither generated in rolling contact of wheel and rail and its influence on ride dynamics of freight wagons”, *Vehicle System Dynamics*, 48: 6, 675 — 703, First published on: 19 April 2010,
- [74] Berghuvud, Ansel and Stensson, Annika(1998) “Dynamic Behaviour of Ore Wagons in Curves at Malmbanan”, *Vehicle System Dynamics*, 30: 3, 271 — 284
- [75] Robert F. Harder, “Dynamic Modelling and Simulation of Three-Piece North American Freight Vehicle Suspension with Non-Linear Frictional Behaviour Using ADAMS/Rail”, 5th ADAMS/Rail User’s Conference Haarlem 10-12 May 2000.
- [76] Berghuvud, Ansel and Stensson, Annika(2001) “Consequences of Nonlinear Characteristics of a Secondary Suspension in a Three-Piece Freight Car Bogie”, *Vehicle System Dynamics*, 36: 1, 37 — 55
- [77] Per-Anders Jönsson, “Freight wagon running gear – a review”, TRITA-FKT Report 2002:35, Division of rail Vehicles, KTH 2002,
- [78] Fujie Xia and Hans True, “On the dynamics of the three-piece-freight truck”, *Proceedings of the 2003 IEEOASME Joint Rail Conference*, April 22-24, 2003 Chicago, Illinois, ASME RTD 2003-1660,
- [79] F. Xia, “Modelling of a two-dimensional Coulomb friction oscillator”, *Journal of Sound and Vibration* 265 (2003) 1063–1074, doi:10.1016/S0022-460X(02) 01444-X
- [80] Brain Feeny, “A nonsmooth Coulomb friction oscillator”, *Physica D* 59 (1992) 25-38, North-Holland

- [81] D. Yang, M. L. Chu and C. H. Menq, "Stick-Slip-Separation Analysis and Non-Linear Stiffness and Damping Characterization Of Friction Contacts Having Variable Normal Load", *Journal of Sound and Vibration* (1998) 210(4), 461-481
- [82] H.-K. Hong and C.-S. Liu, "Coulomb Friction Oscillator: Modelling And Responses To Harmonic Loads And Base Excitations", *Journal of Sound and Vibration* (2000) 229(5), 1171-1192 doi:10.1006/jsvi.1999.2594
- [83] Kaiser, A. B. , Cusumano, J. P. and Gardner, J. F.(2002) "Modeling and Dynamics of Friction Wedge Dampers in Railroad Freight Trucks", *Vehicle System Dynamics*, 38: 1, 55 — 82,
- [84] Ren, L. H. , Shen, G. and Hu, Y. S.(2006) "A test-rig for measuring three-piece bogie dynamic parameters applied to a freight car application", *Vehicle System Dynamics*, 44: 1, 853 — 861,
- [85] Boronenko, Yu. , Orlova, A. and Rudakova, E.(2006) "Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities", *Vehicle System Dynamics*, 44: 1, 402 — 414,
- [86] Ushkalov, Victor F. , Zhechev, Michael M. and McKisic, A. D.(2007) 'Possibility of jamming and wedging in the three-piece trucks of a moving freight car', *Vehicle System Dynamics*, 45: 1, 61 — 76,
- [87] Sun, Y. Q. and Simson, S.(2007) "Nonlinear three-dimensional wagon-track model for the investigation of rail corrugation initiation on curved track", *Vehicle System Dynamics*, 45: 2, 113 — 132,
- [88] Evert Andersson, Mats Berg, Sebastian Stichel, "Rail Vehicle Dynamics", Division of rail Vehicles, KTH 2007,
- [89] Y.Q. Sun, C. Cole, "Vertical dynamic behavior of three-piece bogie suspensions with two types of friction wedge", *Multibody Syst Dyn* (2008) 19: 365–382, DOI 10.1007/s11044-007-9085-z,
- [90] Orlova, A. and Romen, Yu.(2008) "Refining the wedge friction damper of three-piece freight bogies", *Vehicle System Dynamics*, 46: 1, 445 — 455,
- [91] Ghazavi, Mohammad Reza and Taki, Majid(2008) "Dynamic simulations of the freight three-piece bogie motion in curve", *Vehicle System Dynamics*, 46: 10, 955 — 973,
- [92] Fujie Xia, Colin Cole, Peter Wolfs, "The dynamic wheel-rail contact stresses for wagon on various tracks", *Wear* 265 (2008) 1549–1555, doi:10.1016/j.wear.2008.01.035
- [93] Chaar. N, Berg M, "Vehicle-track dynamic simulation of a locomotive considering wheelset structural flexibility and comparison with measurements", *Rail and Transit* 219 (2005), 225-238.
- [94] Eric Berggren, "Railway Track Stiffness Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance", Doctoral Thesis, TRITA AVE 2009:17, ISSN 1651-7660, ISBN 978-91-7415-293-7

- [95] Luciano Afferrante and Michele Ciavarella, "Thermoelastic Dynamic Instability (TEDI) in frictional sliding of a halfspace against a rigid non-conducting wall", *Journal of Appl. Mech.*, vol. 74 (5), pp. 875-884, 2007.
- [96] Hossein Nia, S., Stichel, S., Jönsson, P., Nordmark, T., Bogojevic, N. (2013) "Can Simulation Help to Find the Sources of Wheel Damages?: Investigation of Rolling Contact fatigue on the Wheels of a Three-Piece Bogie on the Swedish Iron ore Line via Multibody Simulation Considering Extreme Winter Condition" 10Th International Heavy Haul Association Conference IHHA, New Delhi, India on February 4 - 6, 2013, pp. 357-363

СПИСАК СЛИКА

| | |
|---|----|
| Слика 2-1. Графички приказ процеса валидације и верификације модела | 12 |
| Слика 2-2. Приказ процеса валидације и верификације модела..... | 14 |
| Слика 2-3. Област валидације и предвиђања за модел са 2 параметра П1 и П2 | 18 |
| Слика 2-4. Валидациона хијерархија | 19 |
| Слика 2-5. Однос симулације понашања, експерименталног испитивања и реалног понашања железничког возила..... | 25 |
| Слика 2-6. Тренутно место симулације понашања возила у пројектовању железничких возила | 26 |
| Слика 2-7. Значај симулације у будућности у процесу пројектовања и сертификације железничких возила | 26 |
| Слика 2-8. Испитивање на реалном објекту у односу на виртуално испитивање употребом симулације понашања возила..... | 27 |
| Слика 3-1. Категоризација валидационих метода..... | 29 |
| Слика 3-2. Поређење резултата добијених мерењем и симулацијом за силе на осовинском склопу локомотиве која се креће по колосеку са кривинама..... | 30 |
| Слика 3-3. Колморгонов-Смирнова метрика..... | 35 |
| Слика 3-4. Ферсон-Оберкампф валидациона метрика заснована на поређењу површина | 37 |
| Слика 3-5. Студентова t расподела за различит број степени слободе..... | 41 |
| Слика 3-6. Графички приказ правила за прихватање и одбацивање хипотеза..... | 41 |
| Слика 3-7. Функција густине вероватноће за хи-квадрат тест | 43 |
| Слика 3-8. Фишерава расподела са различитим бројем степени слободе..... | 44 |
| Слика 3-9. Валидација модела у временском домену поређењем убрзања сандука вагона | 49 |
| Слика 3-10. Polach и остали – валидација модела помоћу бочних сила у временском и просторном домену | 50 |
| Слика 3-11. Поређење спектралне густине снага -PSD вертикалних сила добијених експерименталним испитивањем и симулацијом [29]..... | 51 |
| Слика 3-12. Валидација модела у фреквентном домену применом графичких метода валидације | 52 |
| Слика 3-13. Поређења бочних сила у просторном домену добијених експерименталним испитивањем и симулацијом..... | 53 |
| Слика 3-14. Поређење убрзања сандука вагона у бочном правцу добијених експерименталним испитивањем и симулацијом..... | 54 |
| Слика 3-15. Поређење спектралних густина снага убрзања сандука вагона у бочном правцу добијених симулацијом и експерименталним испитивањем | 54 |
| Слика 3-16. Поређење средњих , 0,15% и 99,85% вредности убрзања сандука вагона у бочном правцу | 55 |
| Слика 3-17. Валидација модела поређењем вертикалних сила на Laas возилу [64]..... | 55 |
| Слика 4-1. Процес калибрације модела | 59 |
| Слика 4-2. Приказ валидационе метрике предложене од стране О.Polach-а и UIC 518 | 61 |
| Слика 4-3. Приказ изабраних тачака за поређење кумулативних функција новом метриком | 63 |
| Слика 4-4. Графички приказ валидационе метрике..... | 64 |
| Слика 4-5. Утицај промене средње вредности сигнала на валидациону метрику | 65 |
| Слика 4-6. Графички приказ валидационе хијерархије модела железничког возила са обртним постољем..... | 69 |

| | |
|---|-----|
| Слика 4-7. Графички приказ валидационе хијерархије модела железничког возила без обртних постоља | 69 |
| Слика 5-1. Процес моделирања и симулације динамичког понашања железничких возила... 71 | 71 |
| Слика 5-2. Вагон за превоз угља | 73 |
| Слика 5-3. Контролна јединица за кочиони систем..... | 73 |
| Слика 5-4 ASF Motion Control M976 тродено обртно постоље | 73 |
| Слика 5-5. Троделно обртно постоље “Motion control M975”- Amsted rail, 1-бочни носачи, 2-попречни носач, 3-бочни носачи, 4-клин, 5-вешајни систем, 6-еластични адаптер, 7-осовински склоп | 74 |
| Слика 5-6. Модел еластичног адаптера између осовинског склопа и бочног рама..... | 75 |
| Слика 5-7. А) Модел паралелене везе опруге и пригушења са вискозним трењем, б) Дијаграм сила-померај | 76 |
| Слика 5-8. Контакт крутих тела, а) модел контакта крутих тела, б) графички приказ карактеристике контакта крутих тела..... | 76 |
| Слика 5-9. Коефицијент трења у зависности од брзине..... | 77 |
| Слика 5-10. Фрикционо пригушење вибрација код троделних обртних постоља, а) са константним пригушењем, б) са варијабилним пригушењем | 78 |
| Слика 5-11. Модел вешајног система троделног обртног постоља | 78 |
| Слика 5-12. Модел једнодоменионог фрикционог блок– Saint Venant елемент са константном нормалном силом | 79 |
| Слика 5-13. А) модел једнодоменионог фрикционог блок– Saint Venant елемент, б) Дијаграм сила – померај | 79 |
| Слика 5-14. Модел клина у вешајној систему возила | 80 |
| Слика 5-15. Положај бочних клизача..... | 81 |
| Слика 5-16. Модел обртне плоче..... | 81 |
| Слика 5-17. Савијање осовинског склопа натовареног возила..... | 82 |
| Слика 5-18. Профил UNO-WP-4 МТАВ точка и профил шине BV50 | 83 |
| Слика 5-19. Еквивалентна коничност на правом колосеку..... | 84 |
| Слика 5-20. Структура колосека..... | 84 |
| Слика 5-21. А) профил шине BV50, б) профил шине UIC 60 | 85 |
| Слика 5-22. Модел колосека | 86 |
| Слика 5-23. Преносне функције колосека | 87 |
| Слика 5-24. Неправилности на колосеку..... | 88 |
| Слика 5-25. Неправилности на колосеку..... | 89 |
| Слика 6-1. Распоред мерних места и мерене величине приликом експерименталног испитивања вагона типа „Fano040“ | 90 |
| Слика 6-2. Снимљен профил точка UNO-WP 4 MB | 91 |
| Слика 6-3. Разлика пречника котрљања UNO-WP 4 MB | 92 |
| Слика 6-4. Угао контакта точка UNO-WP 4 MB и шине BV50..... | 92 |
| Слика 6-5. Позиција контактне тачке између точка и шине у бочном правцу за комбинацију профила точка UNO-WP 4 MB и профила шине BV50 I30..... | 93 |
| Слика 6-6. Позиција контактне тачке између точка и шине у вертикалном правцу за комбинацију профила точка UNO-WP 4 MB и профила шине BV50 I30..... | 93 |
| Слика 7-1. Полупречник кривине за изабрану деоницу..... | 99 |
| Слика 7-2. Надвишење колосека за изабрану деоницу | 99 |
| Слика 7-3. Профил брзине при кретању возила кроз кривину | 100 |

| | |
|--|-----|
| Слика 7-4. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Приказ сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену, б) Кумулативне функције убрзања | 101 |
| Слика 7-5. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Приказ сигнала добијених симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену, б) Кумулативне функције | 101 |
| Слика 7-6. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 102 |
| Слика 7-7. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 102 |
| Слика 7-8. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 103 |
| Слика 7-9. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 103 |
| Слика 7-10. Профил брзине приликом кретања вагона на правцу | 105 |
| Слика 7-11. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 106 |
| Слика 7-12. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 106 |
| Слика 7-13. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 107 |
| Слика 7-14. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 107 |
| Слика 7-15. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 108 |
| Слика 7-16. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 108 |
| Слика 7-17. Полупречник кривине за изабрану деоницу | 110 |
| Слика 7-18. Надвишење колосека за изабрану деоницу | 110 |
| Слика 7-19. Профил брзине при кретању возила кроз кривину | 111 |
| Слика 7-20. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 112 |
| Слика 7-21. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 112 |

| | |
|--|-----|
| Слика 7-22. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 113 |
| Слика 7-23. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 113 |
| Слика 7-24. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 114 |
| Слика 7-25. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 114 |
| Слика 7-26. Профил брзине празног вагона приликом кретања на правцу..... | 116 |
| Слика 7-27. Убрзање сандука вагона у бочном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 117 |
| Слика 7-28. Убрзање сандука вагона у вертикалном правцу изнад водећег обртног постоља, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 117 |
| Слика 7-29. Вертикална сила у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 118 |
| Слика 7-30. Вертикална сила у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 118 |
| Слика 7-31. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на спољашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 119 |
| Слика 7-32. Сила у бочном правцу у контакту точак-шина на унутрашњем точку на водећој осовини на водећем обртном постољу, а) Сигнали добијени симулацијом и експерименталним испитивањем у просторном домену б) Кумулативне функције расподеле | 119 |

СПИСАК ТАБЕЛА

| | |
|---|----|
| Табела 1. Активности процеса верификације модела..... | 16 |
| Табела 3-1. Критичне вредности за Студентову t-расподелу са n степени слободe..... | 40 |
| Табела 3-2. Предлог праметара, критеријума и граничних вредности за валидацију модела железничких возила према [65] | 57 |
| Табела 5-1. Основни подаци о железничком возилу | 72 |
| Табела 6-1. Ознаке полазних и долазних станица | 94 |
| Табела 6-2. Основни подаци о тест вожњама при експерименталном испитивању | 94 |

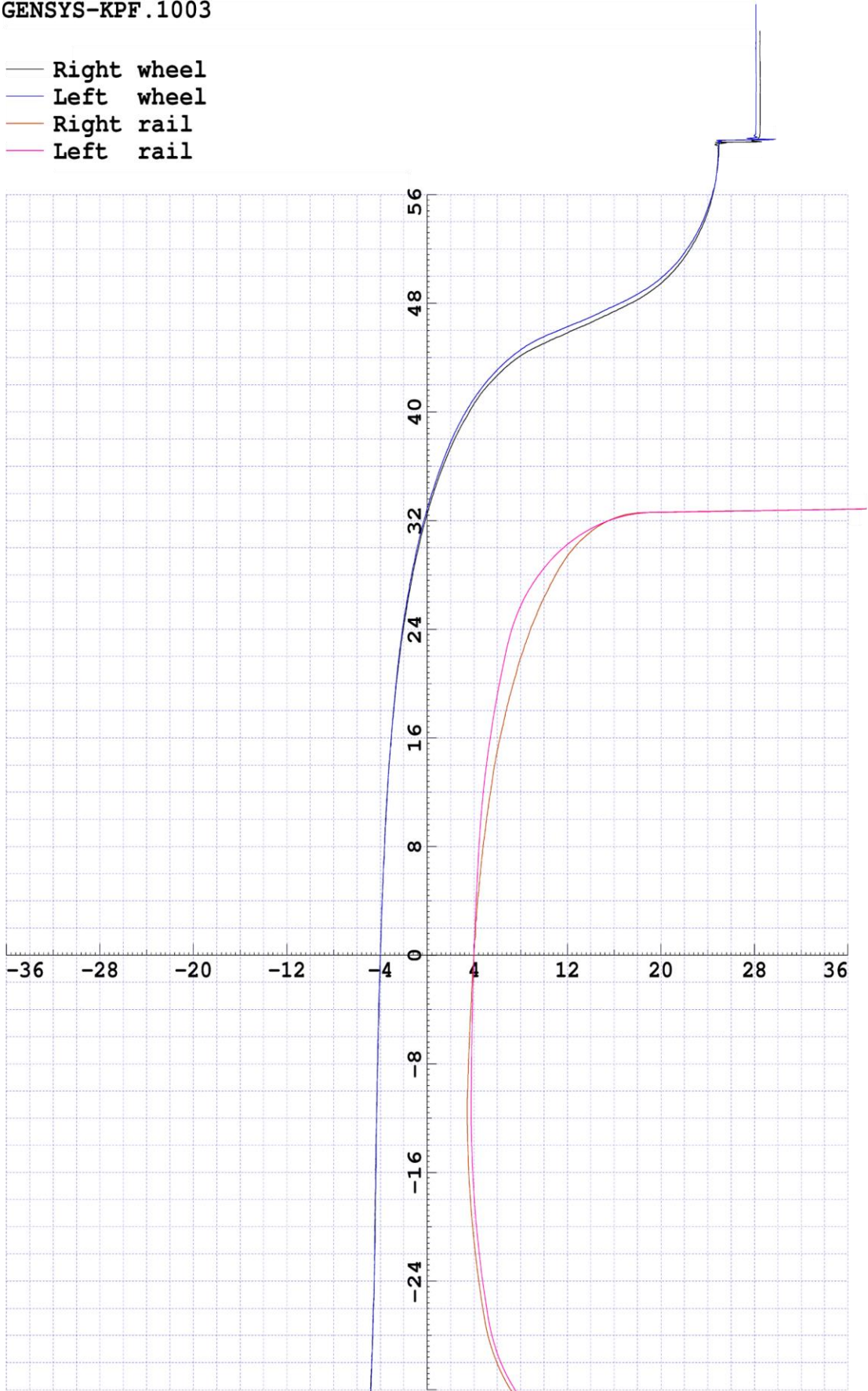
| | |
|--|------------|
| Табела 6-3. Класификација колосека са аспекта полупречника кривине..... | 95 |
| Табела 6-4. Резултати експерименталног испитивања | 95 |
| Табела 7-1. Резултати валидације модела железничког возила за случај када се натоварено возило креће у кривини..... | 104 |
| Табела 7-2. Резултати валидације модела железничког возила за случај натовареног возила које се креће на правцу | 109 |
| Табела 7-3. Резултати валидације модела железничког возила за случај празног возила које се креће у кривини | 115 |
| Табела 7-4. Резултати валидације модела железничког возила за случај празног возила које се креће на правцу..... | 120 |
| Табела 7-5. Упоредни приказ валидационих метрика са различитим граничним вредностима новопредложене валидационе метрике..... | 121 |

ПРИЛОГ 1

Контакт точка профила WP4 и шине BV50mb1 I30

GENSYS-KPF.1003

- Right wheel
- Left wheel
- Right rail
- Left rail



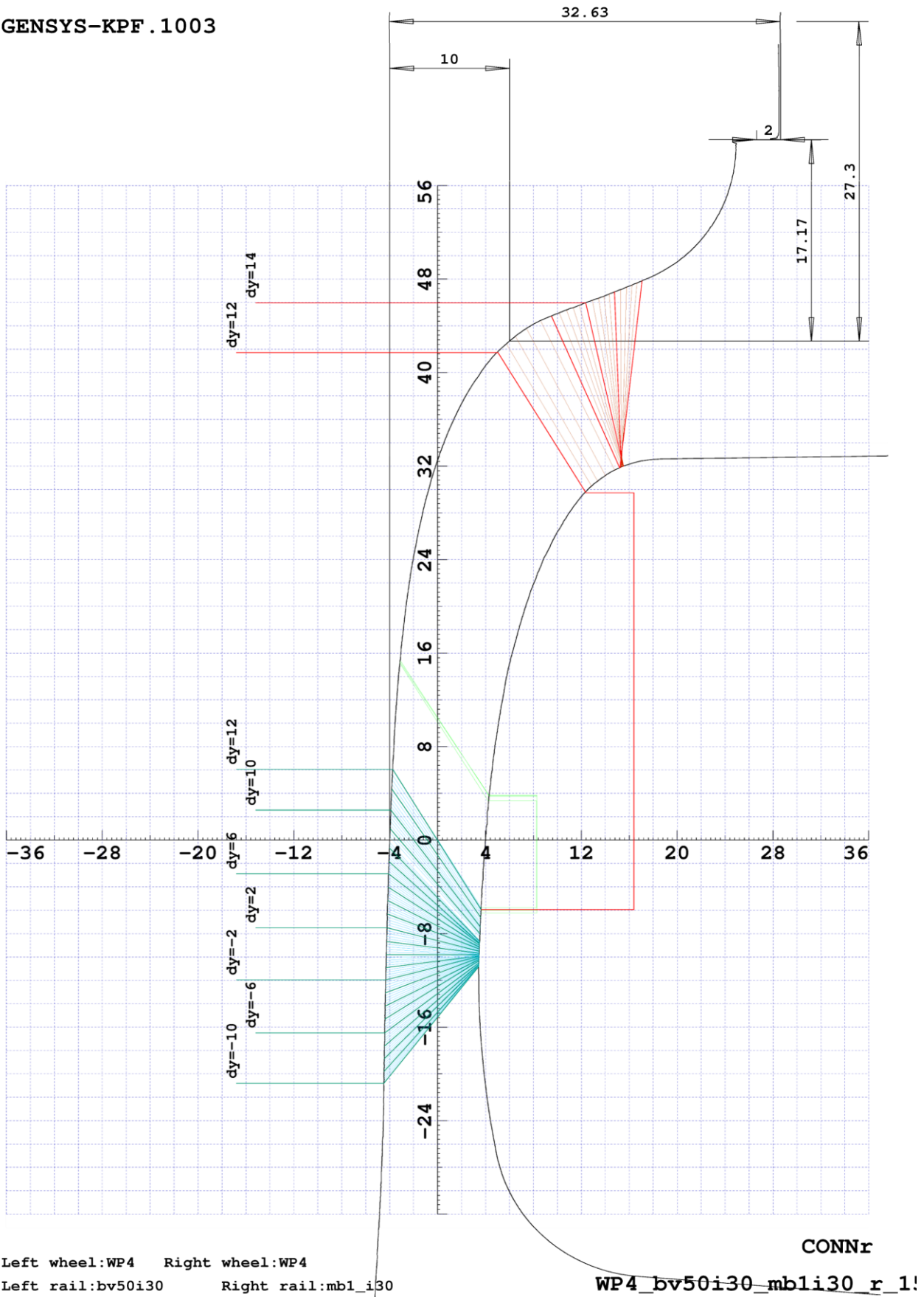
Left wheel:WP4 Right wheel:WP4

Left rail:bv50i30 Right rail:mb1_i30

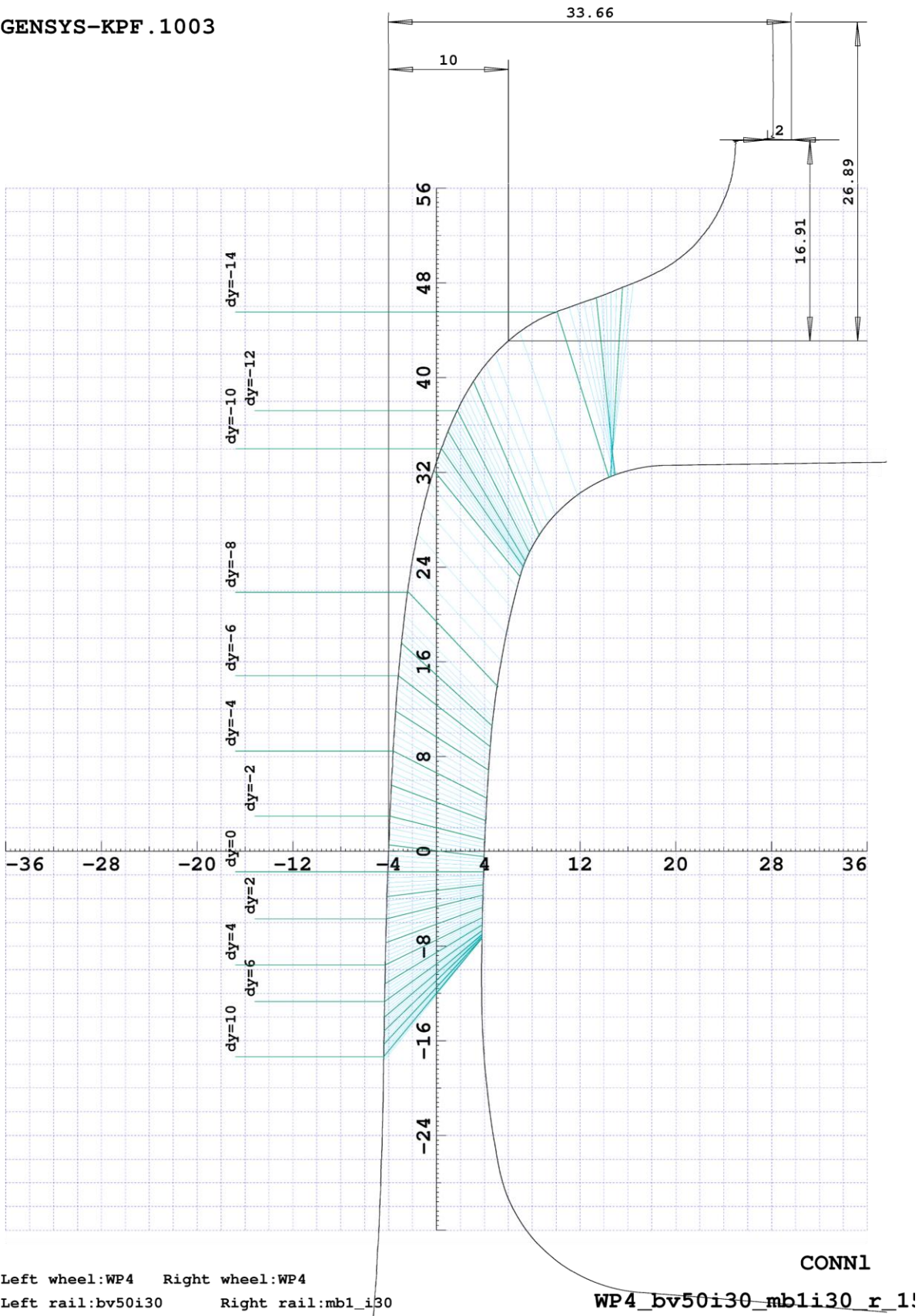
WRGEOM

WP4_bv50i30_mb1i30_r_1!

Слика I-0-1. Профили точкова WP4 и профили шина BV50 и MB1

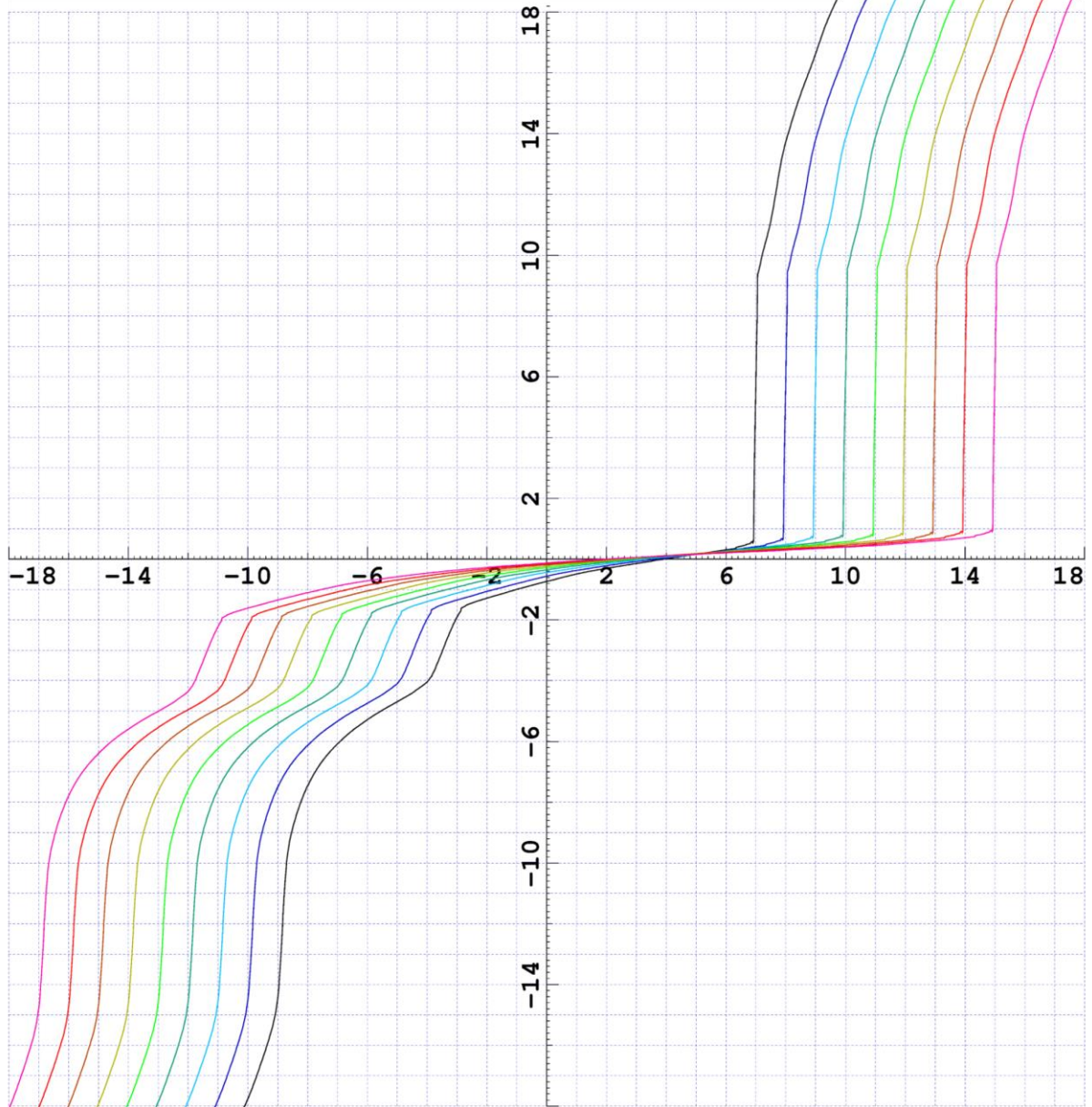


Слика I-0-2. Тачке контакта између точкана десној страни возила са профилем WP4 и десне шине профила MB1



Слика I-0-3. Тачке контакта између точкана левој страни возиал са профилем WP4 и леве шине профила BV50

Gauge= 1425 —
 1427 —
 1429 —
 1431 —
 1433 —
 1435 —
 1437 —
 1439 —
 1441 —

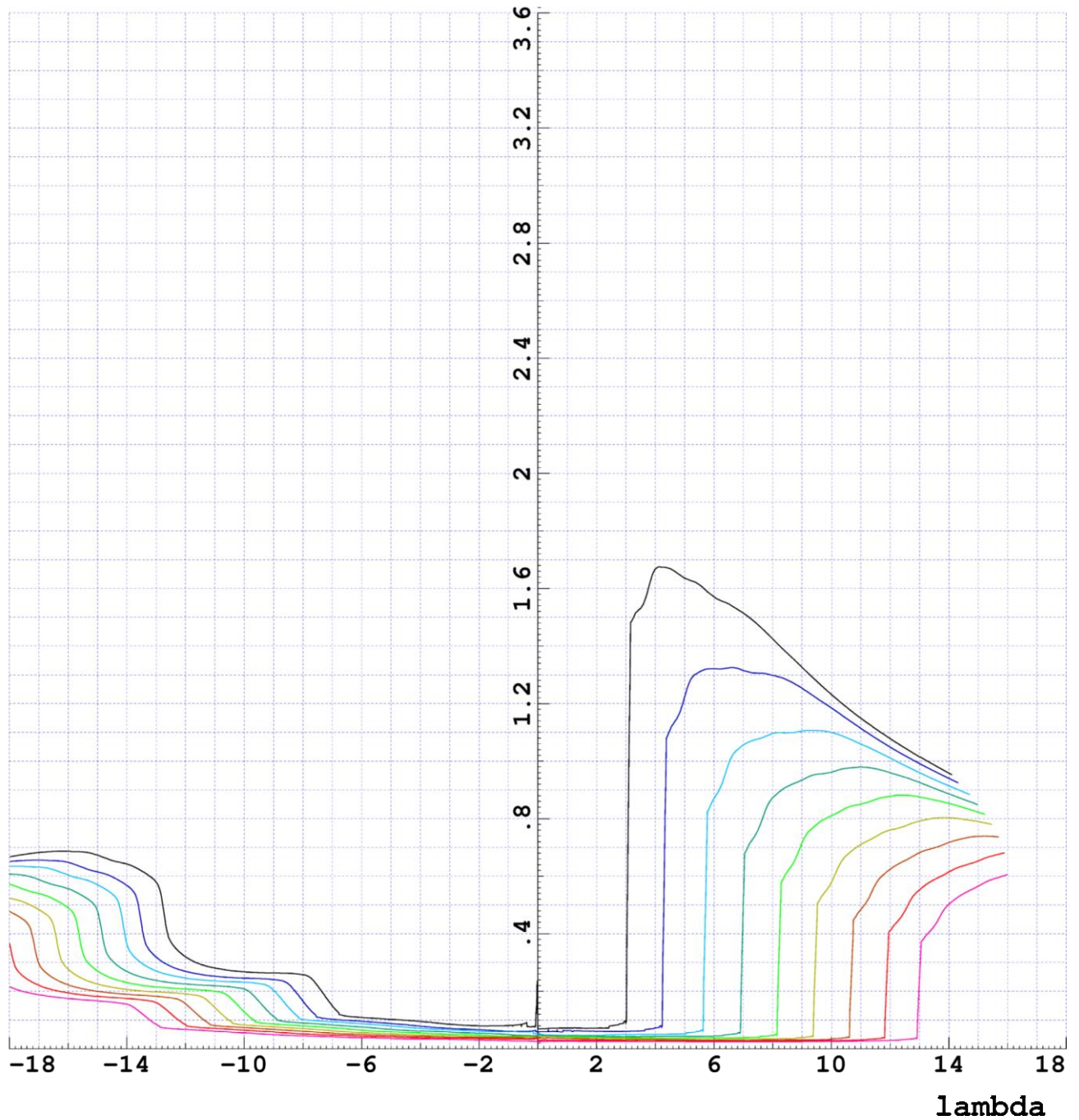


Left wheel:WP4 Right wheel:WP4
 Left rail:bv50i30 Right rail:mb1_i30

rr-rl
 WP4_bv50i30_mb1i30_r_1!

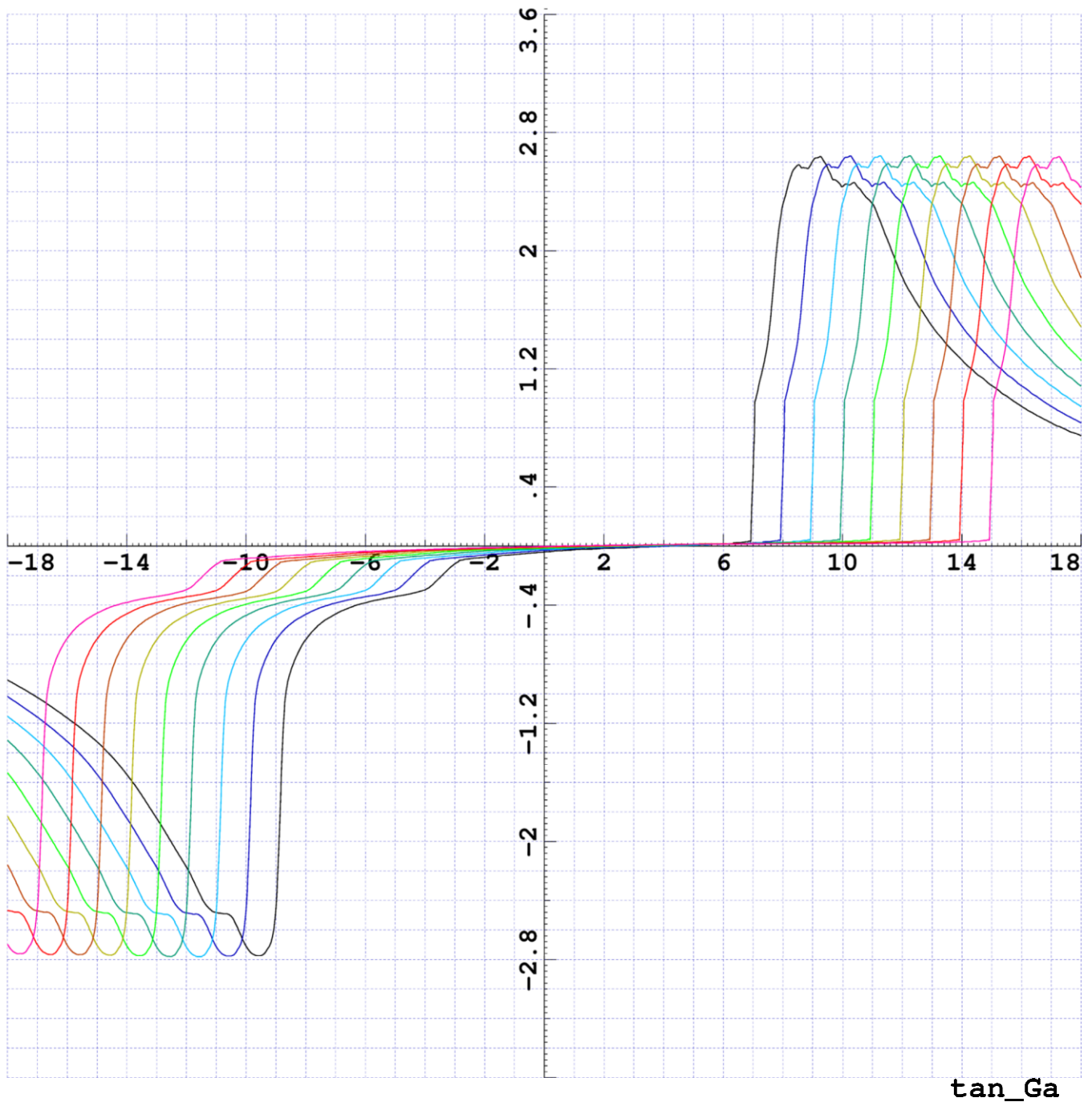
Слика I-0-4. Разлика радијуса котрљања за профил точка WP4 за различите ширине колосека

| Delta_Y= | | .1 | .5 | 2 | 3 | 4 | 6 |
|-------------|---|------|------|------|------|-------|-------|
| Gauge= 1425 | — | .070 | .072 | .072 | .090 | 1.667 | 1.570 |
| 1427 | — | .059 | .060 | .061 | .061 | .073 | 1.321 |
| 1429 | — | .051 | .048 | .046 | .050 | .051 | .870 |
| 1431 | — | .049 | .047 | .044 | .043 | .044 | .045 |
| 1433 | — | .042 | .042 | .042 | .039 | .038 | .038 |
| 1435 | — | .043 | .042 | .038 | .036 | .034 | .033 |
| 1437 | — | .037 | .037 | .033 | .032 | .031 | .029 |
| 1439 | — | .030 | .030 | .029 | .028 | .028 | .027 |
| 1441 | — | .026 | .026 | .026 | .025 | .025 | .025 |



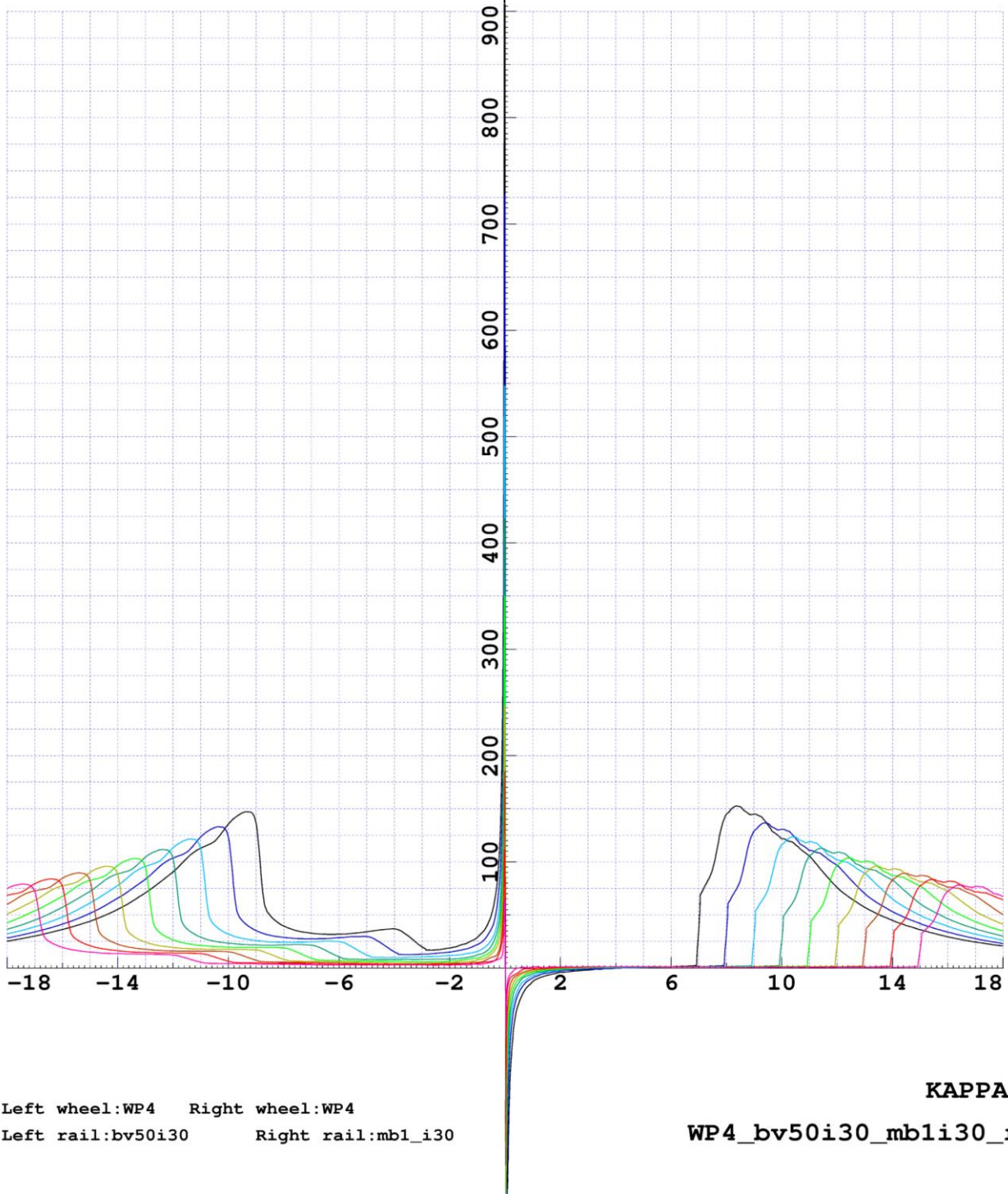
Слика I-0-5. Еквивалентна коничност за точак профила WP4, шине профила BV50 и MB1 за различите ширине колосека

Gauge= 1425 —
 1427 —
 1429 —
 1431 —
 1433 —
 1435 —
 1437 —
 1439 —
 1441 —



Слика I-0-6. Сума контактних углова у функцији бочног помераја осовинског склопа

| Delta_Y= | .1 | .5 | 2 | 3 | 4 | 6 |
|-------------|---------|--------|-------|-------|------|------|
| Gauge= 1425 | -196.85 | -32.92 | -3.98 | -1.70 | -.17 | 1.19 |
| 1427 | -141.24 | -23.09 | -2.63 | -.80 | -.09 | .99 |
| 1429 | -102.23 | -18.33 | -1.80 | -.18 | .39 | 1.09 |
| 1431 | -80.00 | -13.66 | -1.17 | .11 | .69 | 1.02 |
| 1433 | -63.89 | -10.50 | .65 | .32 | .89 | 1.21 |
| 1435 | -44.97 | -7.37 | .17 | .64 | 1.04 | 1.31 |
| 1437 | -34.41 | -5.74 | .11 | .96 | 1.10 | 1.26 |
| 1439 | -17.93 | -3.88 | .83 | .90 | 1.20 | 1.16 |
| 1441 | -11.62 | .12 | 1.01 | 1.20 | 1.05 | 1.06 |



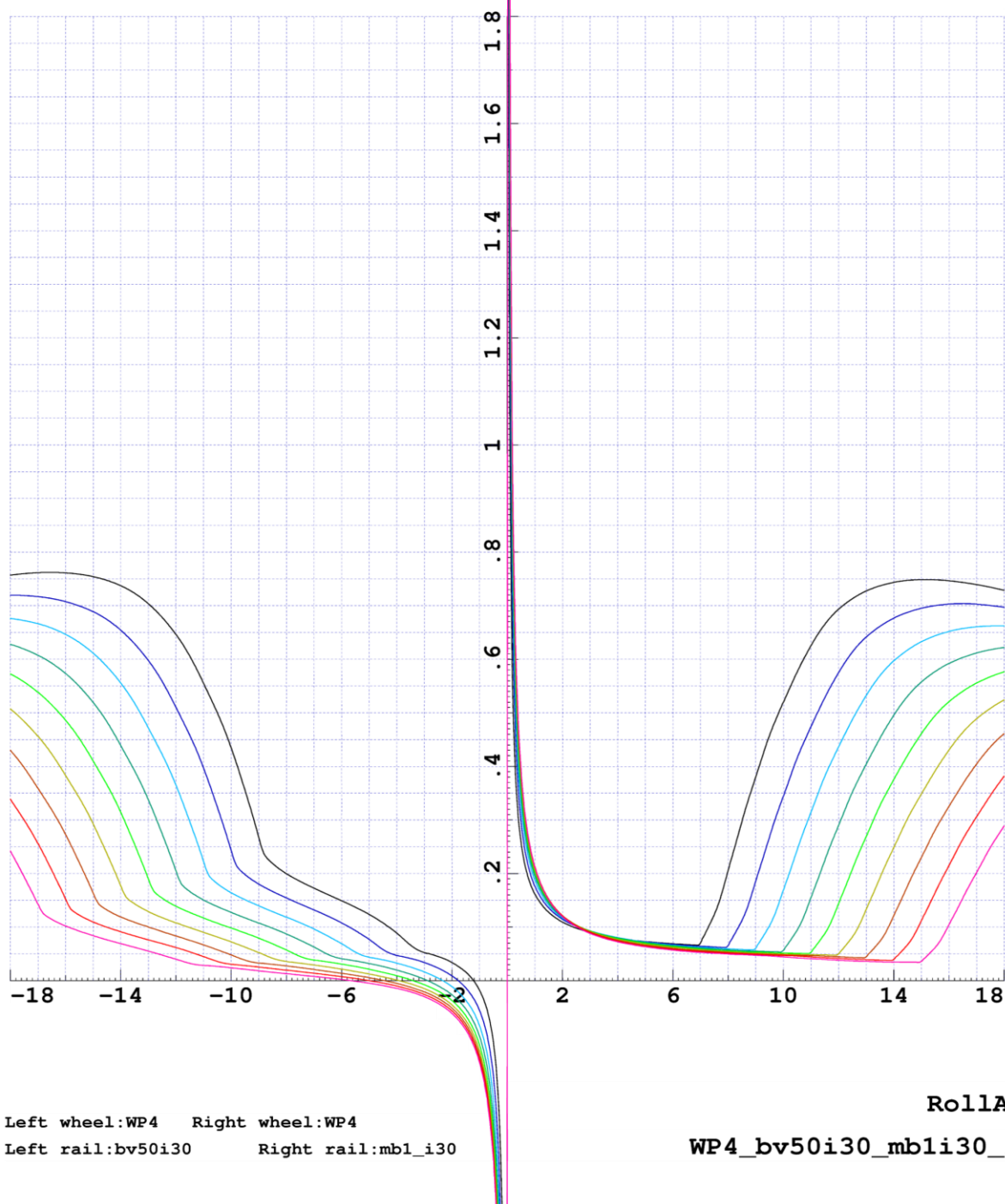
Left wheel:WP4 Right wheel:WP4
 Left rail:bv50i30 Right rail:mb1_i30

KAPPA
 WP4_bv50i30_mb1i30_r_1!

Слика I-0-7. Коэффициент разликe контактних углова у функцији бочног помераја осовинског склопа

GENSYS-KPF.1003

| Delta_Y= | | .1 | .5 | 2 | 3 | 4 | 6 |
|----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Gauge= | 1425 | 1.01 | .26 | .11 | .09 | .08 | .07 |
| | 1427 | 1.26 | .30 | .11 | .09 | .08 | .07 |
| | 1429 | 1.43 | .33 | .12 | .09 | .08 | .07 |
| | 1431 | 1.57 | .35 | .12 | .09 | .08 | .07 |
| | 1433 | 1.66 | .36 | .12 | .09 | .08 | .06 |
| | 1435 | 1.74 | .38 | .12 | .09 | .08 | .06 |
| | 1437 | 1.80 | .39 | .12 | .09 | .08 | .06 |
| | 1439 | 1.84 | .39 | .12 | .09 | .07 | .06 |
| | 1441 | 1.86 | .40 | .12 | .09 | .07 | .06 |



Left wheel:WP4 Right wheel:WP4
 Left rail:bv50i30 Right rail:mb1_i30

RollAC
 WP4_bv50i30_mb1i30_r_1!

Слика I-8. Коэффициент угла котрљања у функцији бочног помераја осовинског склопа

ПРИЛОГ 2

Карактеристике колосека

Класификација колосека према UIC518 и CEN/TC 256 WG 10:

| Alignment | Level | Mean | Speed | Threshold | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-------|-----------|---------|--------|----------|
| Distance | Sigma MAX | Sigma MAX | Gauge | 160. | Level | | |
| 1420203.-1420402. | 0.97 | 2.68 | 1.19 | 5.54 | 1436.31 | QN<1 | |
| 1420403.-1420602. | 1.24 | 3.44 | 1.46 | 5.46 | 1437.27 | 1<QN<2 | Ys Zs |
| 1420603.-1420802. | 1.03 | 2.73 | 0.96 | 2.49 | 1435.98 | 1<QN<2 | Ys |
| 1420803.-1421002. | 1.18 | 2.55 | 0.99 | 2.65 | 1436.21 | 1<QN<2 | Ys |
| 1421003.-1421202. | 1.32 | 3.45 | 1.25 | 3.04 | 1435.69 | 2<QN<3 | Ys |
| 1421203.-1421402. | 0.97 | 2.30 | 0.88 | 2.34 | 1435.21 | QN<1 | |
| 1421403.-1421602. | 1.09 | 2.82 | 0.85 | 2.62 | 1434.41 | 1<QN<2 | Ys |
| 1421603.-1421802. | 1.12 | 3.39 | 1.33 | 4.88 | 1434.80 | 1<QN<2 | Ys |
| 1421803.-1422002. | 1.43 | 4.18 | 1.35 | 6.10 | 1435.40 | 2<QN<3 | Ys |
| 1422003.-1422202. | 1.25 | 2.89 | 1.05 | 2.78 | 1434.40 | 1<QN<2 | Ys |
| 1422203.-1422402. | 1.06 | 2.67 | 0.93 | 2.26 | 1434.63 | 1<QN<2 | Ys |
| 1422403.-1422602. | 1.47 | 4.17 | 2.71 | 11.82 | 1435.16 | 2<QN<3 | Ys Zs Zm |
| 1422603.-1422802. | 1.17 | 2.95 | 1.09 | 3.36 | 1435.59 | 1<QN<2 | Ys |
| 1422803.-1423002. | 1.05 | 2.85 | 1.30 | 5.15 | 1435.38 | 1<QN<2 | Ys |
| 1423003.-1423202. | 0.92 | 3.12 | 2.16 | 6.32 | 1435.14 | 2<QN<3 | Zs |
| 1423203.-1423402. | 0.69 | 3.67 | 0.46 | 1.70 | 1438.13 | QN<1 | |
| 1423403.-1423602. | 0.62 | 2.69 | 0.61 | 1.70 | 1438.12 | QN<1 | |
| 1423603.-1423802. | 0.72 | 1.85 | 1.25 | 5.56 | 1439.18 | QN<1 | |
| 1423803.-1424002. | 0.98 | 3.01 | 1.95 | 7.69 | 1439.03 | 2<QN<3 | Zs |
| 1424003.-1424202. | 1.36 | 4.13 | 2.67 | 9.83 | 1438.34 | 2<QN<3 | Ys Zs |
| 1424203.-1424402. | 1.10 | 2.60 | 1.32 | 3.91 | 1438.73 | 1<QN<2 | Ys |
| 1424403.-1424602. | 1.10 | 3.14 | 0.89 | 2.72 | 1438.70 | 1<QN<2 | Ys |
| 1424603.-1424802. | 1.11 | 2.68 | 0.92 | 2.15 | 1437.83 | 1<QN<2 | Ys |
| 1424803.-1425002. | 1.30 | 3.52 | 0.96 | 3.32 | 1437.19 | 2<QN<3 | Ys |
| 1425003.-1425202. | 1.07 | 3.53 | 1.04 | 2.72 | 1442.26 | 1<QN<2 | Ys |
| 1425203.-1425402. | 0.97 | 2.83 | 1.18 | 5.00 | 1442.24 | QN<1 | |
| 1425403.-1425602. | 1.40 | 5.42 | 1.54 | 4.45 | 1439.40 | 2<QN<3 | Ys |
| 1425603.-1425802. | 1.29 | 3.31 | 1.17 | 5.15 | 1438.49 | 1<QN<2 | Ys |
| 1425803.-1426002. | 1.80 | 5.43 | 1.33 | 5.09 | 1441.42 | 2<QN<3 | Ys |
| 1426003.-1426202. | 1.02 | 3.12 | 1.05 | 2.90 | 1437.31 | 1<QN<2 | Ys |
| 1426203.-1426402. | 1.08 | 2.51 | 1.22 | 4.28 | 1437.03 | 1<QN<2 | Ys |
| 1426403.-1426602. | 1.00 | 2.13 | 1.68 | 4.53 | 1438.29 | 1<QN<2 | Zs |
| 1426603.-1426802. | 1.24 | 3.56 | 2.09 | 8.54 | 1437.17 | 2<QN<3 | Zs |
| 1426803.-1427002. | 1.47 | 3.53 | 1.66 | 3.82 | 1438.05 | 2<QN<3 | Ys |
| 1427003.-1427202. | 1.24 | 2.86 | 1.28 | 3.83 | 1438.06 | 1<QN<2 | Ys |
| 1427203.-1427402. | 1.19 | 3.19 | 1.11 | 3.21 | 1437.97 | 1<QN<2 | Ys |
| 1427403.-1427602. | 1.13 | 2.66 | 1.69 | 7.82 | 1438.88 | 1<QN<2 | Ys Zs Zm |
| 1427603.-1427802. | 1.29 | 3.02 | 1.32 | 4.53 | 1440.70 | 1<QN<2 | Ys |
| 1427803.-1428002. | 1.24 | 3.26 | 1.41 | 3.50 | 1437.64 | 1<QN<2 | Ys Zs |
| 1428003.-1428202. | 1.47 | 3.51 | 1.34 | 3.81 | 1441.43 | 2<QN<3 | Ys |
| 1428203.-1428402. | 0.99 | 3.49 | 0.72 | 1.95 | 1445.41 | QN<1 | |
| 1428403.-1428602. | 1.33 | 4.97 | 1.07 | 3.27 | 1440.75 | 2<QN<3 | Ys |
| 1428603.-1428802. | 1.13 | 2.80 | 0.78 | 2.53 | 1440.82 | 1<QN<2 | Ys |
| 1428803.-1429002. | 1.21 | 3.66 | 1.61 | 6.26 | 1440.21 | 1<QN<2 | Ys Zs Zm |
| 1429003.-1429202. | 0.98 | 2.57 | 0.65 | 2.35 | 1441.23 | QN<1 | |
| 1429203.-1429402. | 1.24 | 2.90 | 1.28 | 4.10 | 1443.30 | 1<QN<2 | Ys |
| 1429403.-1429602. | 0.98 | 2.76 | 1.28 | 3.07 | 1441.49 | QN<1 | |
| 1429603.-1429802. | 1.31 | 3.47 | 1.40 | 4.08 | 1440.39 | 2<QN<3 | Ys |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|-------|---------|--------|----|----|----|
| 1429803.-1430002. | 1.36 | 3.25 | 1.26 | 2.94 | 1439.40 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1430003.-1430202. | 1.29 | 3.44 | 1.40 | 6.67 | 1442.47 | 1<QN<2 | Ys | Zs | Zm |
| 1430203.-1430402. | 1.22 | 3.37 | 1.30 | 4.09 | 1439.17 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1430403.-1430602. | 1.37 | 3.57 | 1.61 | 4.56 | 1436.60 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1430603.-1430802. | 0.99 | 2.42 | 1.45 | 4.51 | 1440.01 | 1<QN<2 | | Zs | |
| 1430803.-1431002. | 1.19 | 2.71 | 1.03 | 2.97 | 1443.24 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1431003.-1431202. | 1.32 | 2.70 | 1.37 | 4.38 | 1444.27 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1431203.-1431402. | 1.73 | 6.33 | 1.72 | 4.05 | 1437.83 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1431403.-1431602. | 1.30 | 3.43 | 1.80 | 6.02 | 1440.09 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1431603.-1431802. | 1.01 | 2.80 | 1.34 | 3.70 | 1444.89 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1431803.-1432002. | 0.96 | 2.78 | 1.50 | 4.01 | 1446.36 | 1<QN<2 | | Zs | |
| 1432003.-1432202. | 1.62 | 5.61 | 1.72 | 4.35 | 1440.02 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1432203.-1432402. | 1.33 | 3.16 | 1.58 | 4.17 | 1436.78 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1432403.-1432602. | 1.11 | 3.62 | 1.12 | 3.02 | 1436.20 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1432603.-1432802. | 1.22 | 2.98 | 1.85 | 6.88 | 1442.62 | 2<QN<3 | | Zs | |
| 1432803.-1433002. | 2.12 | 5.23 | 2.56 | 9.18 | 1436.64 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1433003.-1433202. | 1.14 | 3.59 | 1.40 | 3.89 | 1438.11 | 1<QN<2 | Ys | Zs | |
| 1433203.-1433402. | 0.99 | 2.71 | 1.39 | 3.41 | 1438.22 | QN<1 | | | |
| 1433403.-1433602. | 1.71 | 7.21 | 2.69 | 8.93 | 1438.69 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1433603.-1433802. | 1.12 | 2.70 | 1.72 | 6.04 | 1437.32 | 2<QN<3 | | Zs | |
| 1433803.-1434002. | 1.35 | 4.67 | 1.37 | 4.81 | 1445.56 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1434003.-1434202. | 1.28 | 3.28 | 0.87 | 2.13 | 1446.96 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1434203.-1434402. | 1.17 | 4.04 | 1.65 | 9.95 | 1438.05 | 1<QN<2 | Ys | Zs | Zm |
| 1434403.-1434602. | 1.44 | 4.70 | 2.06 | 11.46 | 1440.46 | 2<QN<3 | Ys | Zs | Zm |
| 1434603.-1434802. | 1.07 | 2.44 | 1.51 | 4.08 | 1443.48 | 1<QN<2 | Ys | Zs | |
| 1434803.-1435002. | 1.56 | 5.22 | 1.55 | 4.40 | 1437.70 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1435003.-1435202. | 1.19 | 3.21 | 1.44 | 3.81 | 1439.97 | 1<QN<2 | Ys | Zs | |
| 1435203.-1435402. | 1.61 | 4.12 | 1.88 | 7.31 | 1437.80 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1435403.-1435602. | 1.59 | 4.42 | 1.43 | 4.43 | 1435.53 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1435603.-1435802. | 1.44 | 3.32 | 1.72 | 4.43 | 1435.28 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1435803.-1436002. | 1.64 | 3.98 | 2.53 | 6.96 | 1435.89 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1436003.-1436202. | 1.18 | 2.90 | 1.46 | 6.17 | 1441.25 | 1<QN<2 | Ys | Zs | Zm |
| 1436203.-1436402. | 1.82 | 5.67 | 1.50 | 4.61 | 1436.34 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1436403.-1436602. | 1.16 | 3.56 | 1.15 | 2.93 | 1434.98 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1436603.-1436802. | 1.07 | 2.99 | 1.17 | 4.24 | 1434.88 | 1<QN<2 | Ys | | |
| 1436803.-1437002. | 1.29 | 3.10 | 1.46 | 4.70 | 1434.28 | 1<QN<2 | Ys | Zs | |
| 1437003.-1437202. | 1.34 | 3.27 | 1.68 | 4.67 | 1435.00 | 2<QN<3 | Ys | | |
| 1437203.-1437402. | 1.37 | 4.04 | 1.77 | 5.55 | 1434.58 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |
| 1437403.-1437602. | 1.74 | 3.94 | 2.29 | 7.71 | 1434.49 | 2<QN<3 | Ys | Zs | |

Укупно:

1420203.-1437702. 1.27 7.21 1.49 11.82 1438.59

Укупно за целу трасу

QN<1 Секције са добрим квалитетом колосека = 11.5 % трба да буде > 50%
1<QN<2 Секције планиране за редовно одржавање = 47.1 % трба да буде < 40%
2<QN<3 Секције планиране за хитне поправке = 41.4 % трба да буде < 10%
3<QN Секције које треба одстарнити из анализе = 0.0 % трба да буде = 0%

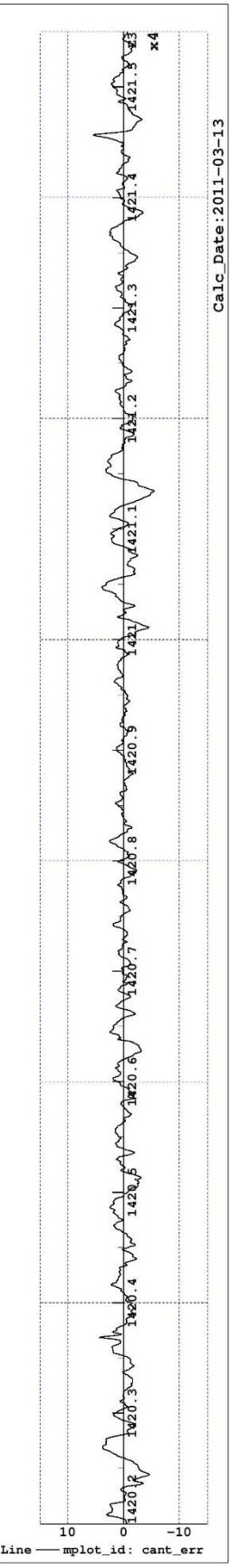
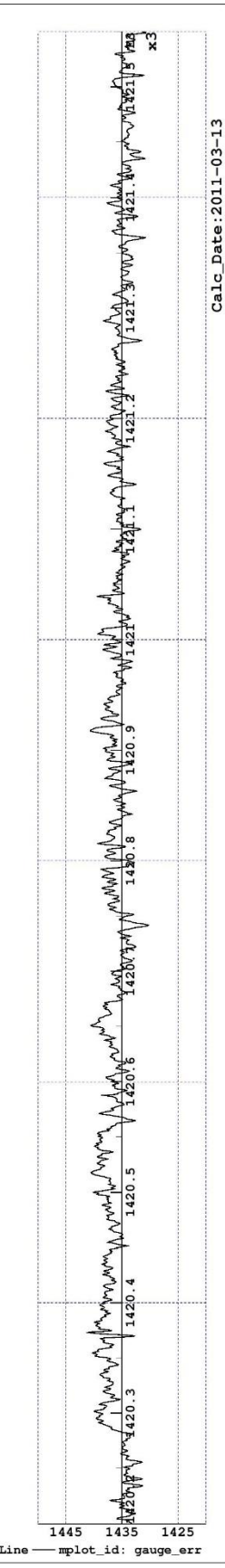
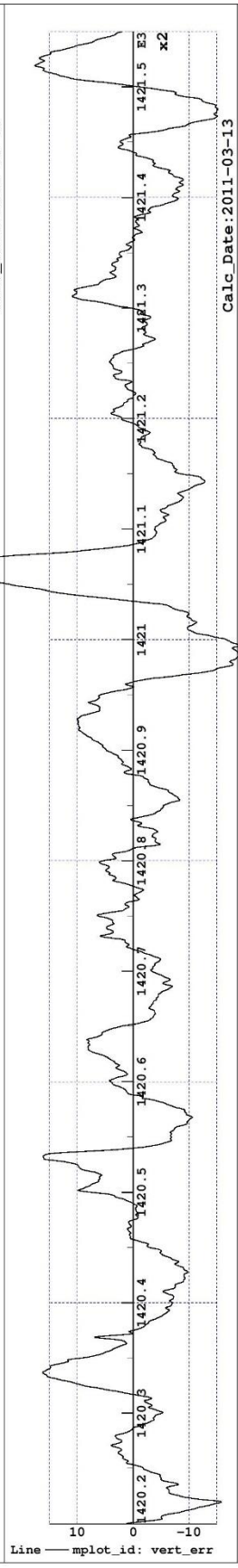
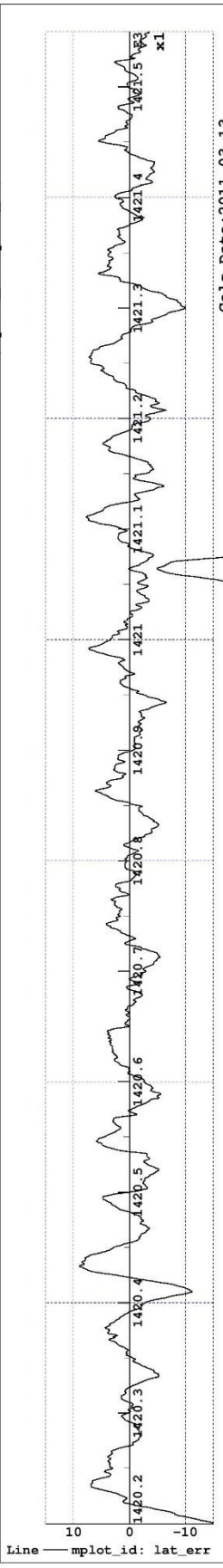
Табела MAX вредности према CEN/TC 256 WG 10

| Max Speed | Alignment | | | Level | | |
|-----------|-----------|------|------|-------|------|------|
| | QN1 | QN2 | QN3 | QN1 | QN2 | QN3 |
| 80 | 12.0 | 14.0 | 18.3 | 12.0 | 16.0 | 20.8 |
| 120 | 8.0 | 10.0 | 13.0 | 8.0 | 12.0 | 15.6 |
| 160 | 6.0 | 8.0 | 10.4 | 6.0 | 10.0 | 13.0 |
| 200 | 5.0 | 7.0 | 9.1 | 5.0 | 9.0 | 11.7 |
| 300 | 4.0 | 6.0 | 7.8 | 4.0 | 8.0 | 10.4 |

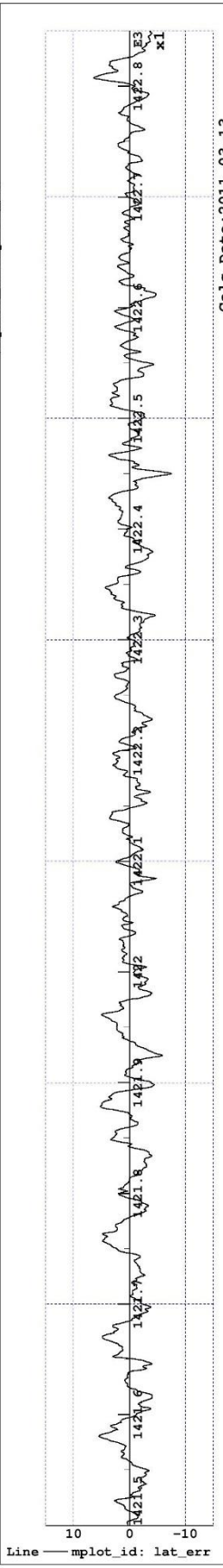
Табела RMS вредности према CEN/TC 256 WG 10

| Max Speed | Alignment | | Level | |
|-----------|-----------|-----|-------|-----|
| | QN1 | QN2 | QN1 | QN2 |
| 80 | 1.5 | 1.8 | 2.3 | 2.6 |
| 120 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.1 |
| 160 | 1.0 | 1.3 | 1.4 | 1.7 |
| 200 | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.5 |
| 300 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 1.3 |

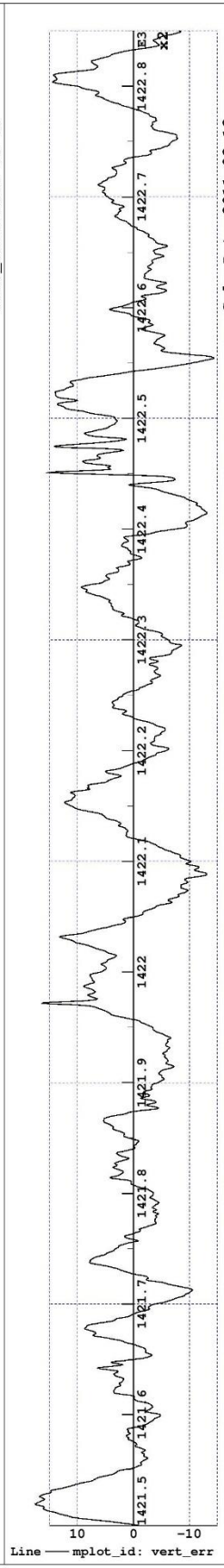
Track irregularities Section 1 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



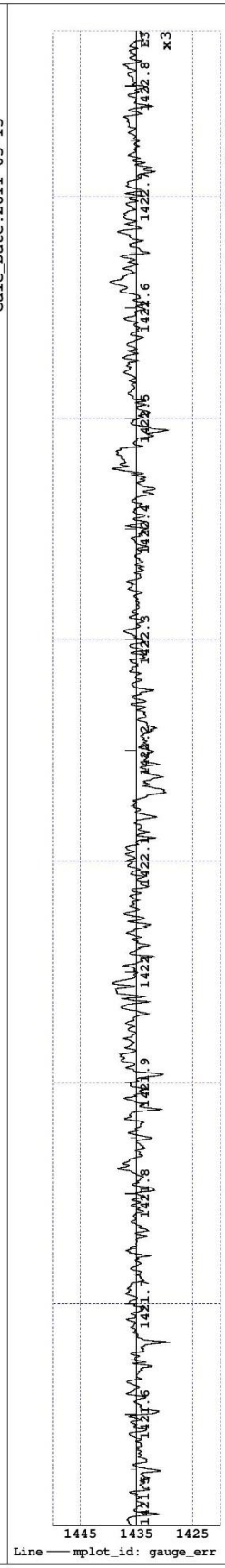
Track irregularities Section 2 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



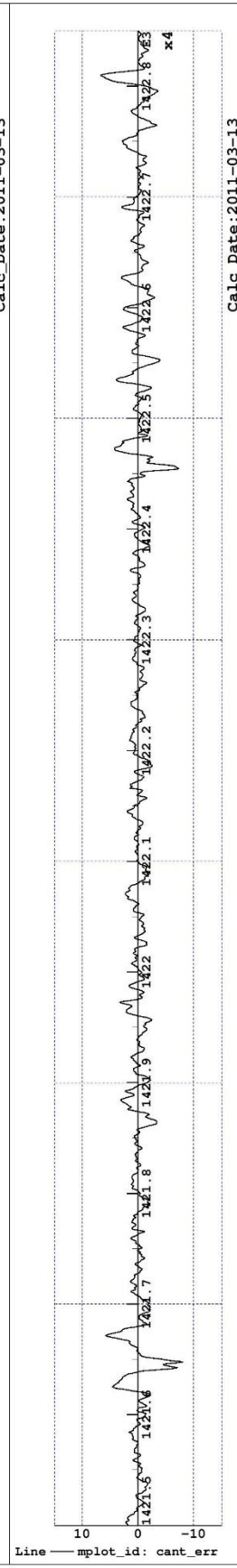
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13



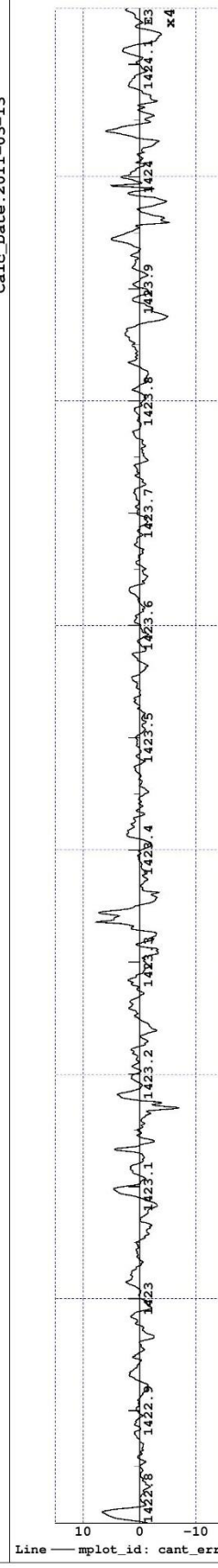
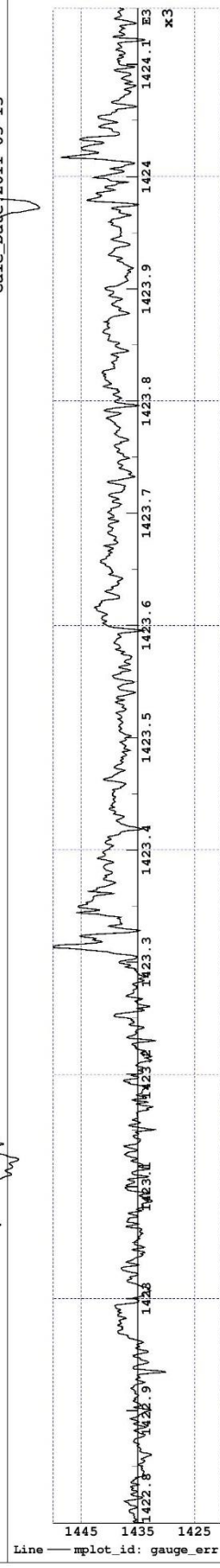
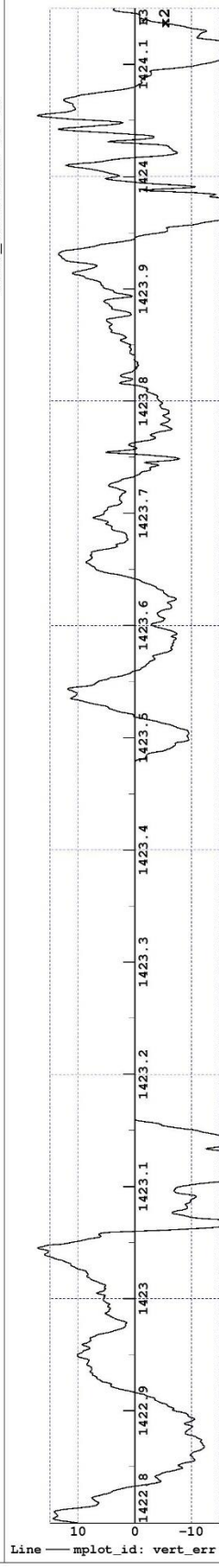
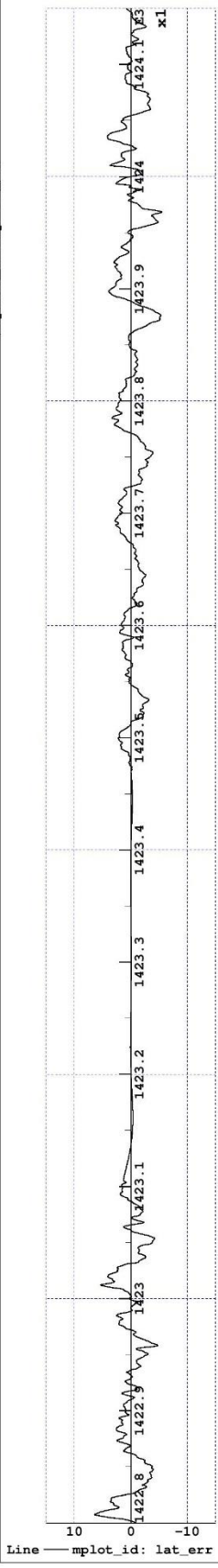
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

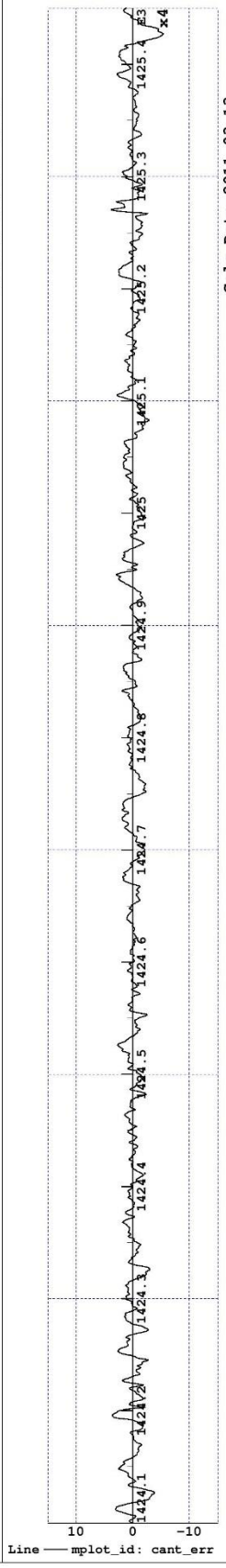
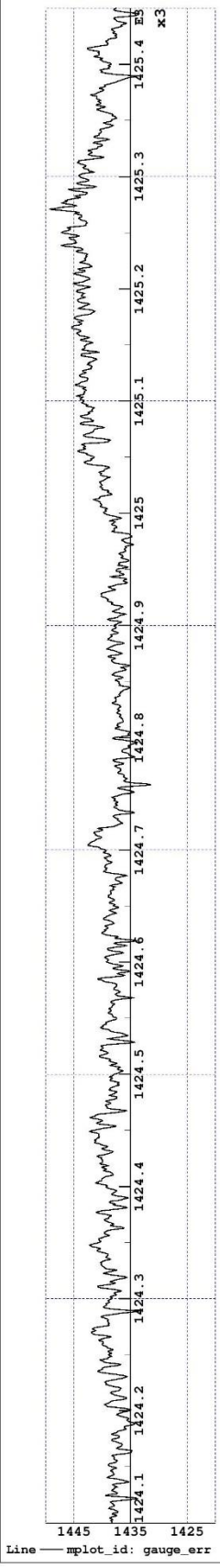
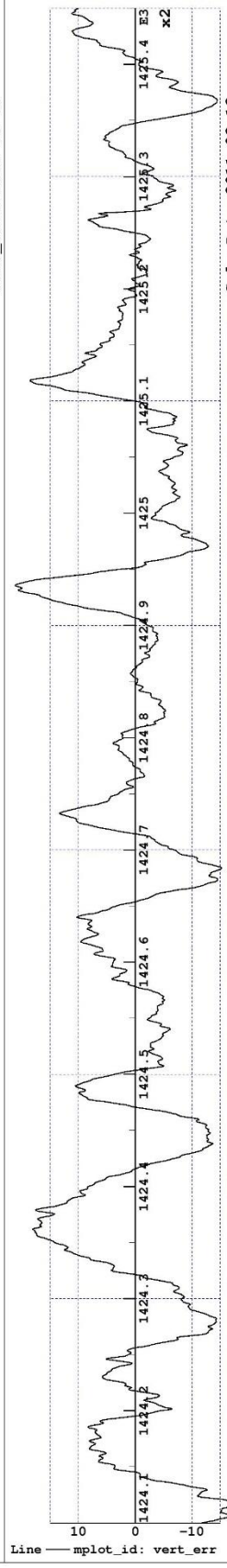
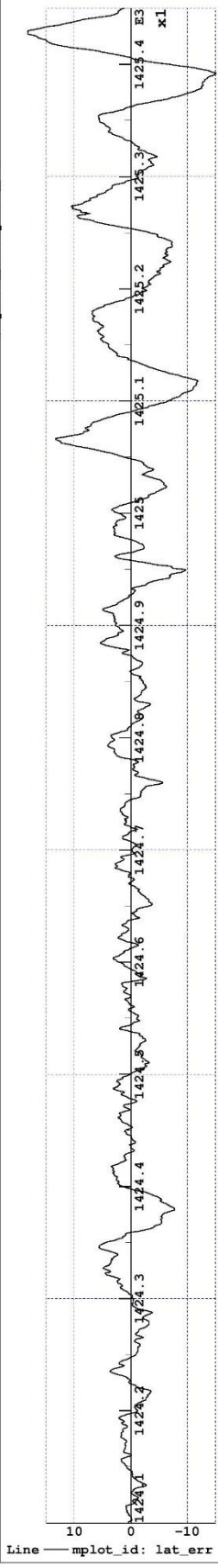
Track irregularities Section 3 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
 Plot Date: 2011-03-13
 Plot Time: 20.142
 Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
 Mplot_ID:mplot_id



Track irregularities Section 4 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

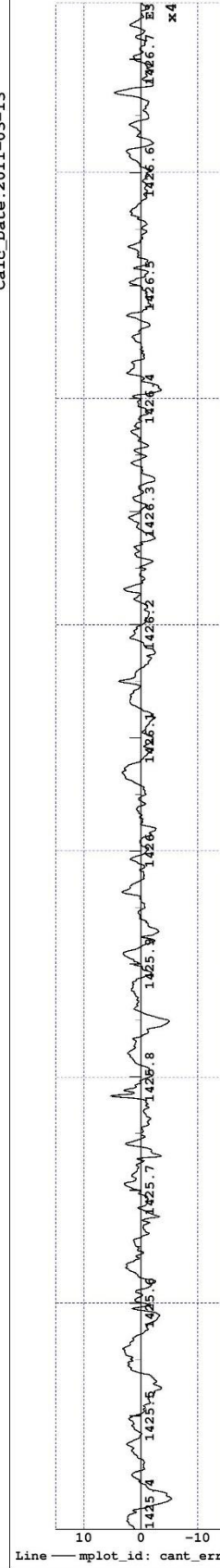
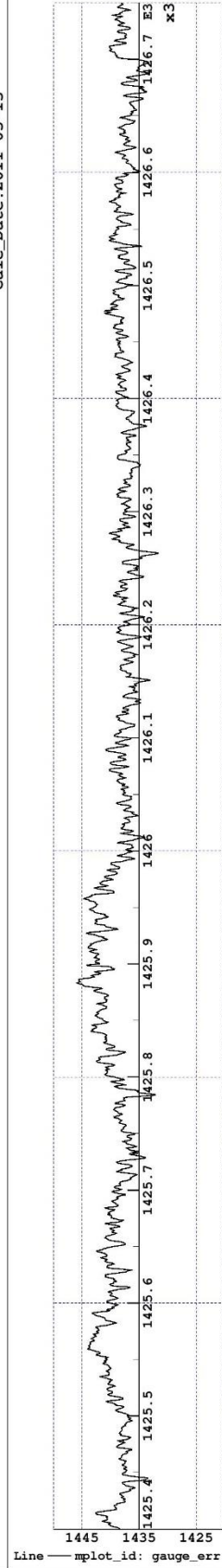
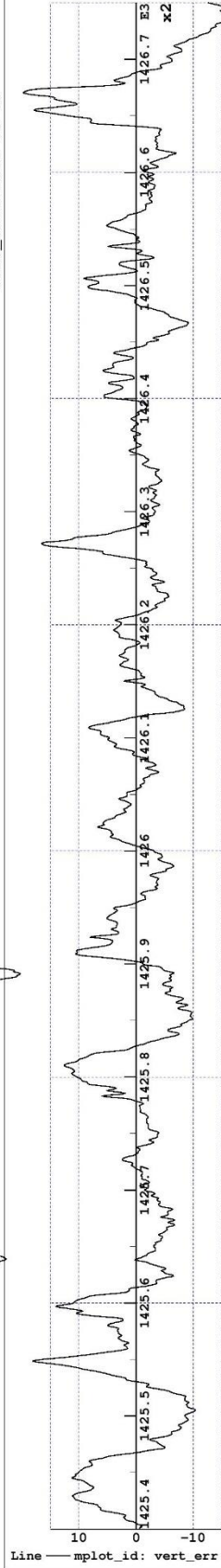
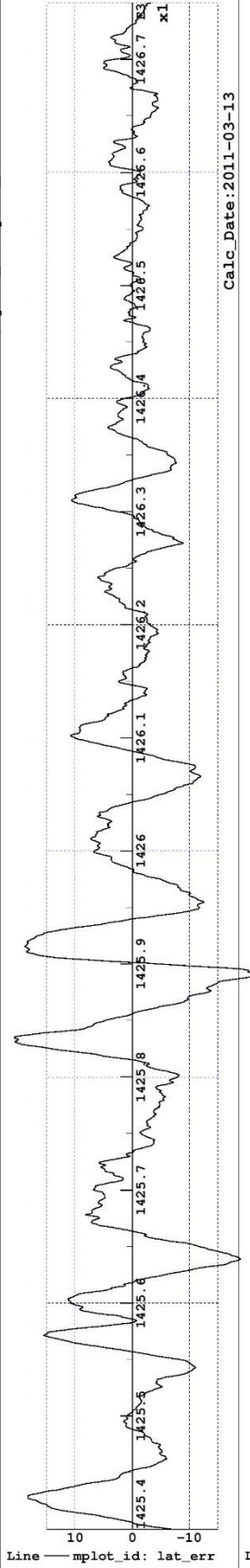
Gensys Mplot.1009 Page: 4
 Plot Date: 2011-03-13
 Plot Time: 20.142
 Plotfile: %\$erc_strix_track2_track_plot.mplotf
 Mplot_ID:mplot_id



Track irregularities Section 5 (14)

Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

GenSys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

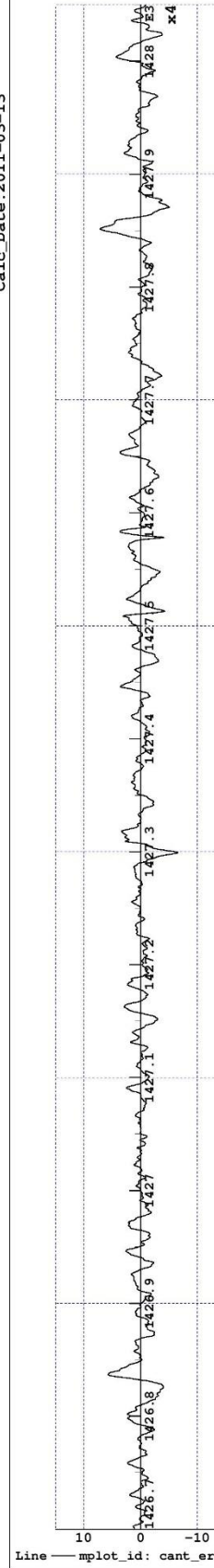
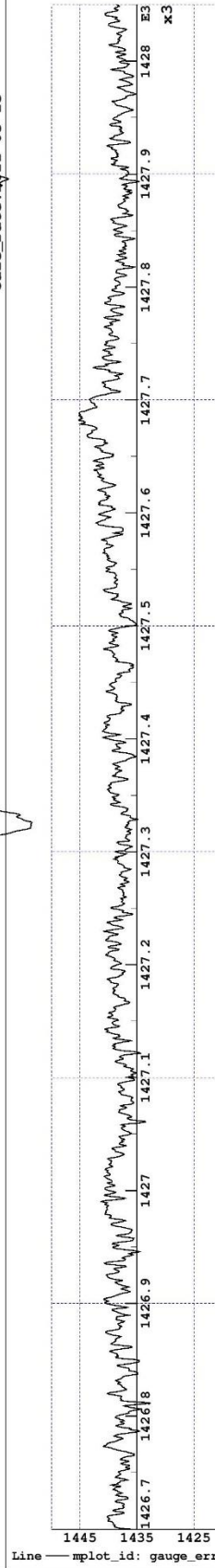
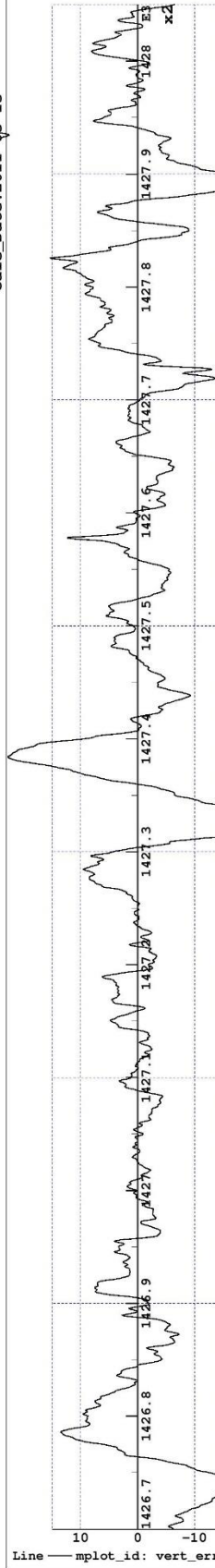
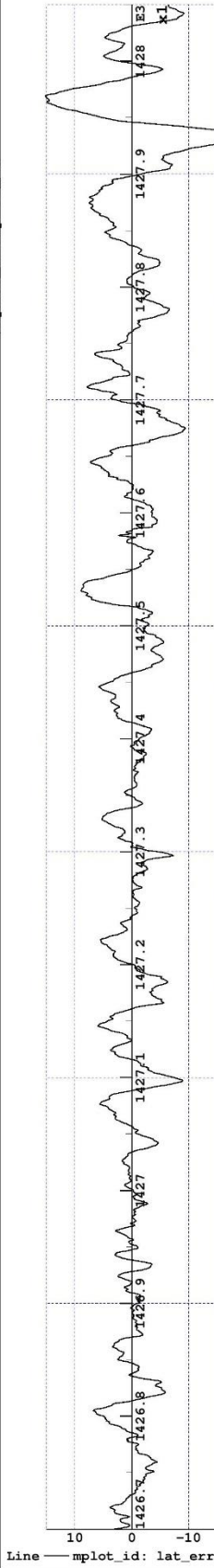


Track irregularities Section 6 (14)

Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$erc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

Page: 6

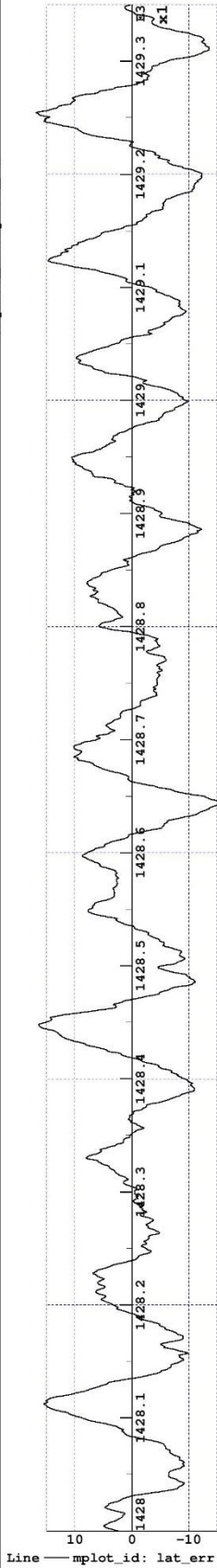


Track irregularities Section 7 (14)

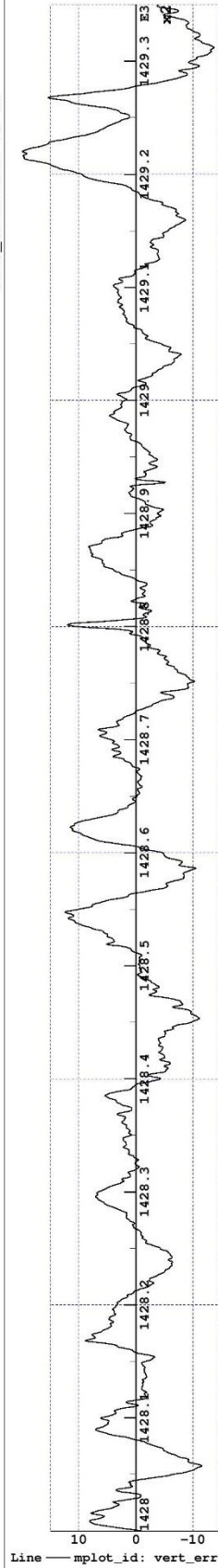
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

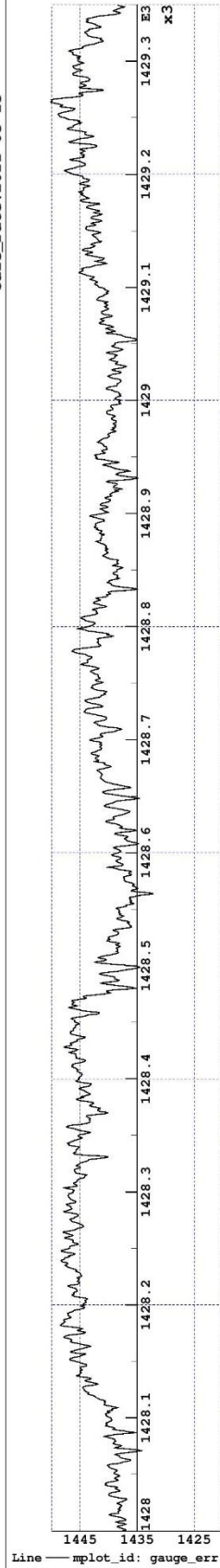
Page: 7



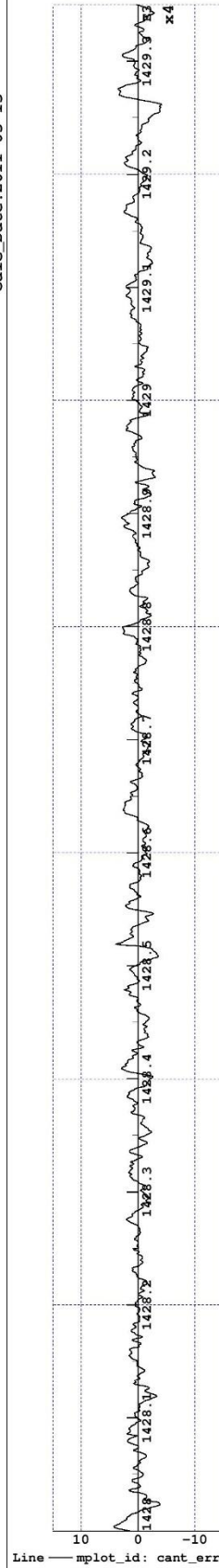
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13



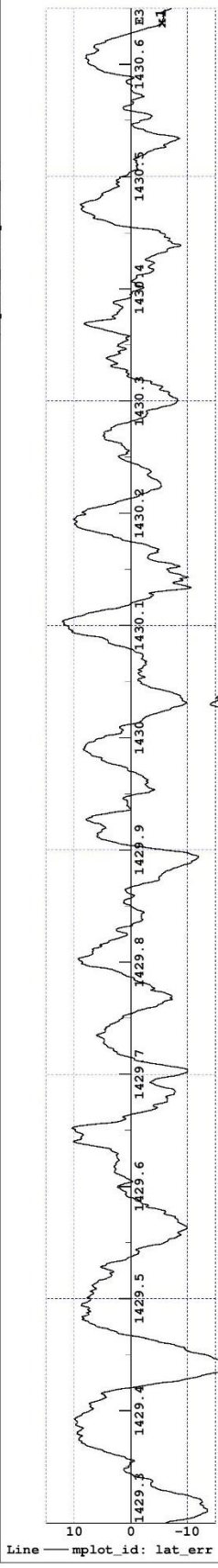
Calc_Date:2011-03-13



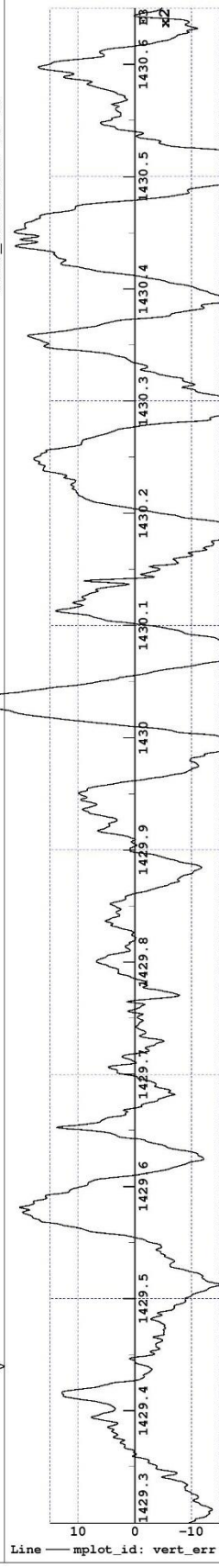
Calc_Date:2011-03-13

Track irregularities Section 8 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

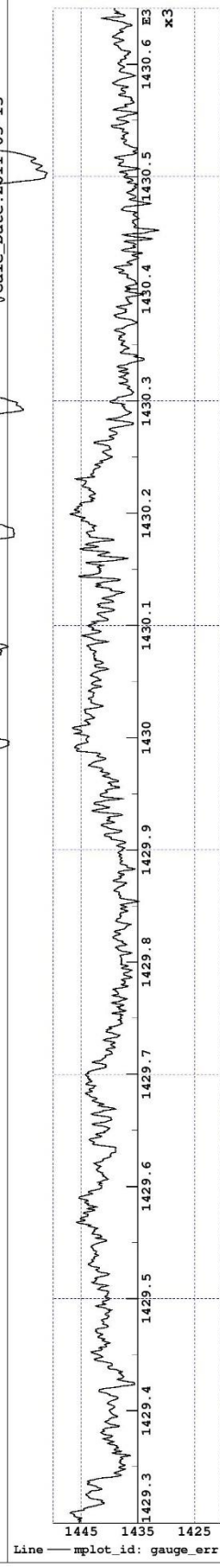
Gensys Mplot.1009 Page:8
 Plot Date: 2011-03-13
 Plot Time: 20.142
 Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
 Mplot_ID:mplot_id



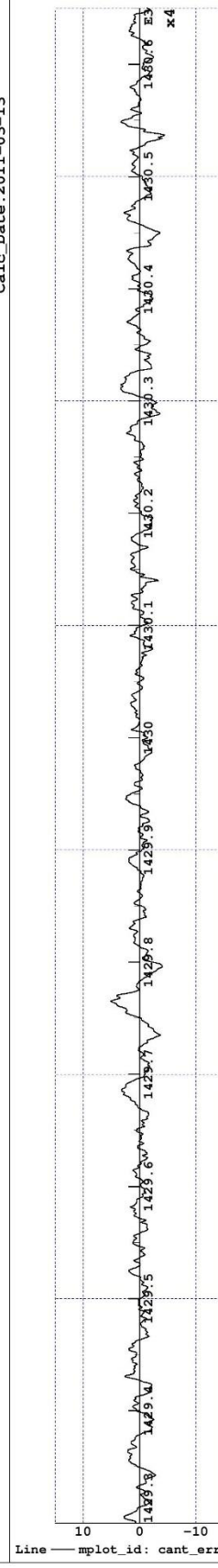
Calc Date:2011-03-13



Calc Date:2011-03-13



Calc Date:2011-03-13



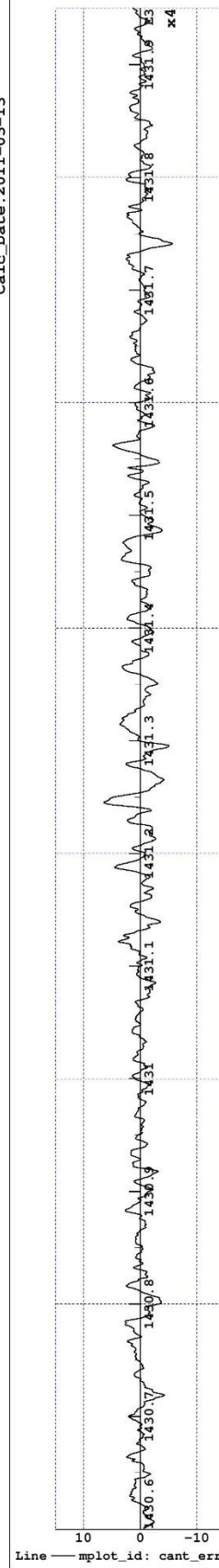
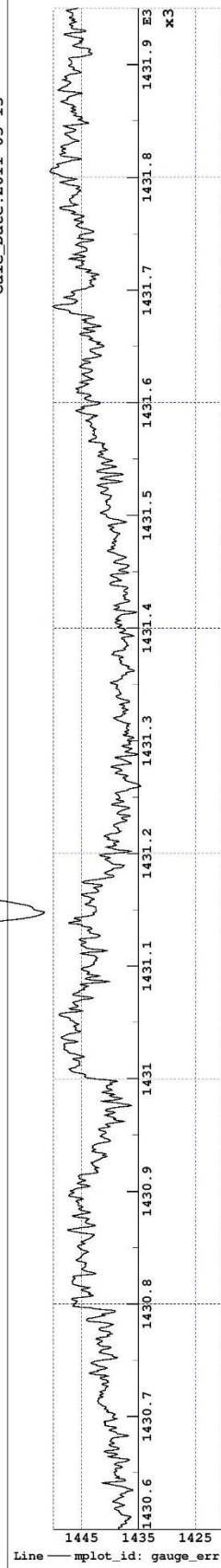
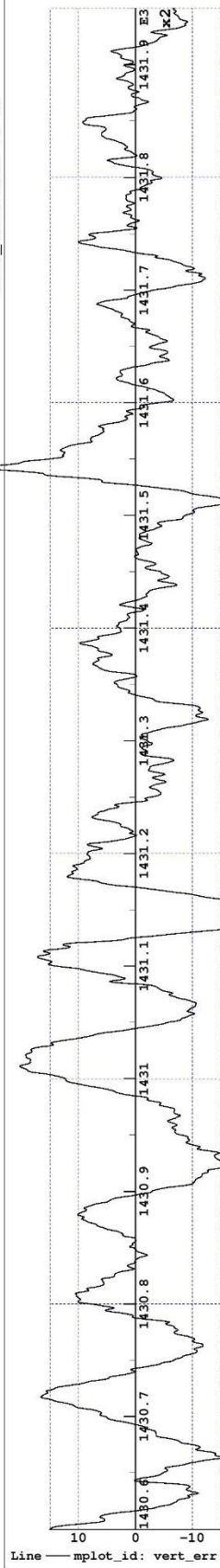
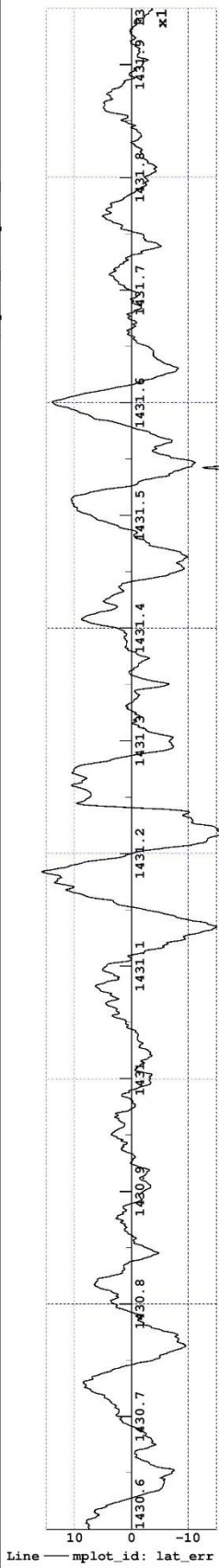
Calc Date:2011-03-13

Track irregularities Section 9 (14)

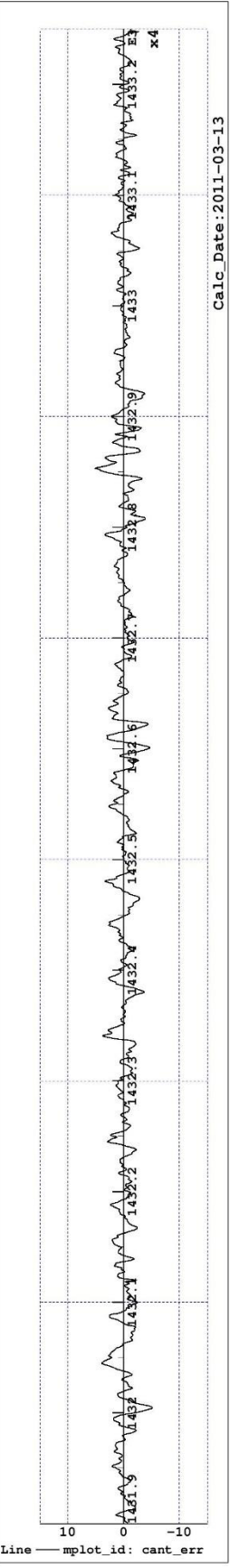
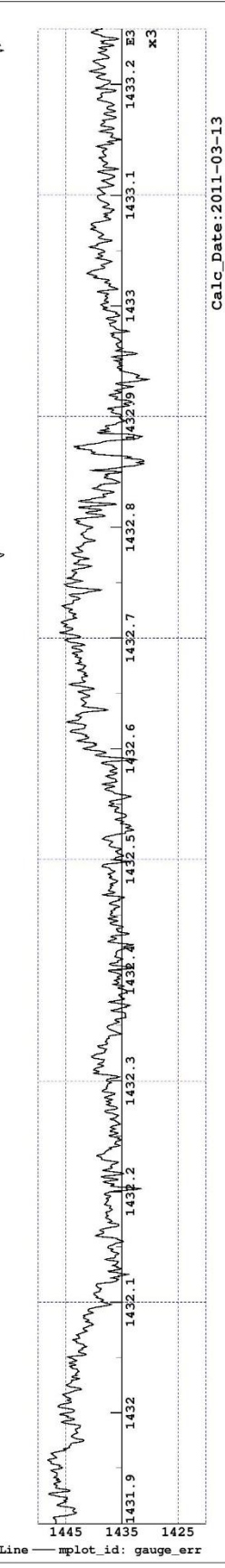
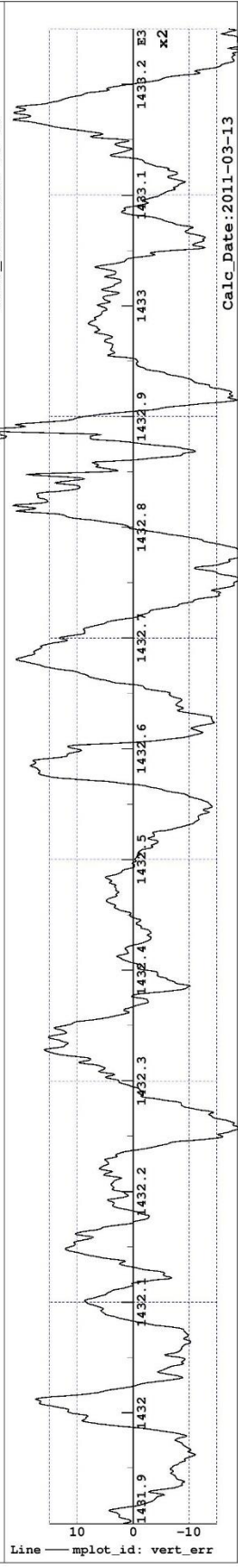
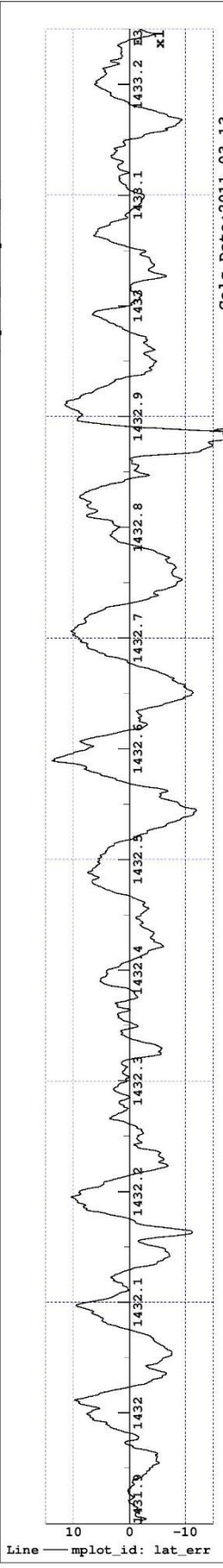
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$erc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

Page:9



Track irregularities Section 10 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

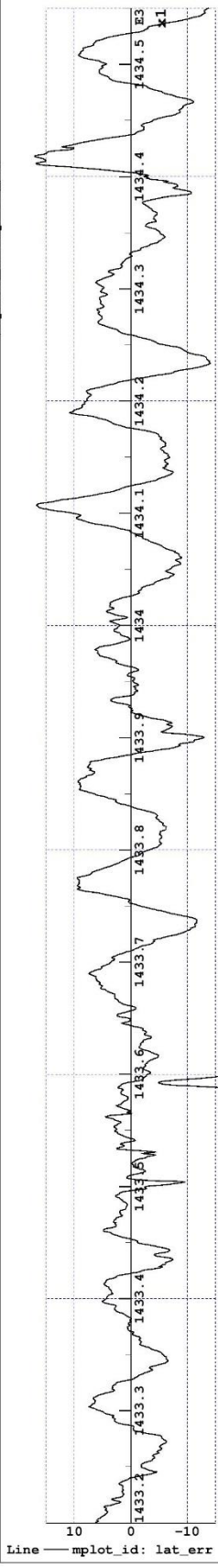


Track irregularities Section 11 (14)

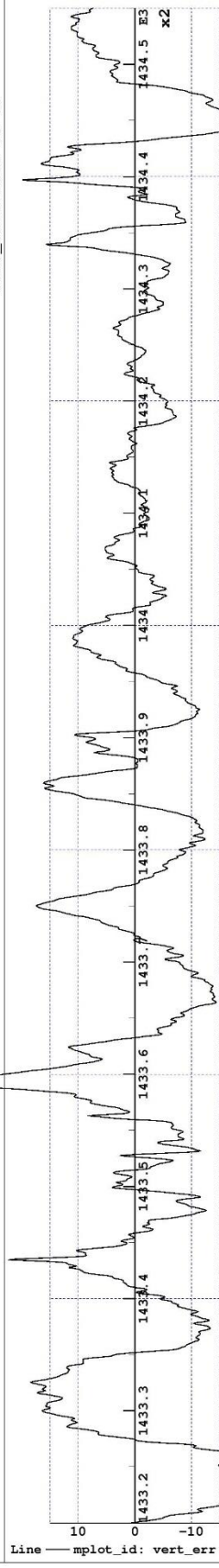
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

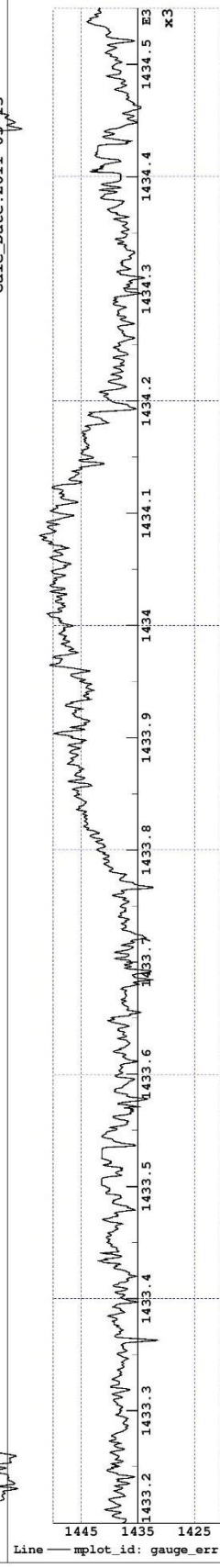
Page:11



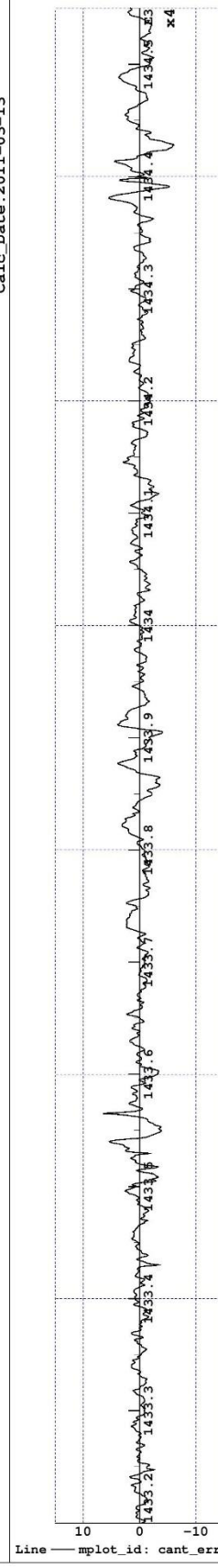
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

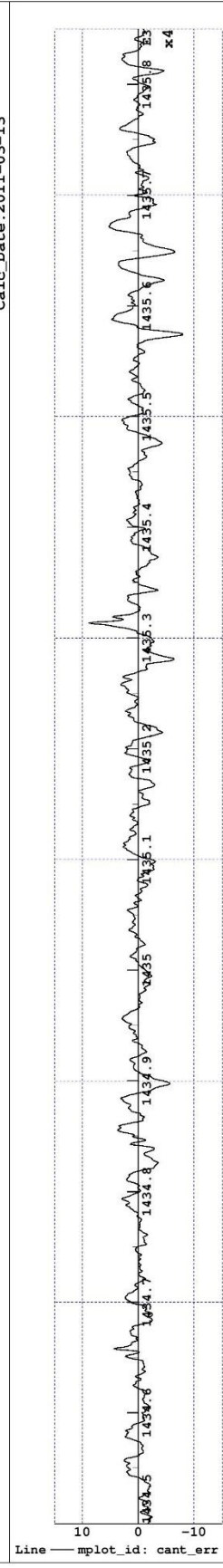
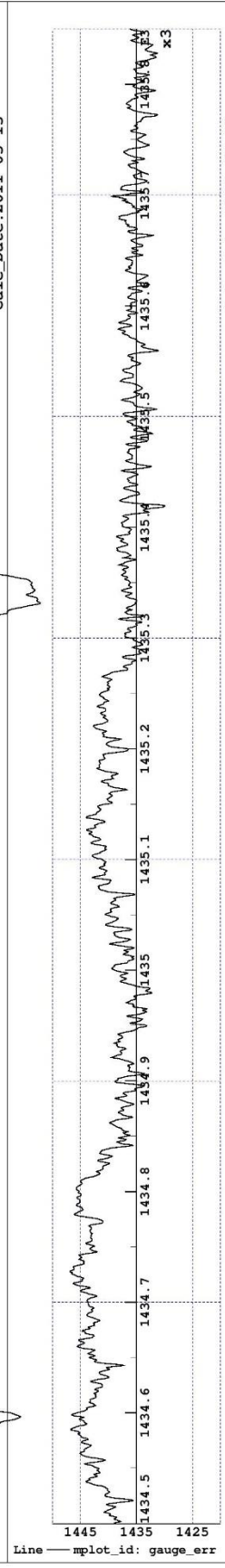
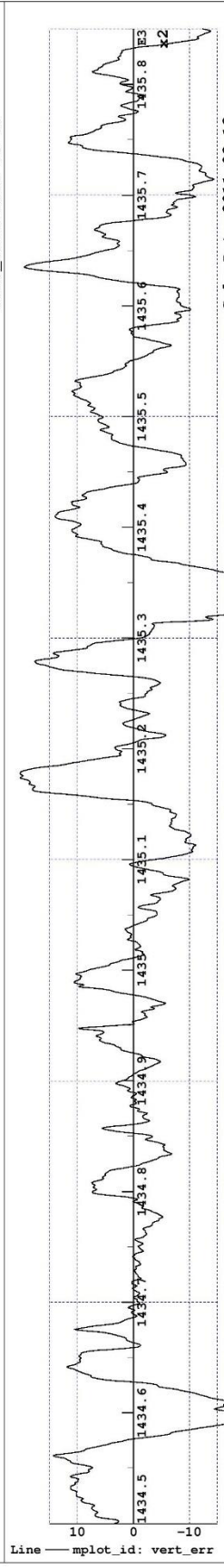
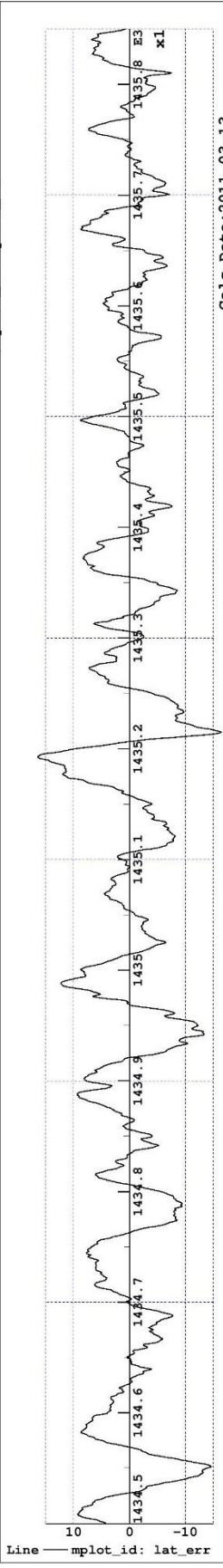


Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

Track irregularities Section 12 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

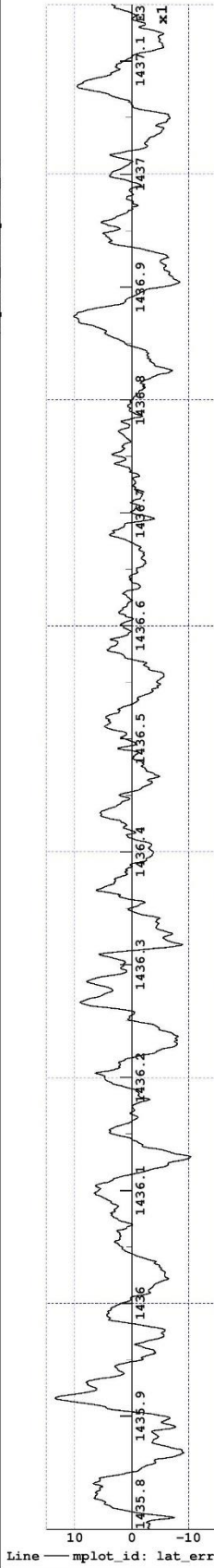


Track irregularities Section 13(14)

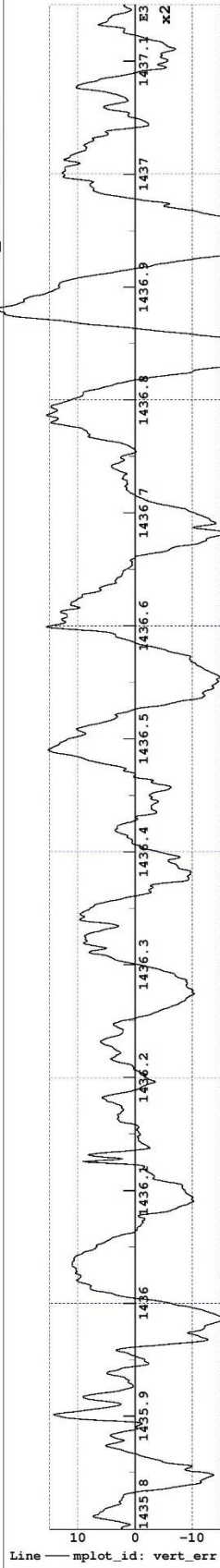
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$erc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

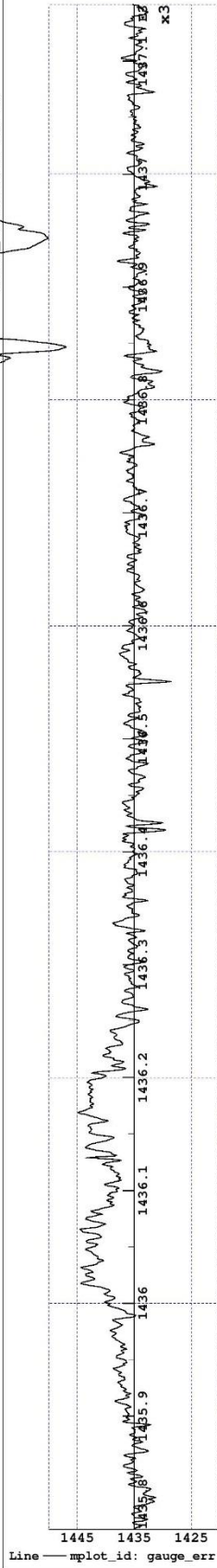
Page:13



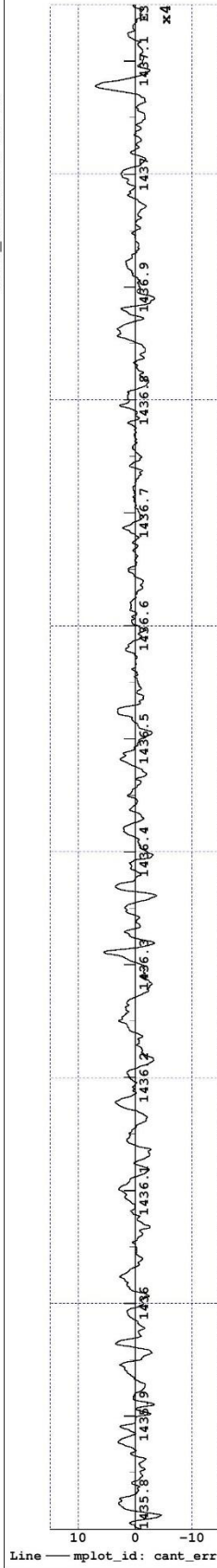
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

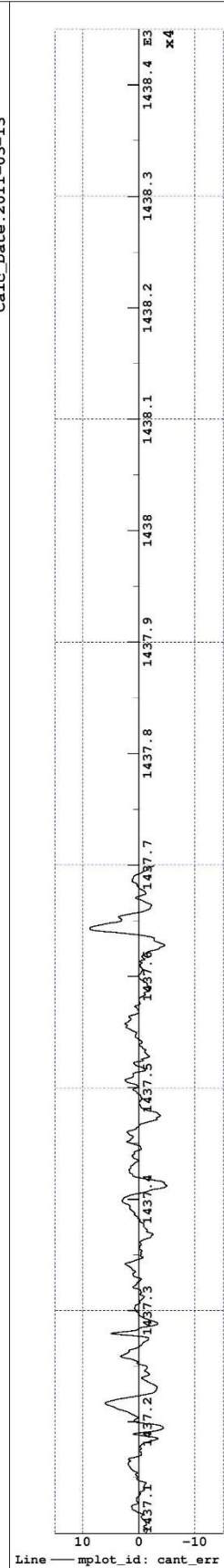
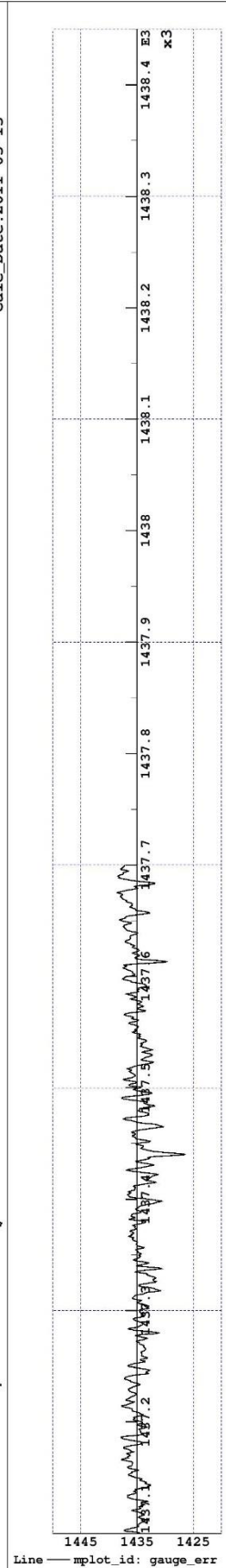
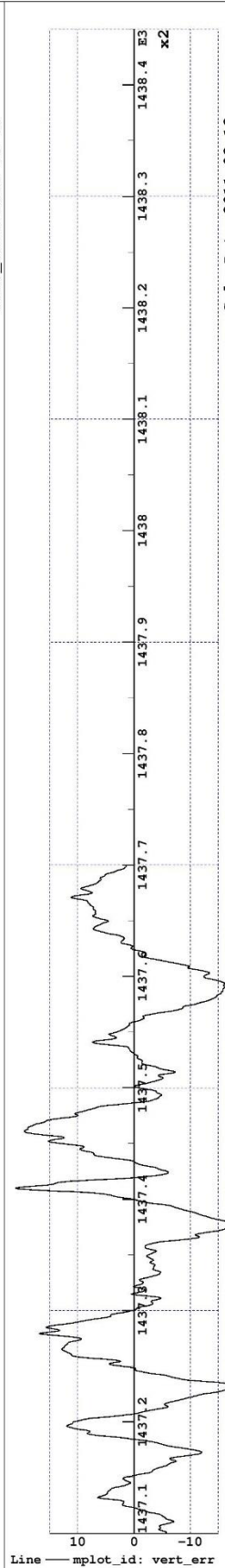
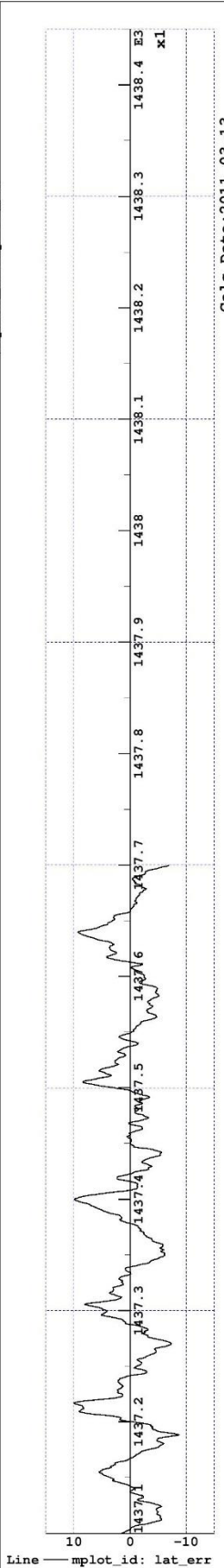


Calc_Date:2011-03-13

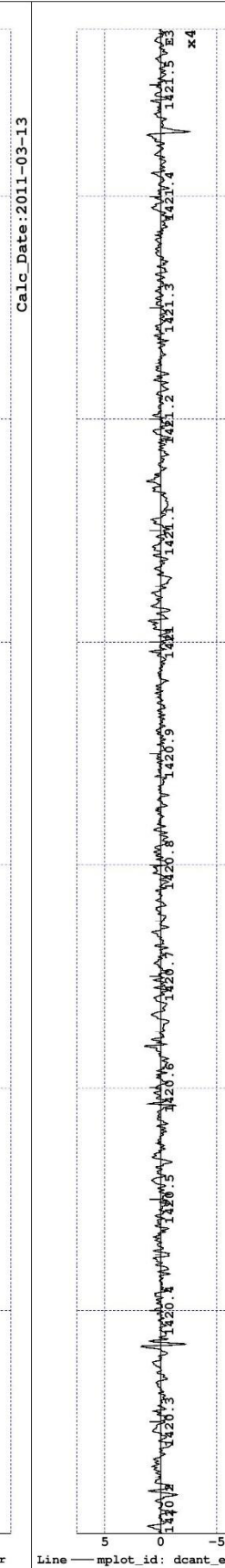
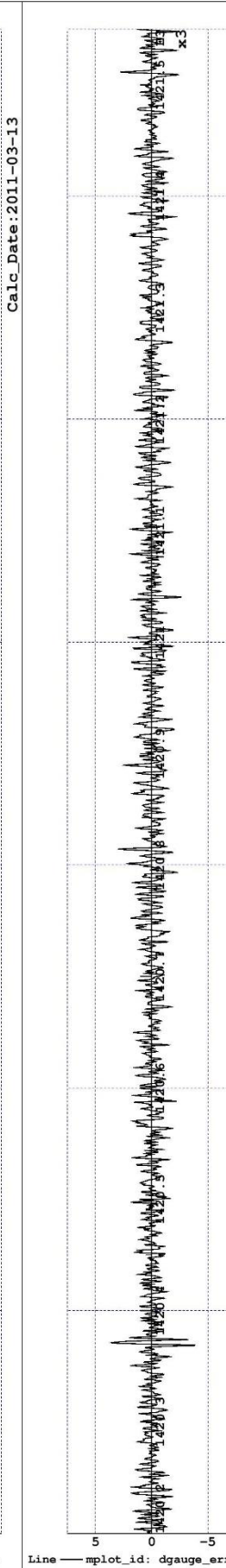
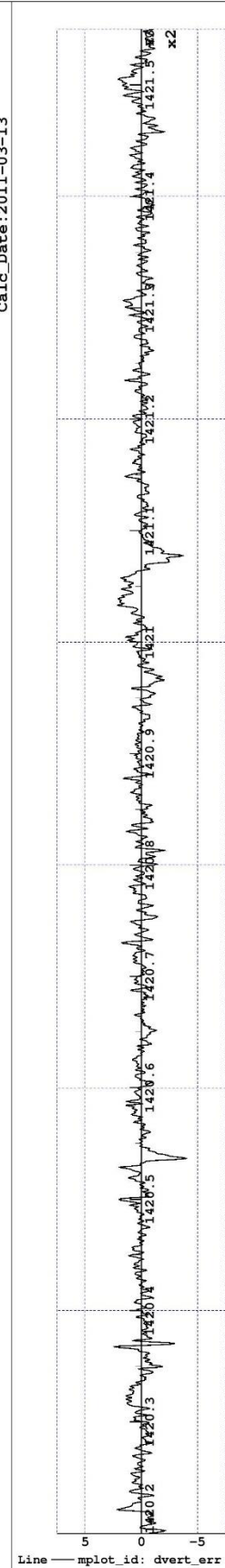
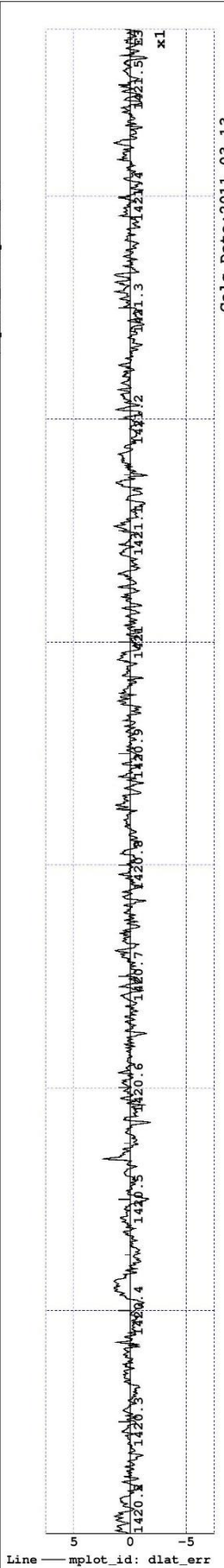


Calc_Date:2011-03-13

Track irregularities Section 14 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

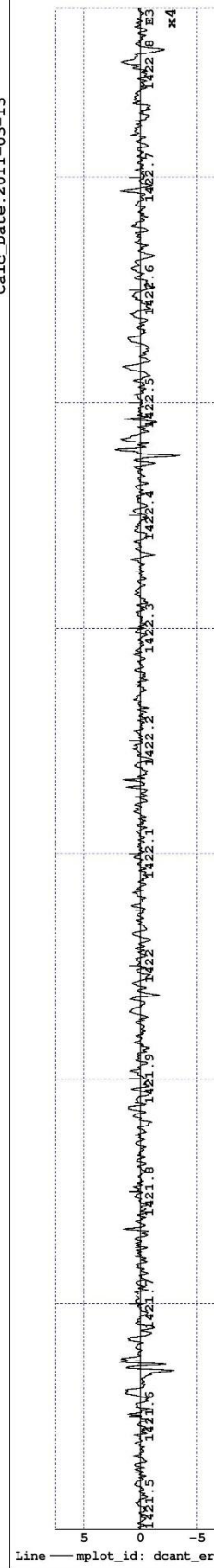
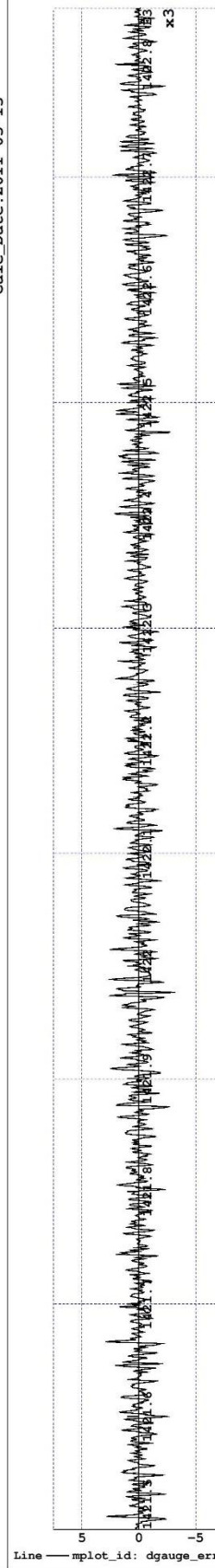
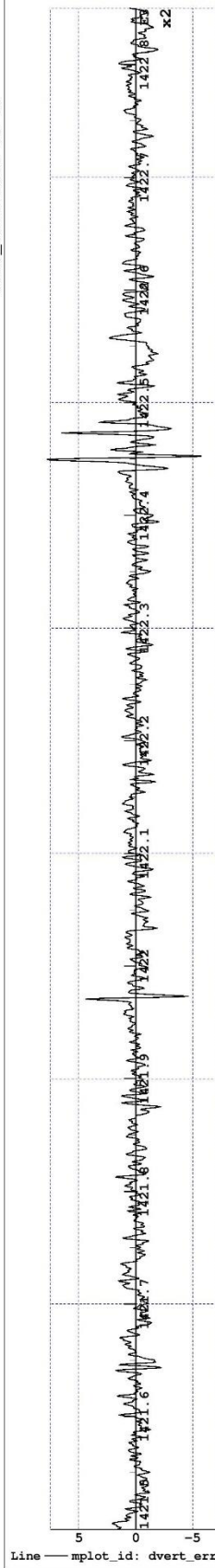
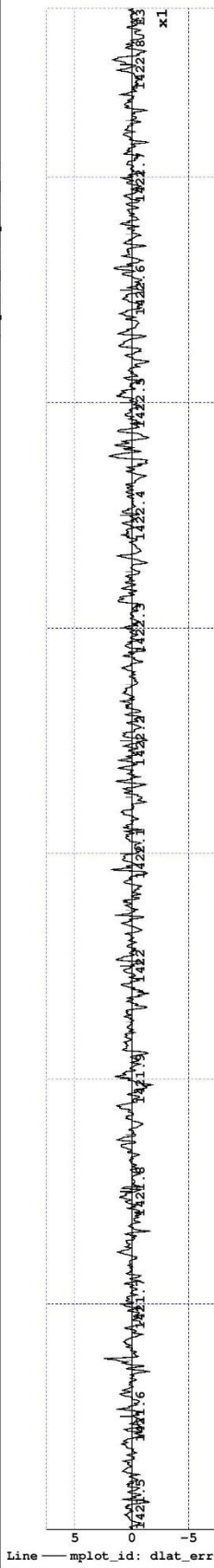


The first derivative of the track irregularities Section 1 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

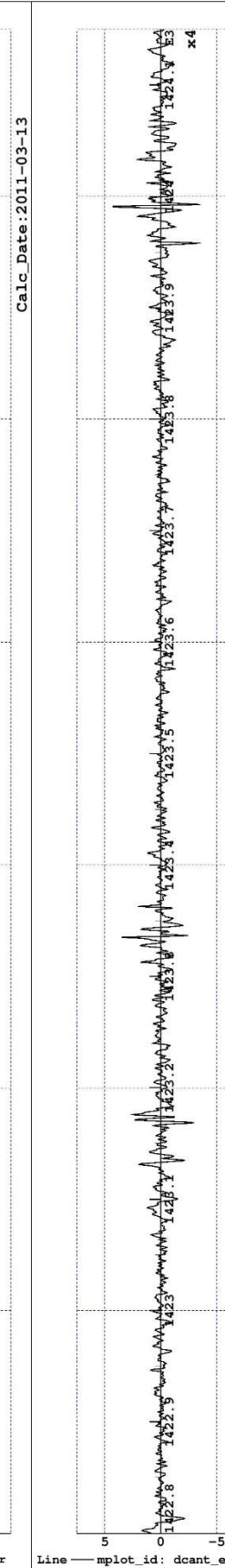
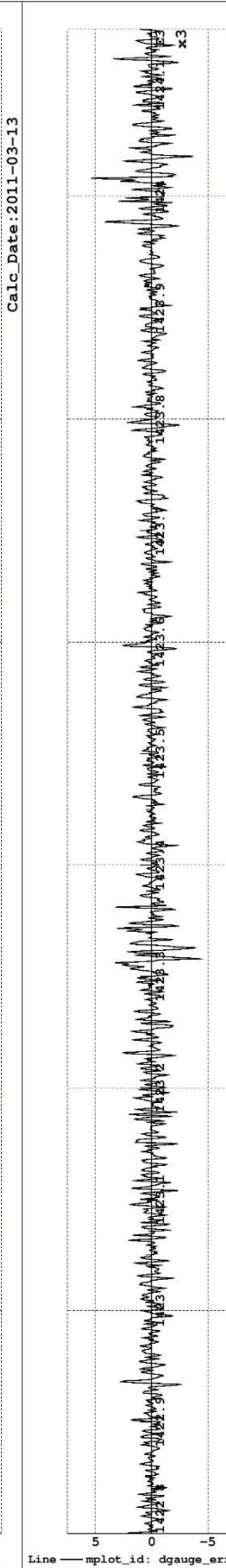
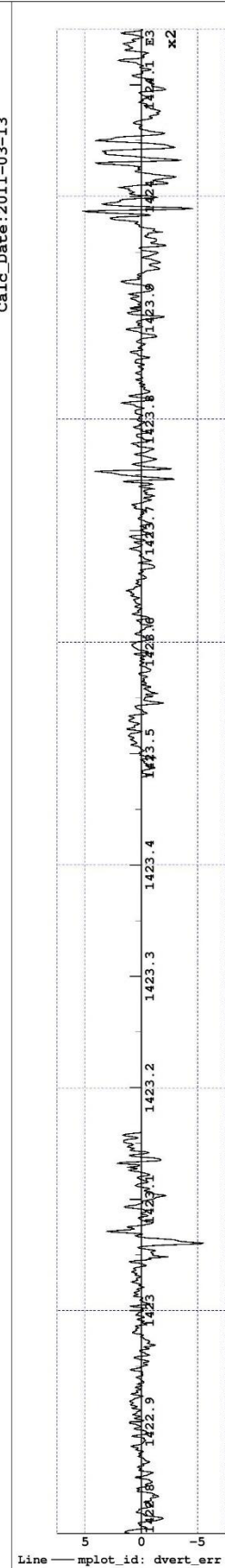
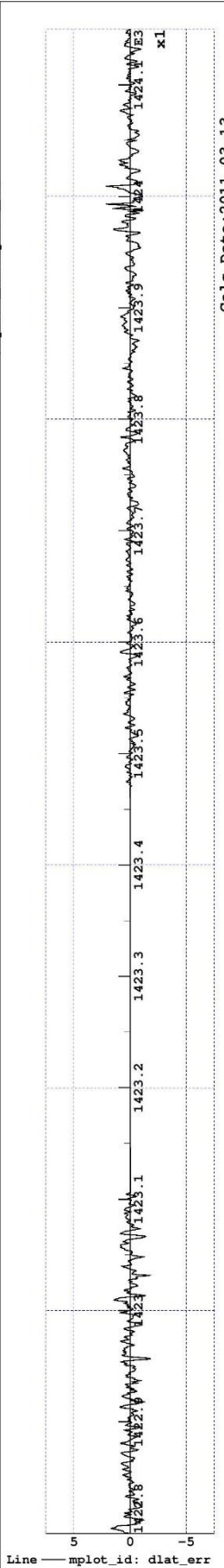


The first derivative of the track irregularities Section 2 (14)

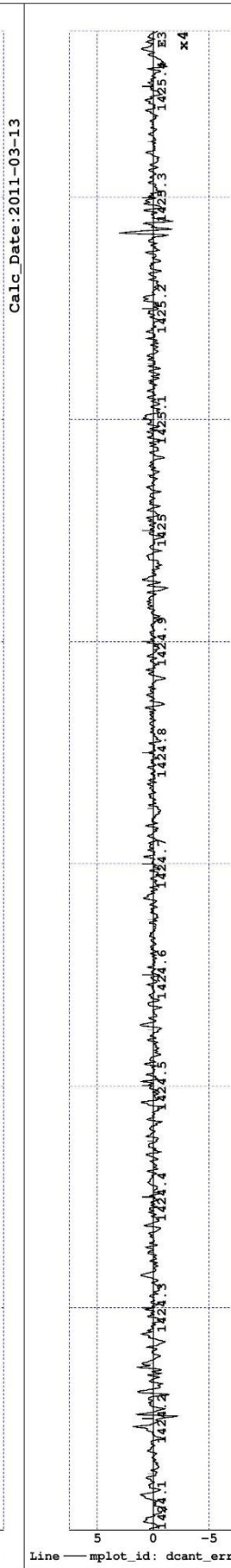
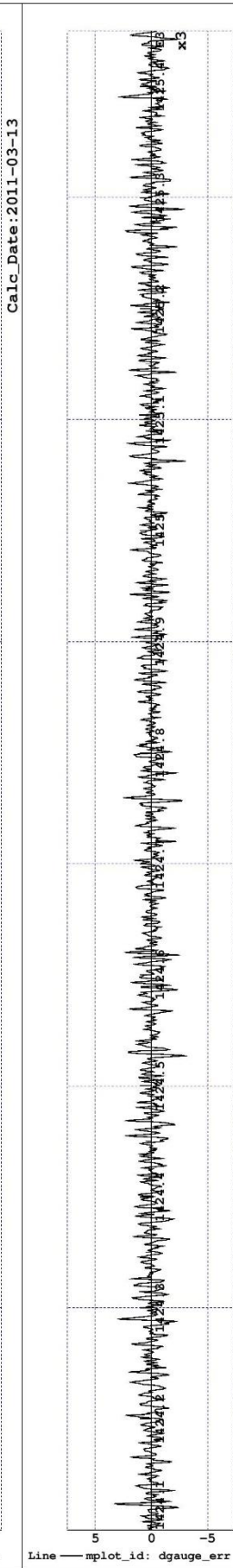
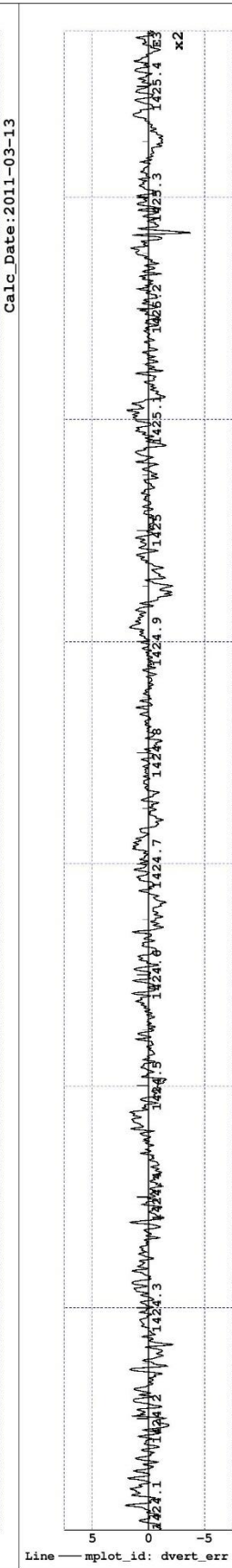
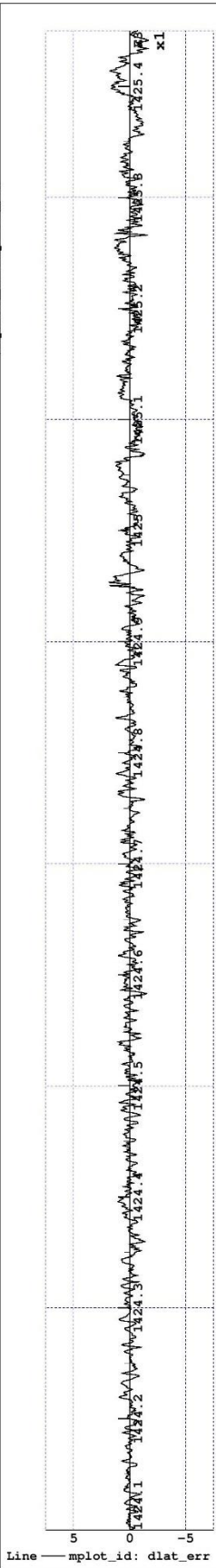
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



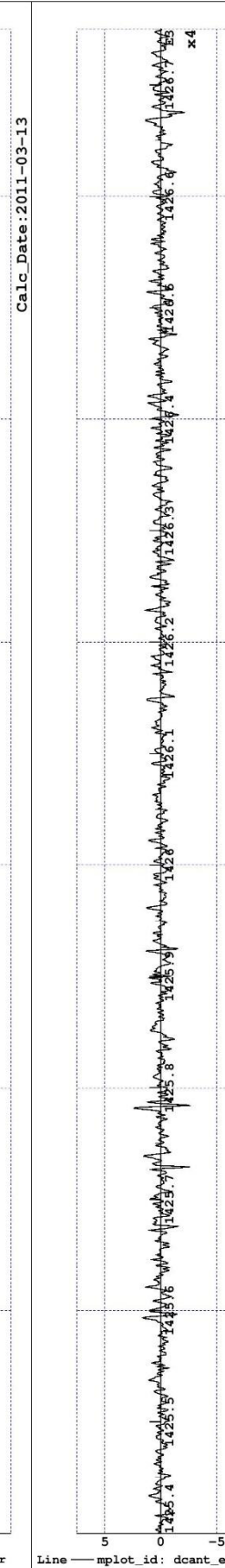
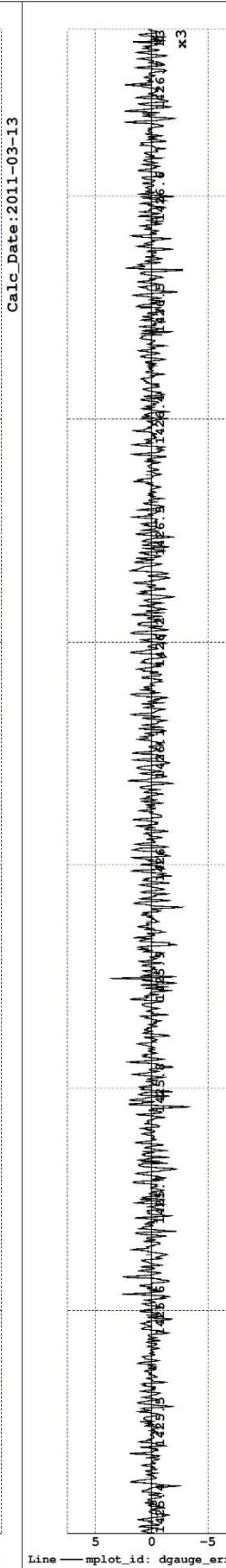
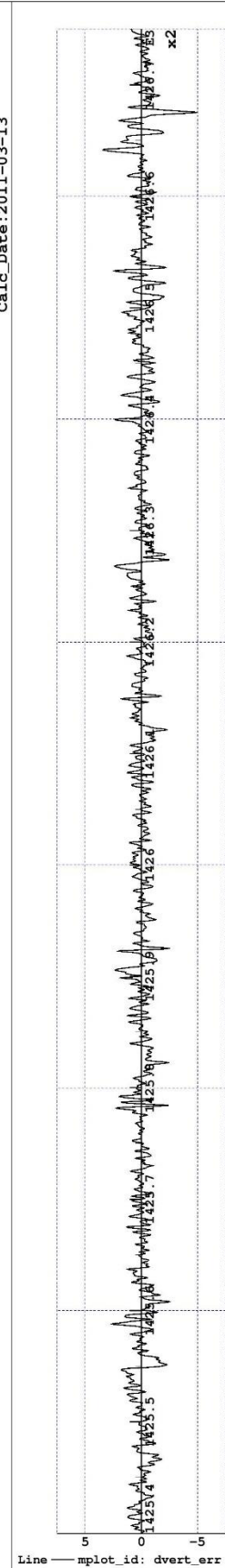
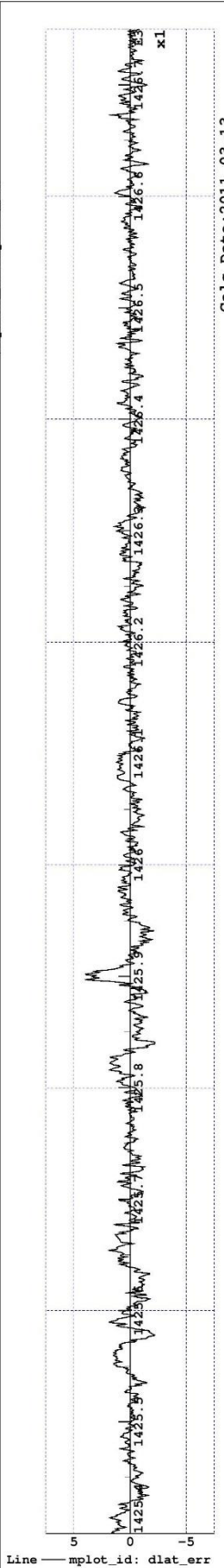
The first derivative of the track irregularities Section 3 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



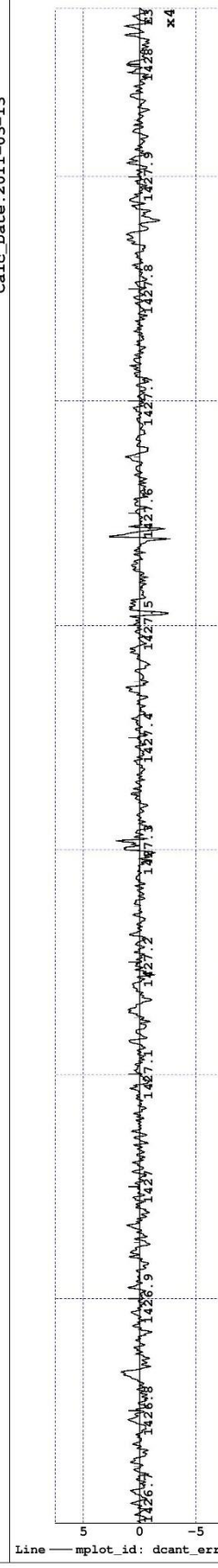
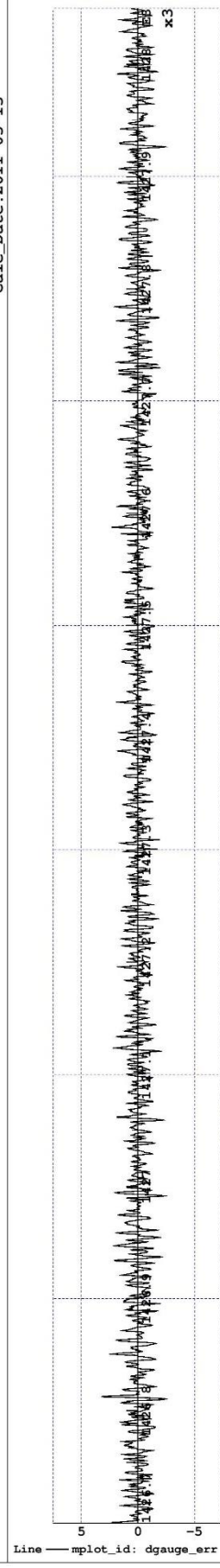
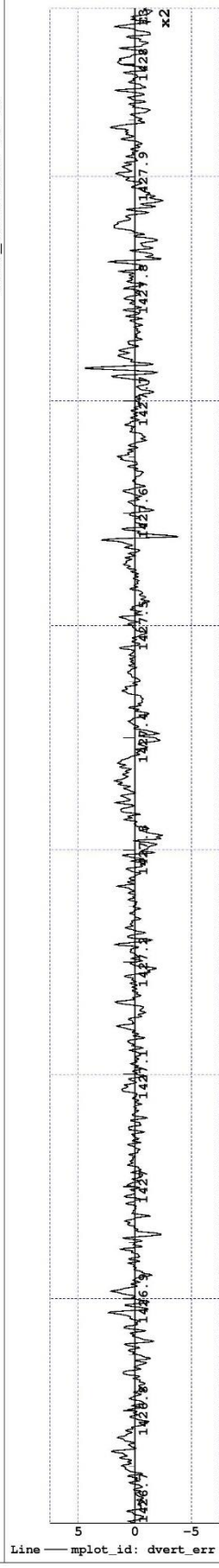
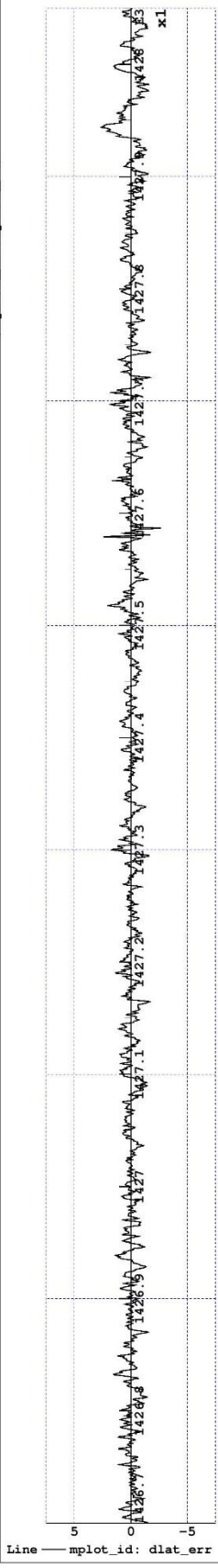
The first derivative of the track irregularities Section 4 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



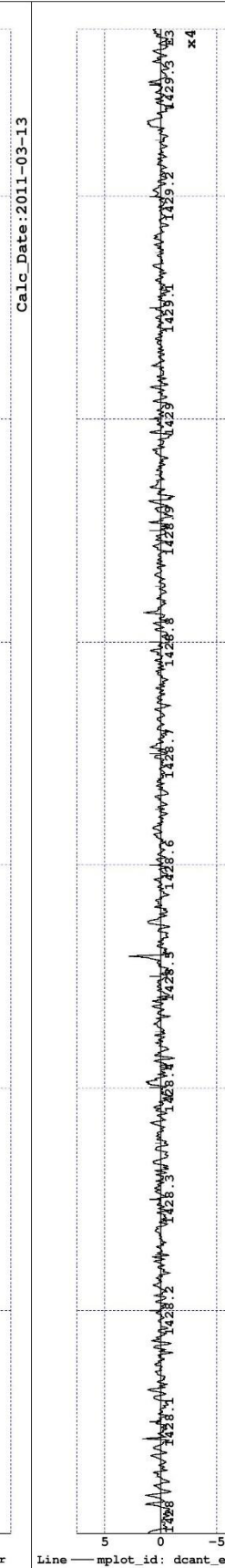
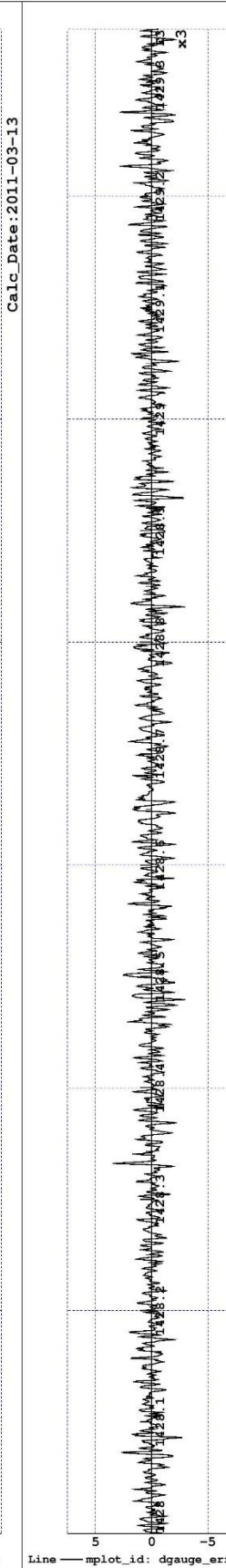
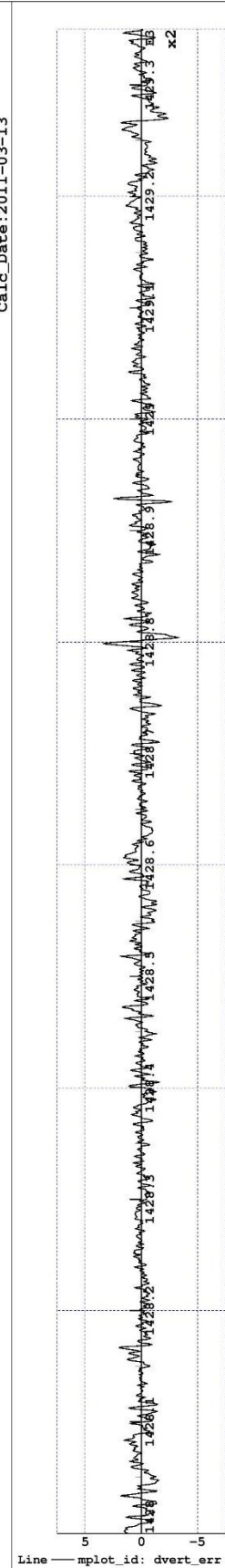
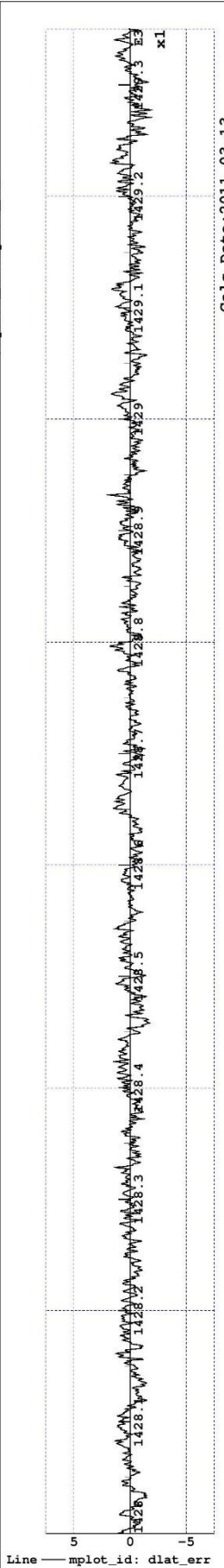
The first derivative of the track irregularities Section 5 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



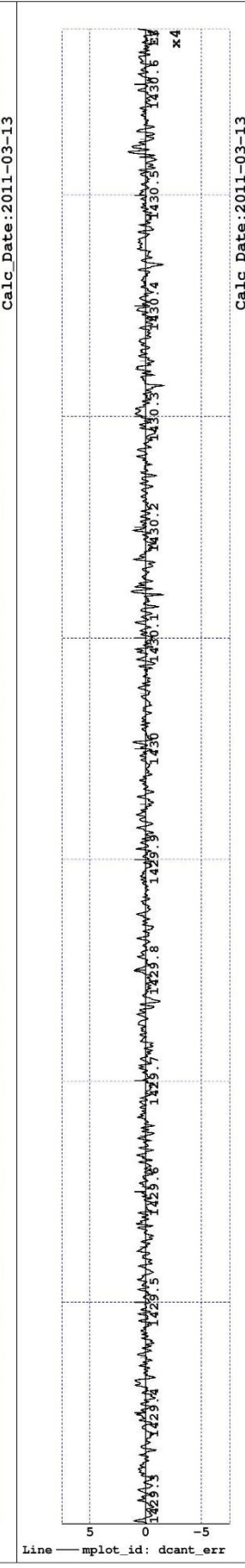
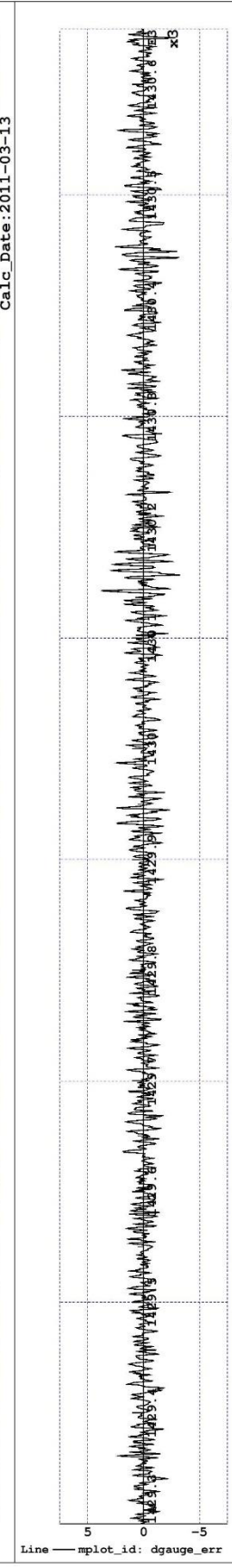
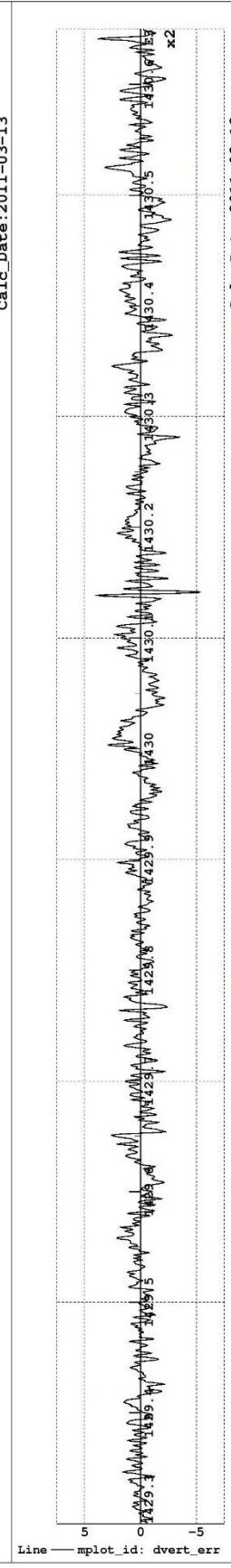
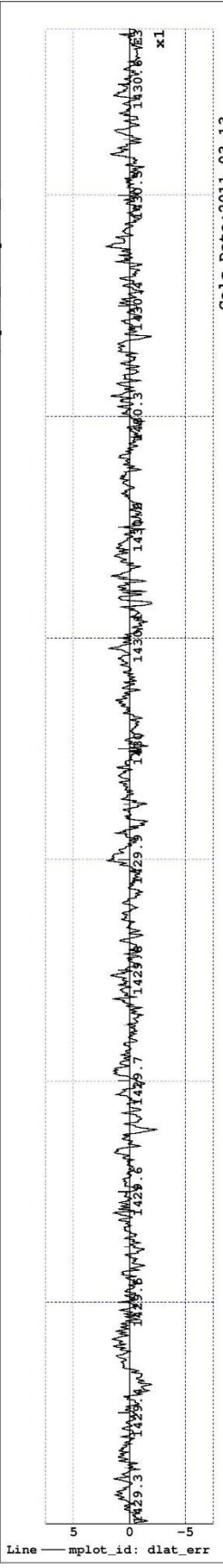
The first derivative of the track irregularities Section 6 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



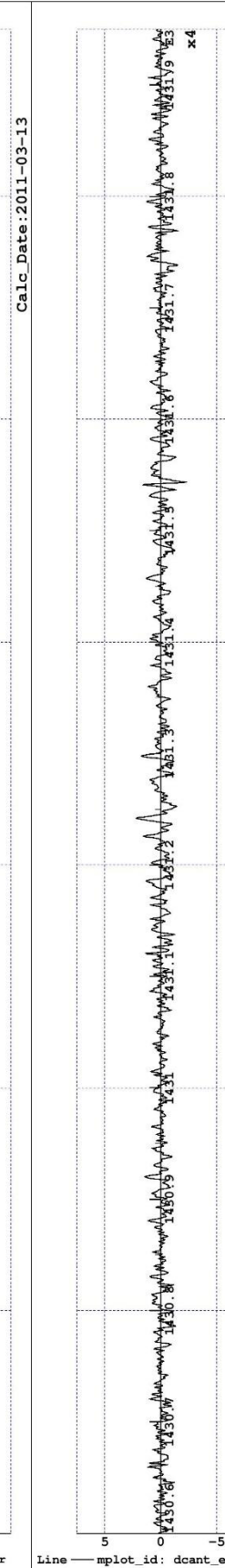
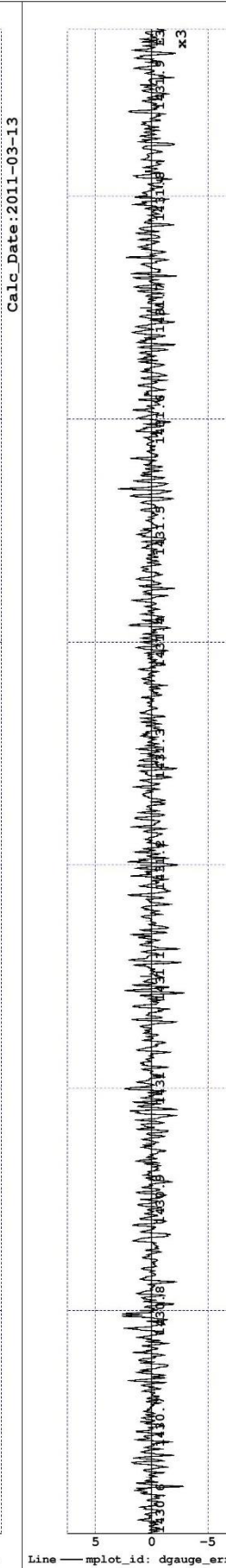
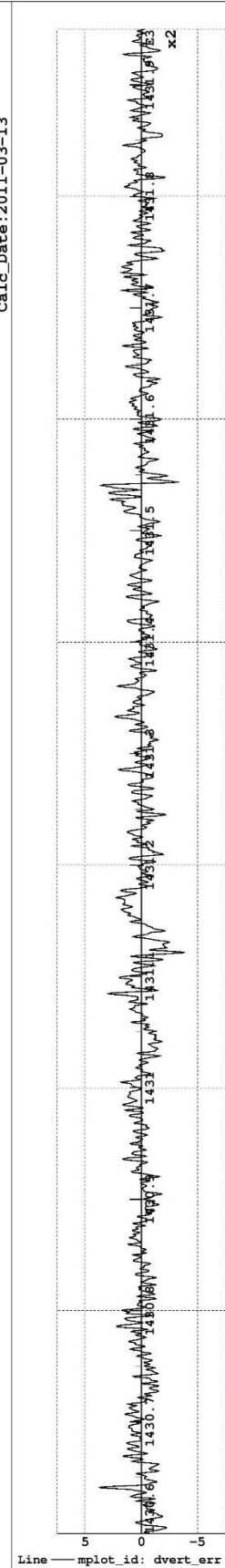
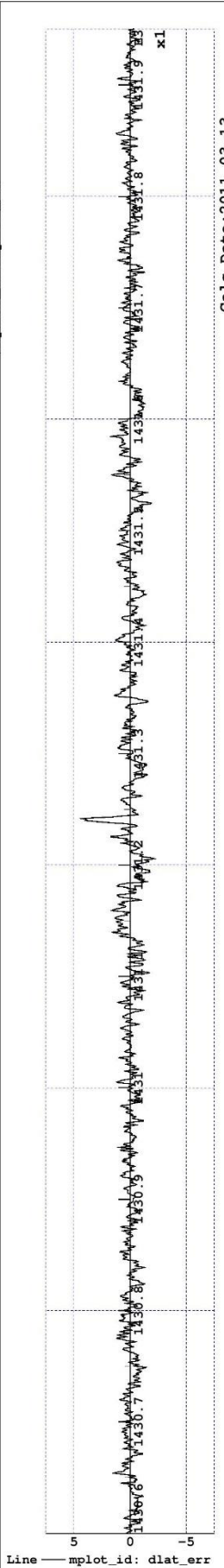
The first derivative of the track irregularities Section 7 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



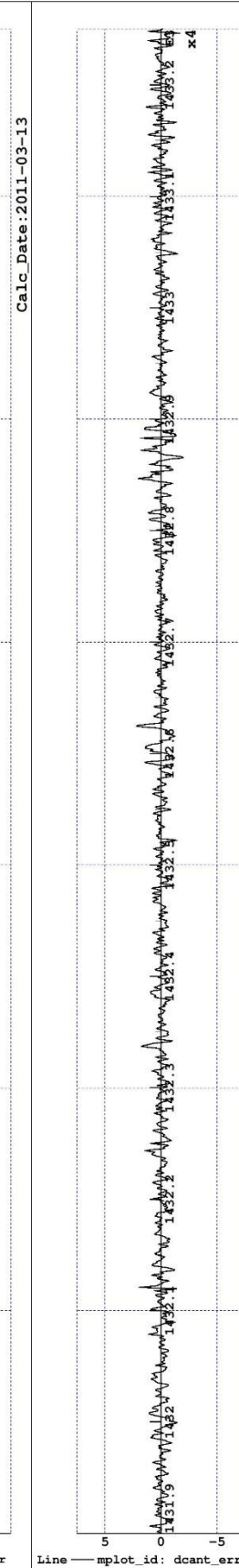
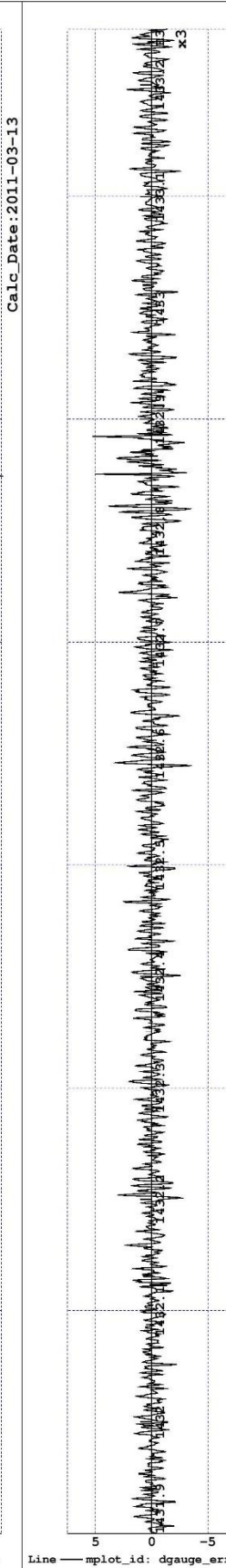
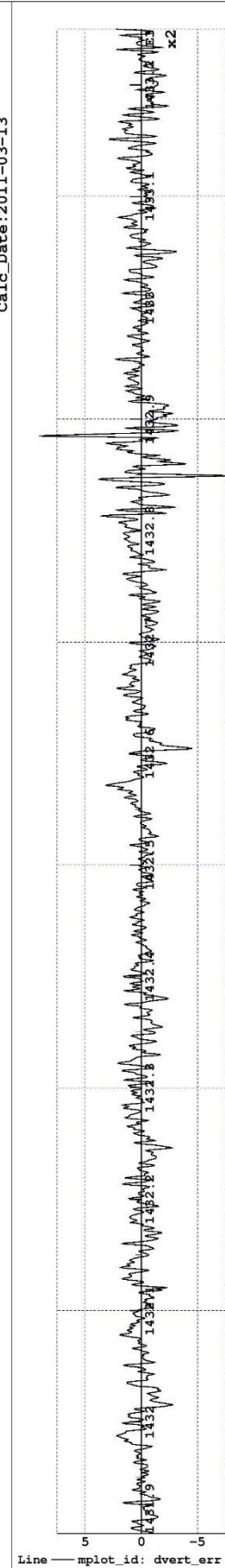
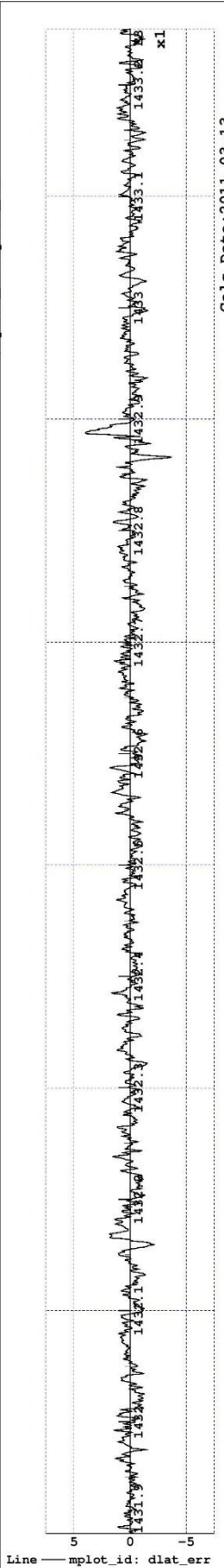
The first derivative of the track irregularities Section 8 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



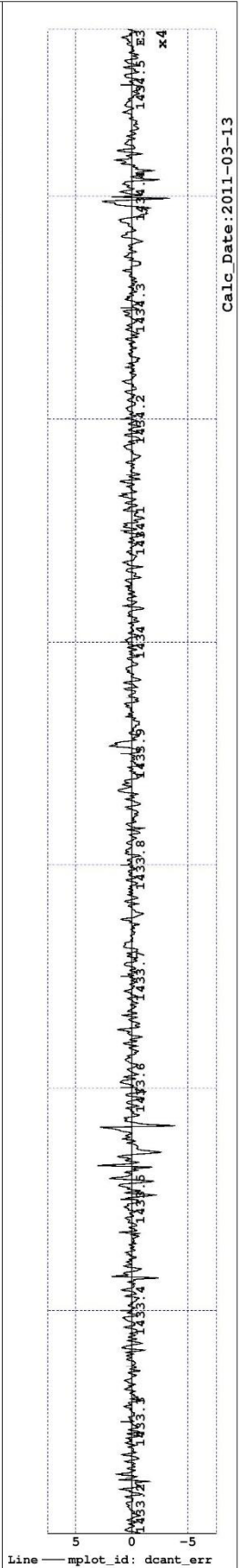
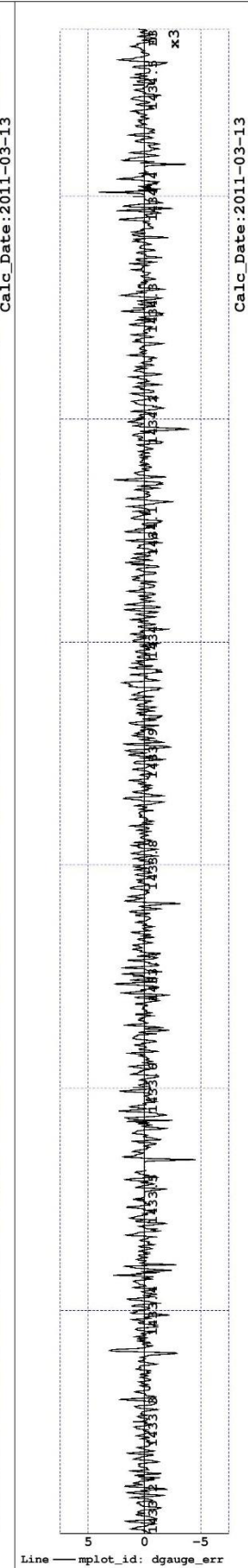
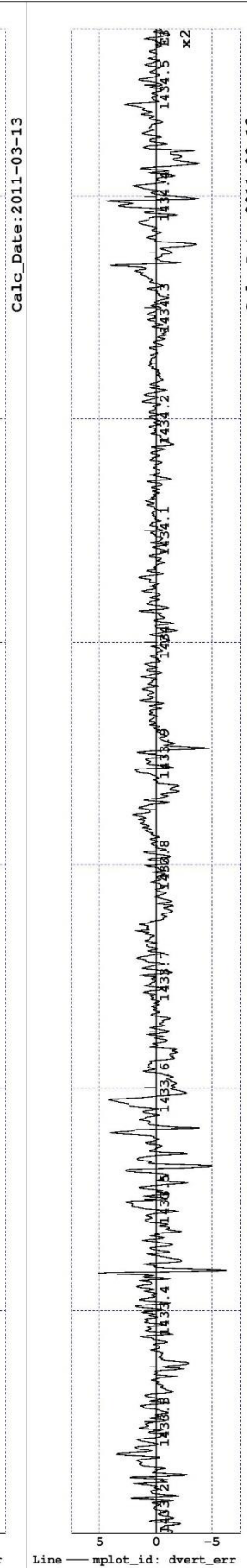
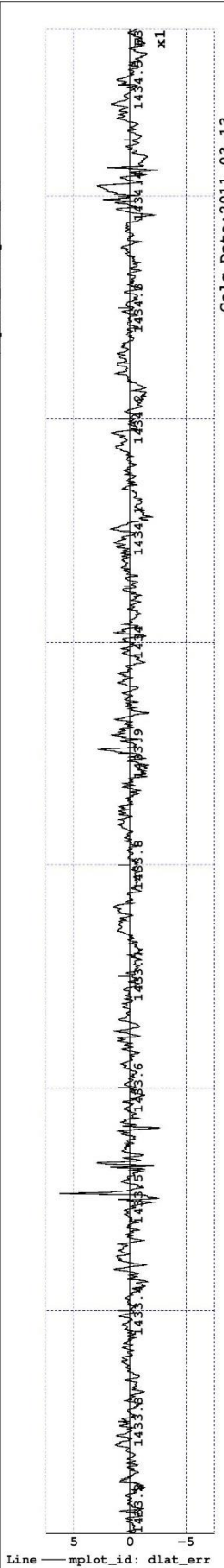
The first derivative of the track irregularities Section 9 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



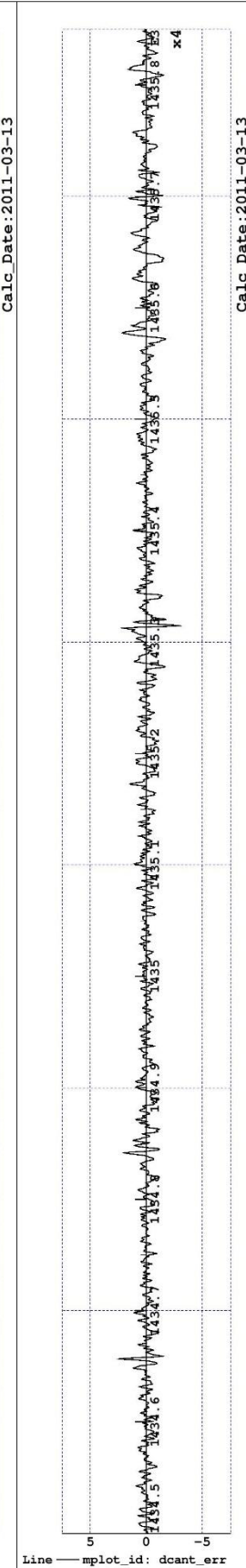
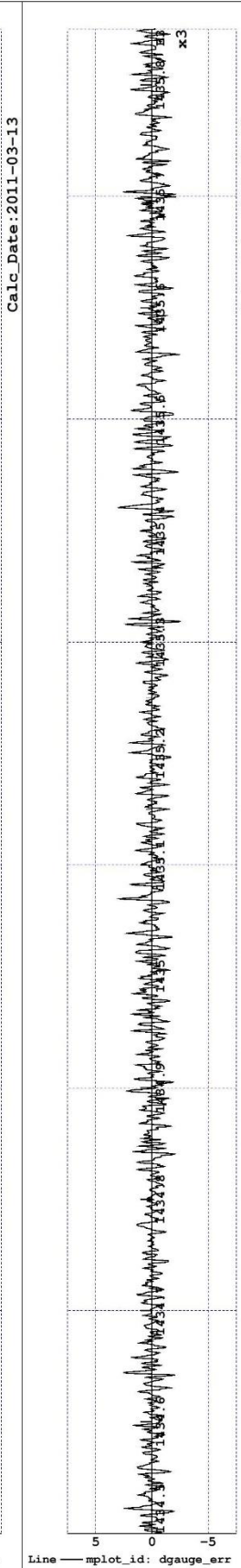
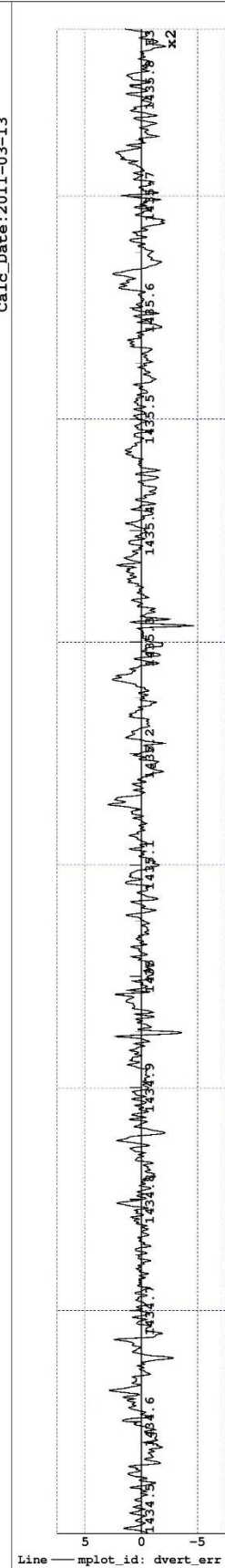
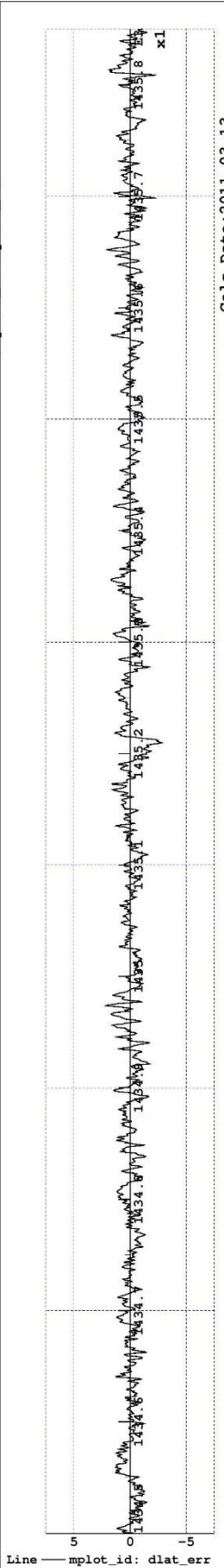
The first derivative of the track irregularities Section 10 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



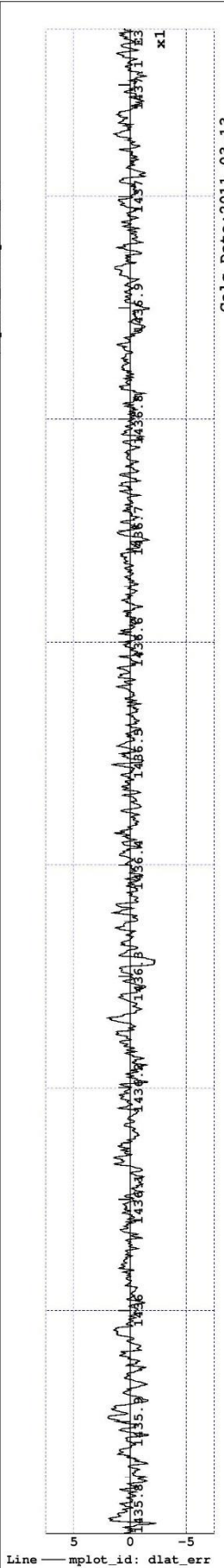
The first derivative of the track irregularities Section 11 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



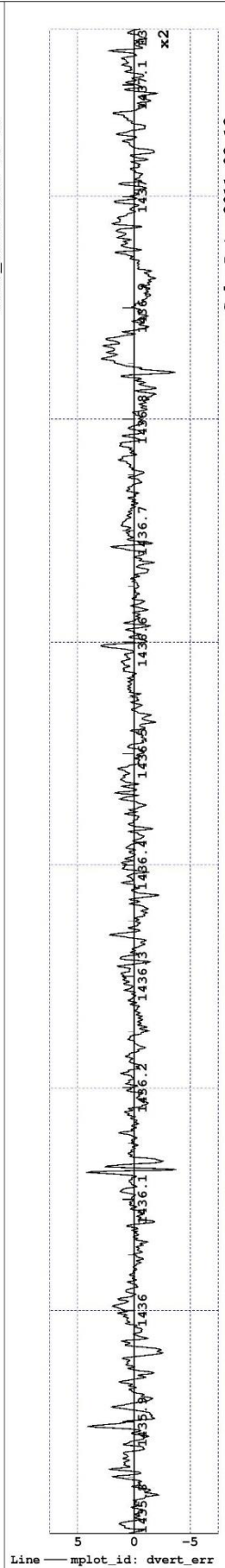
The first derivative of the track irregularities Section 12 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



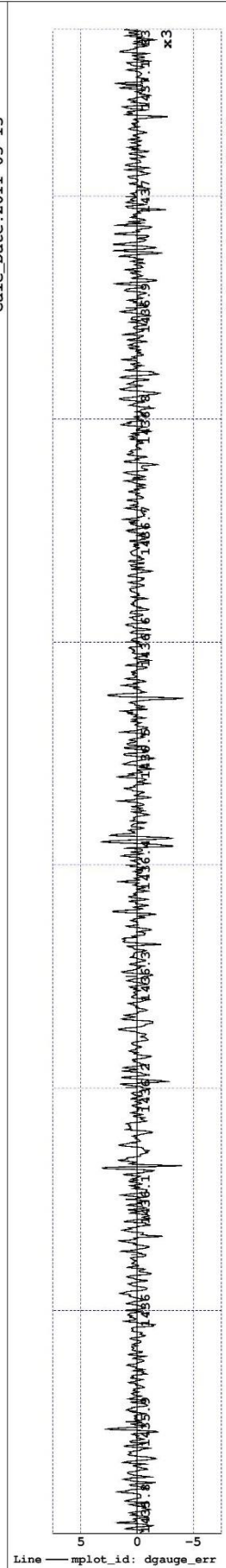
The first derivative of the track irregularities Section 13 (14)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



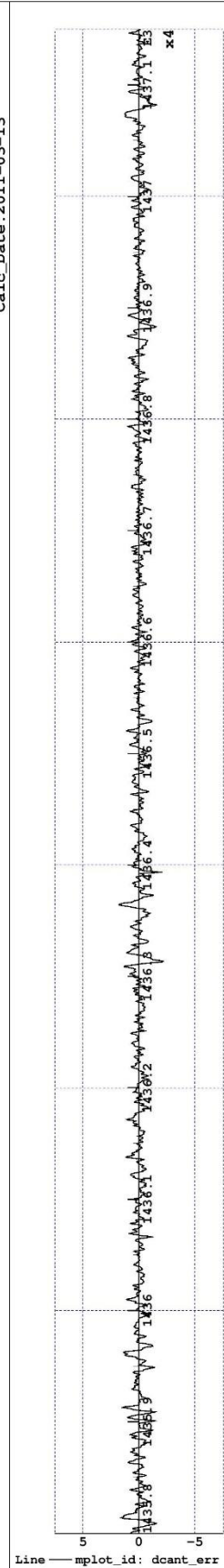
Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

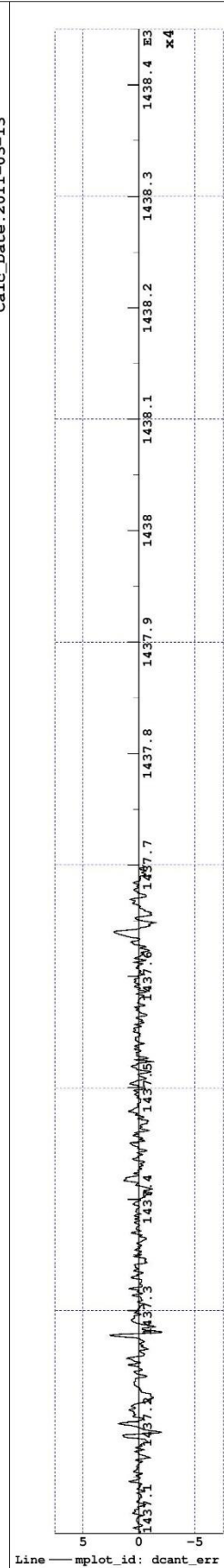
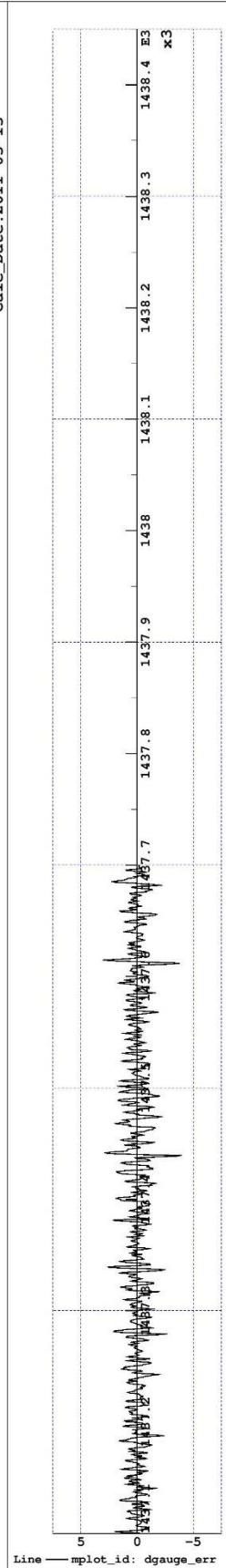
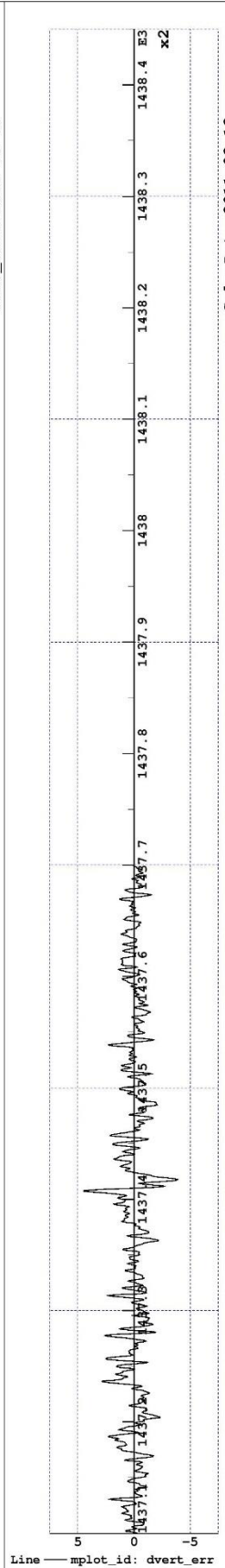
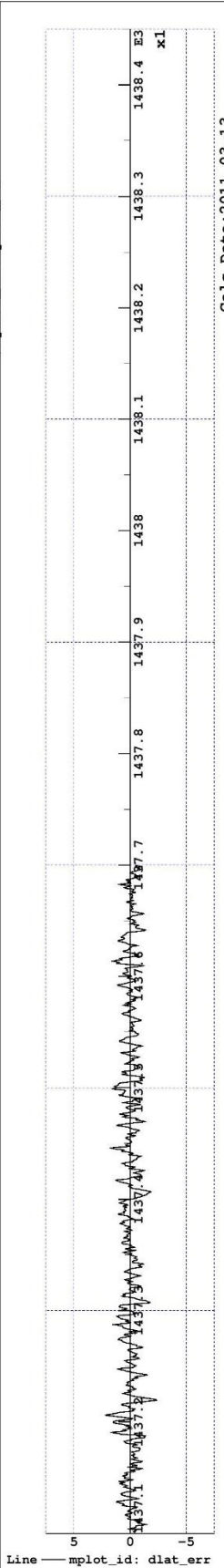


Calc_Date:2011-03-13

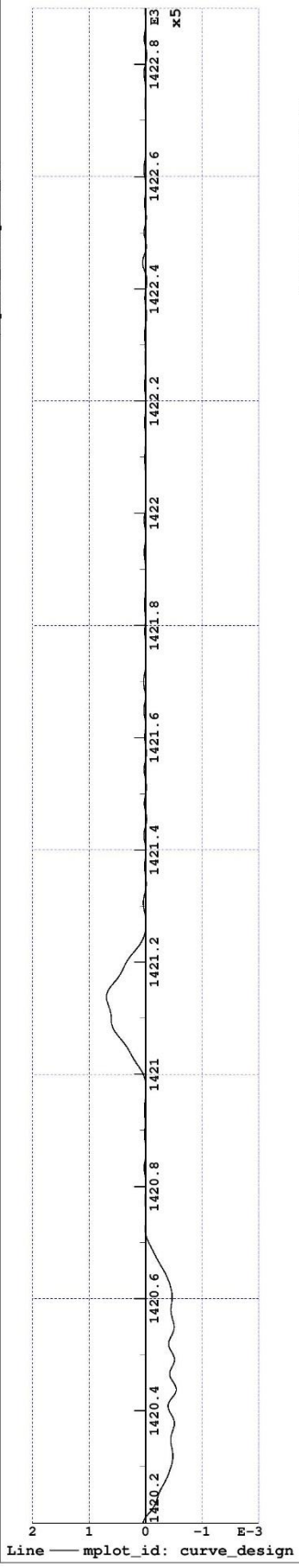


Calc_Date:2011-03-13

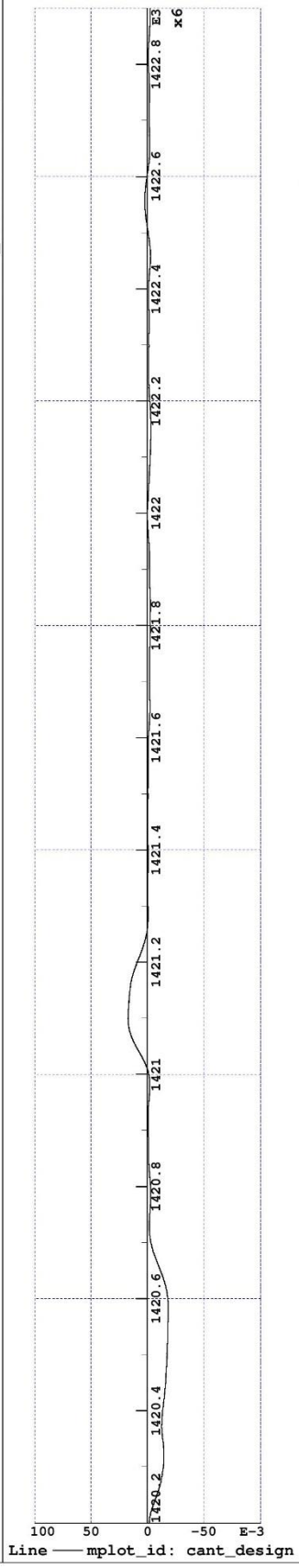
The first derivative of the track irregularities Section 14 (14)
Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



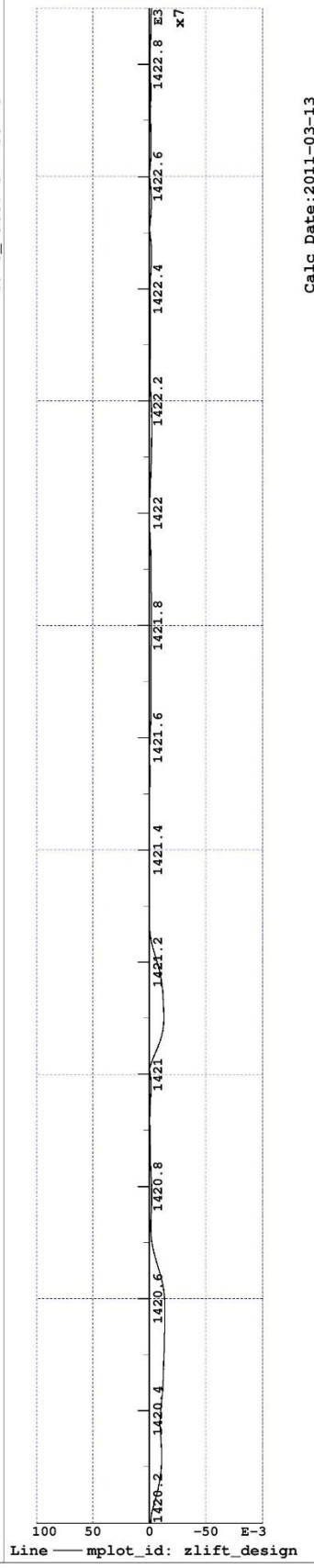
Designed track geometry Section 1(7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



Calc_Date:2011-03-13

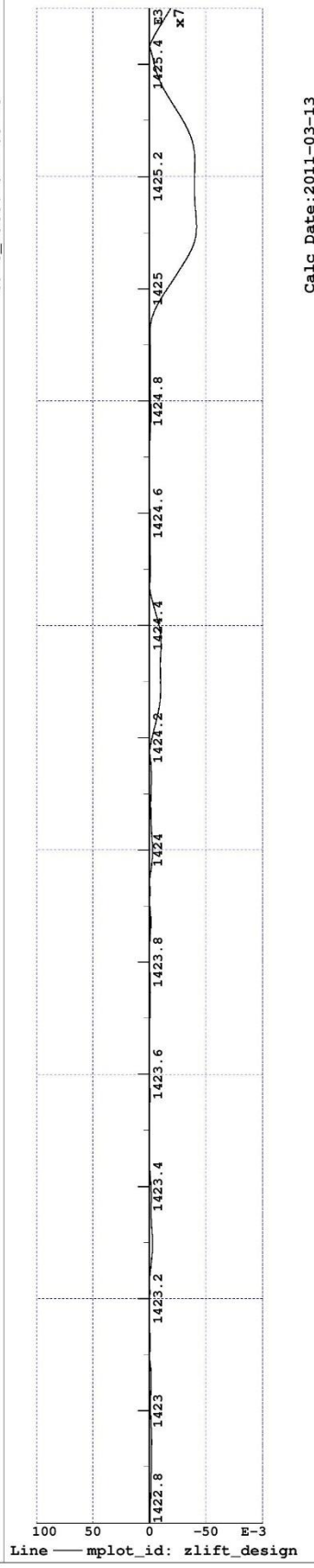
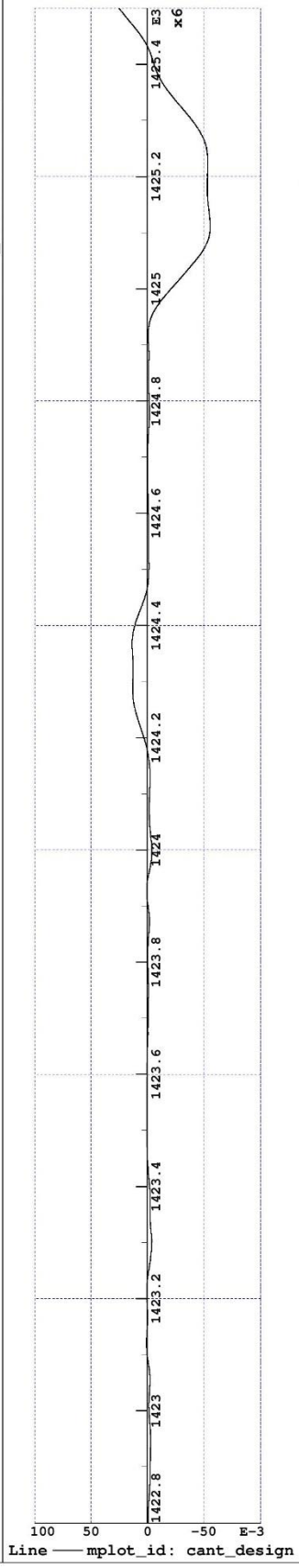
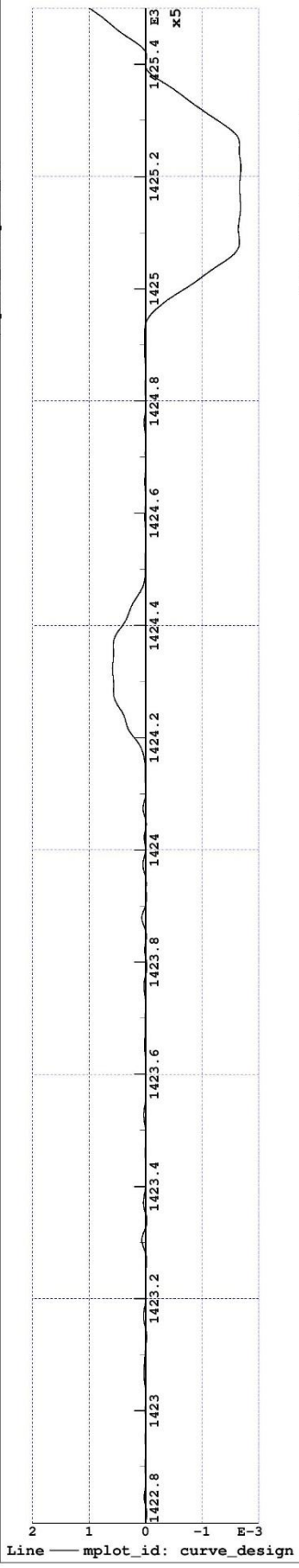


Calc_Date:2011-03-13

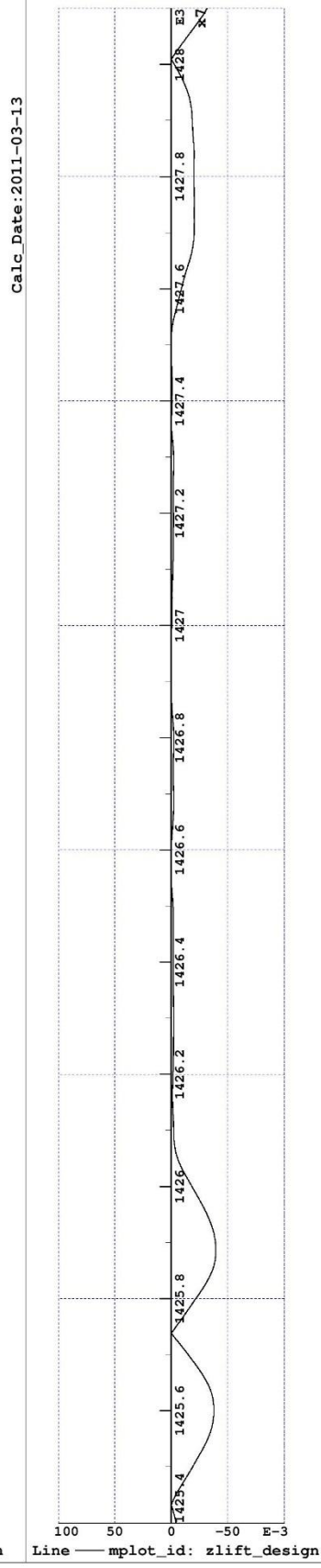
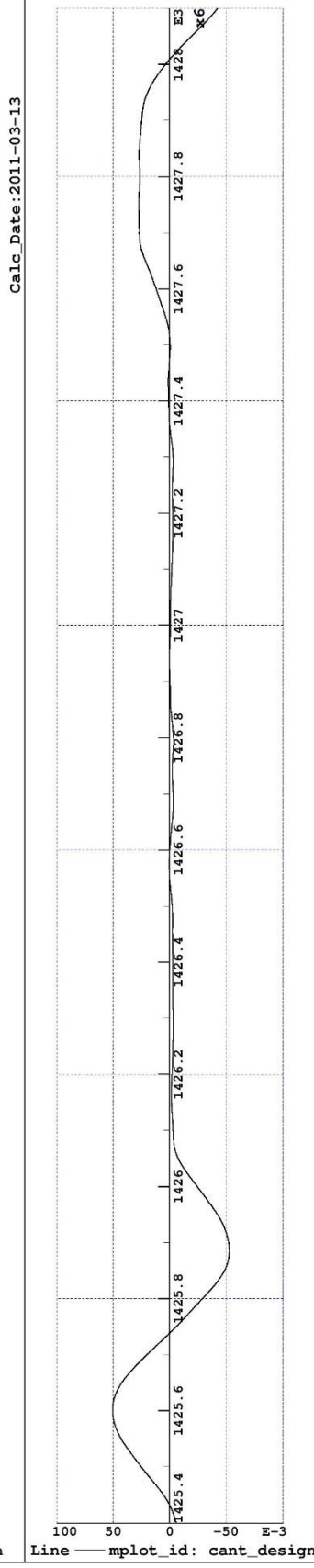
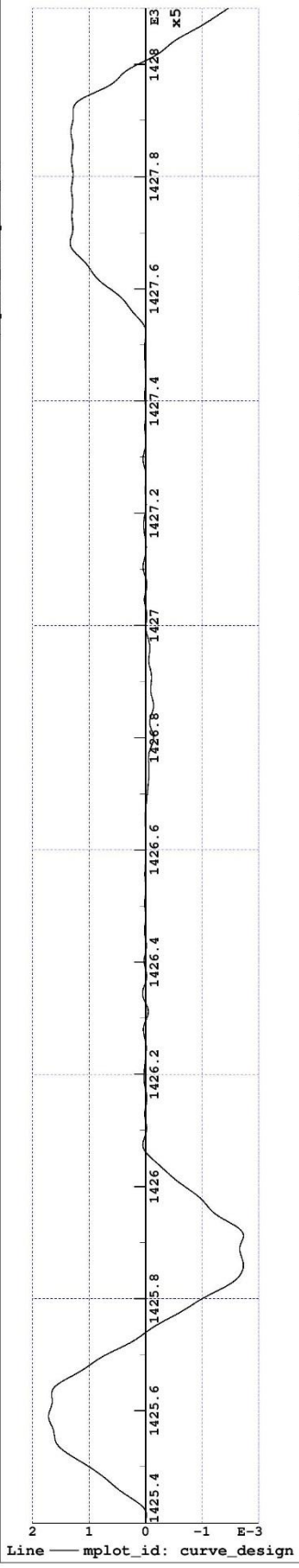


Calc_Date:2011-03-13

Designed track geometry Section 2 (7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



Designed track geometry Section 3(7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign

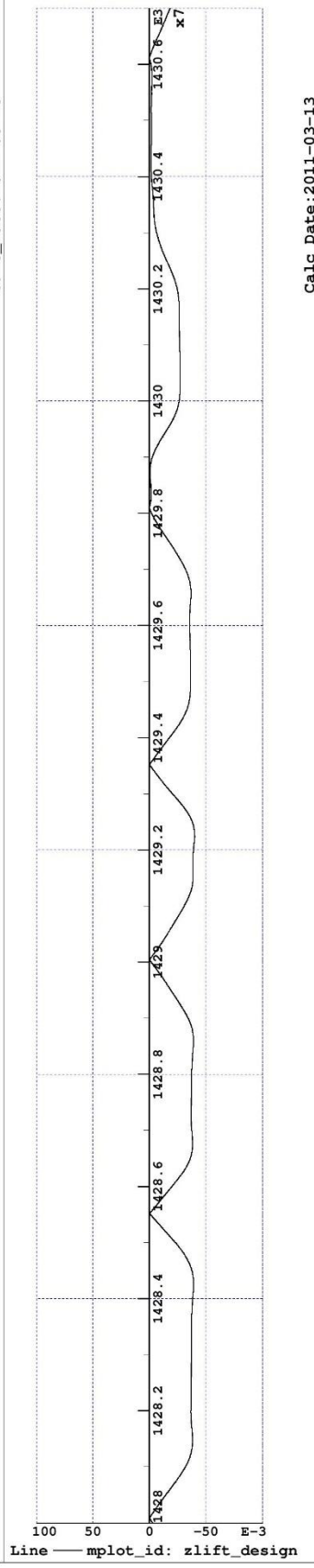
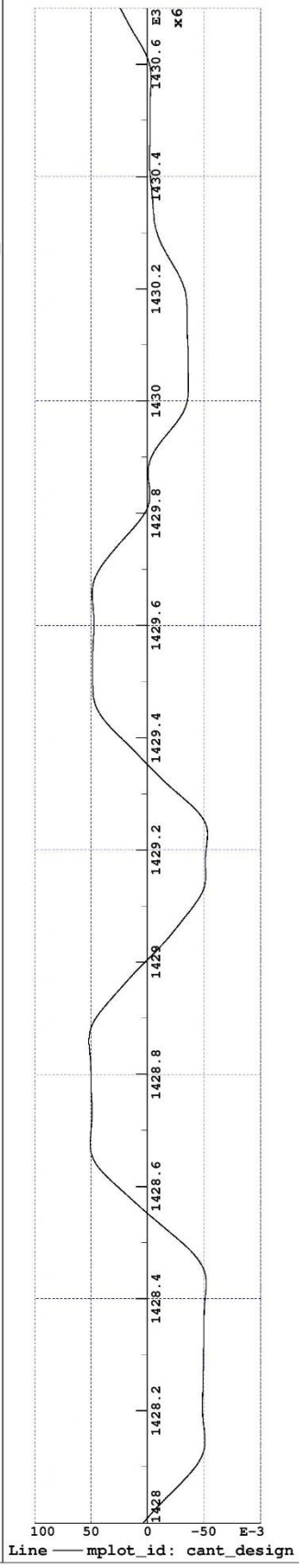
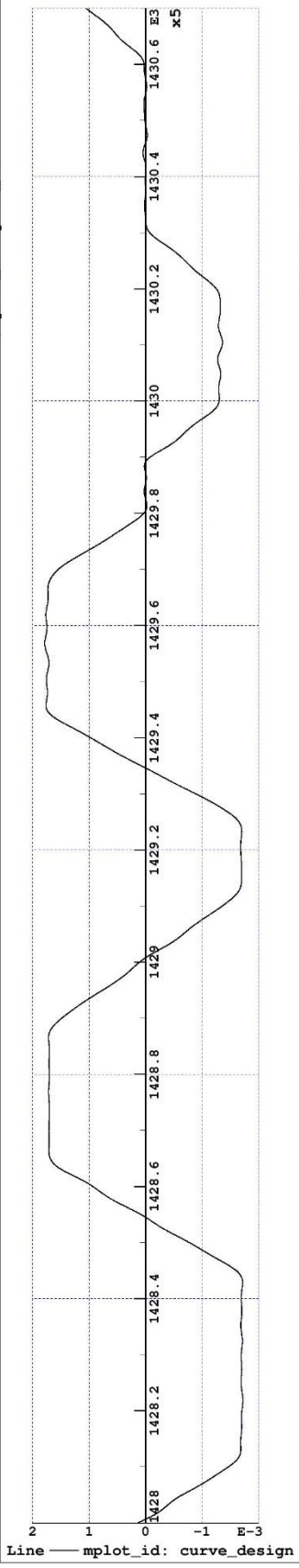


Calc_Date:2011-03-13

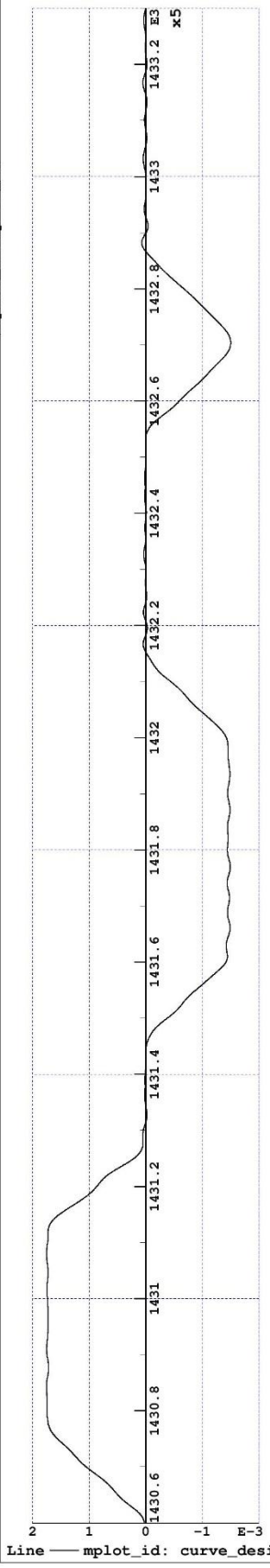
Calc_Date:2011-03-13

Calc_Date:2011-03-13

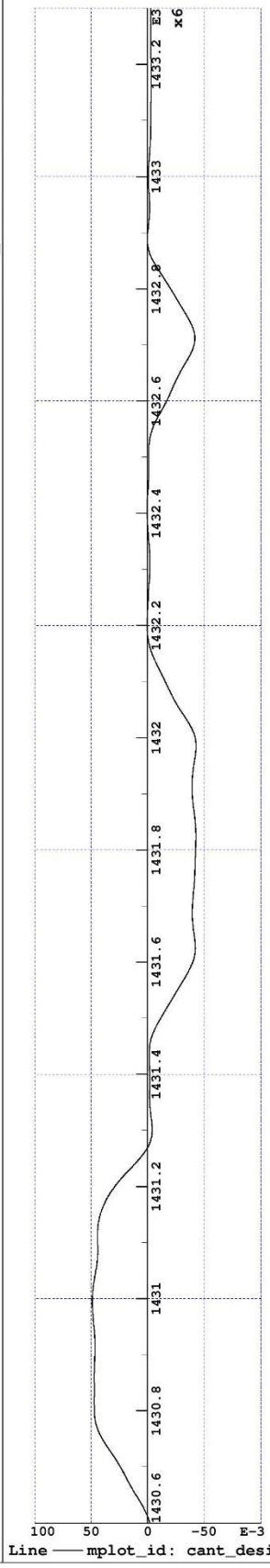
Designed track geometry Section 4 (7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



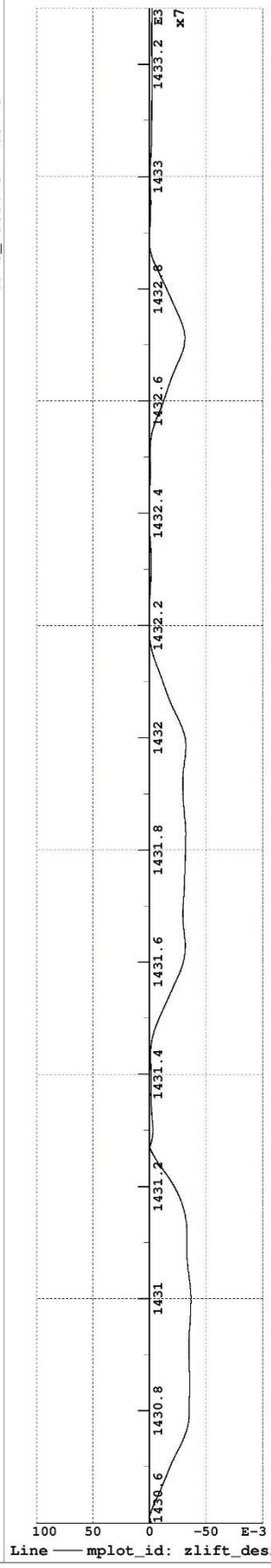
Designed track geometry Section 5 (7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



Calc_Date:2011-03-13

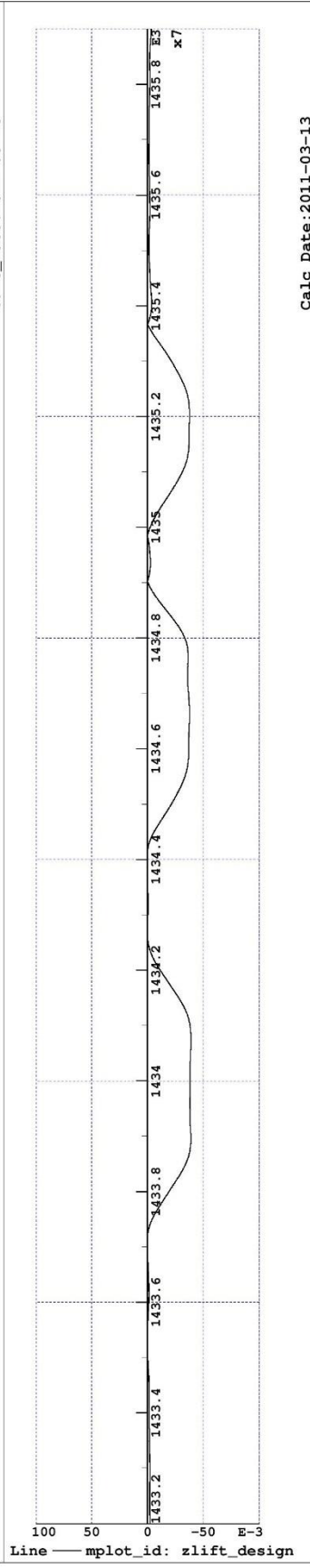
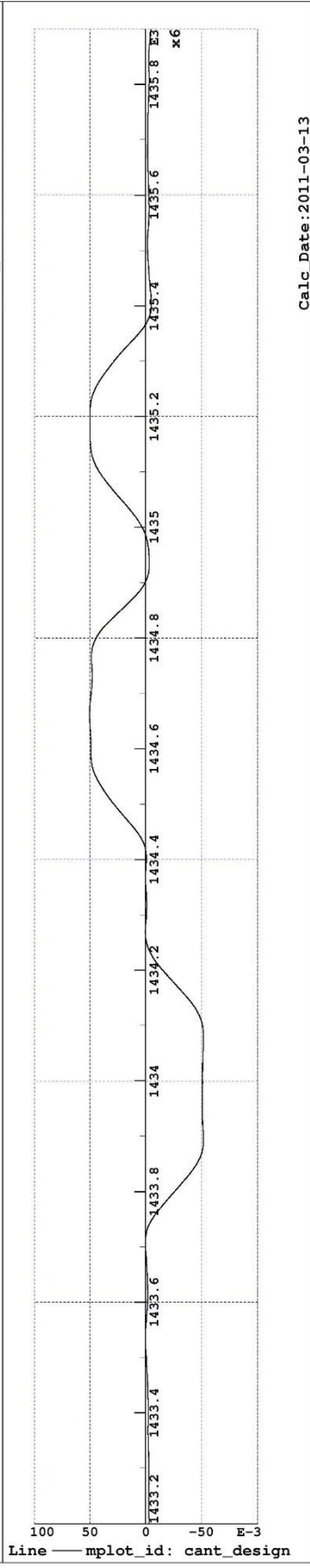
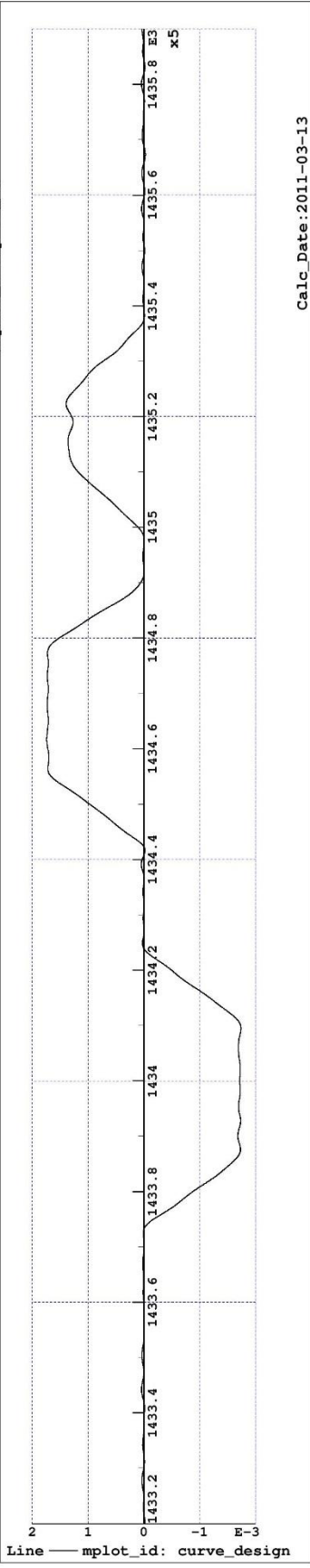


Calc_Date:2011-03-13

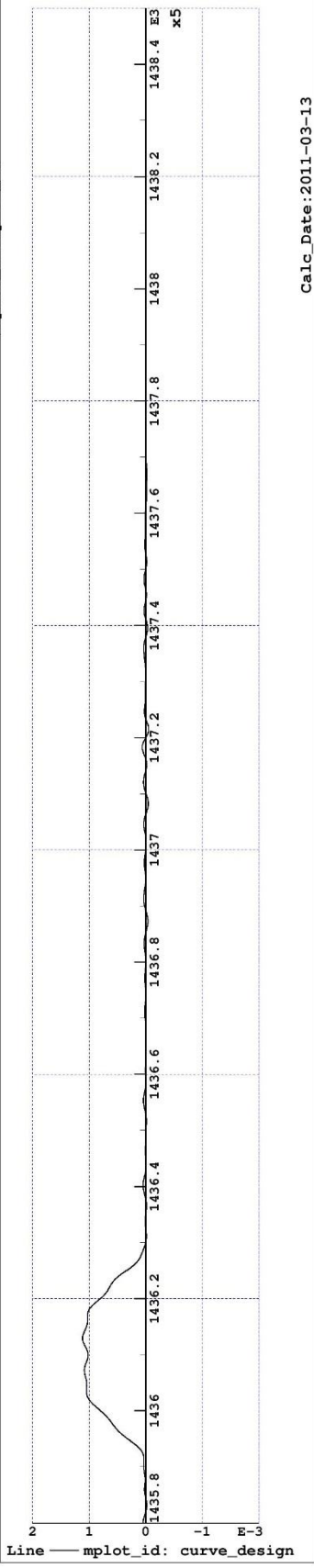


Calc_Date:2011-03-13

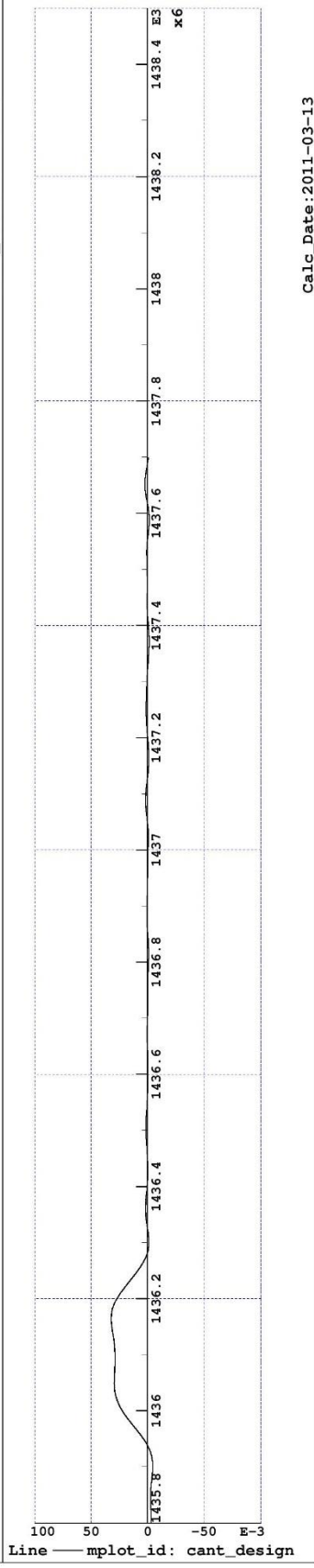
Designed track geometry Section 6(7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



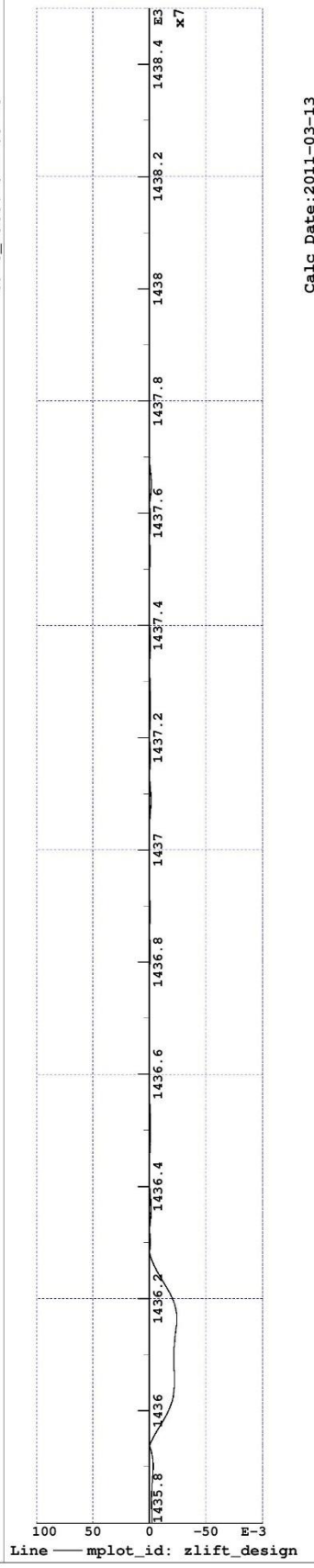
Designed track geometry Section 7 (7)
 Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



Calc_Date: 2011-03-13



Calc_Date: 2011-03-13

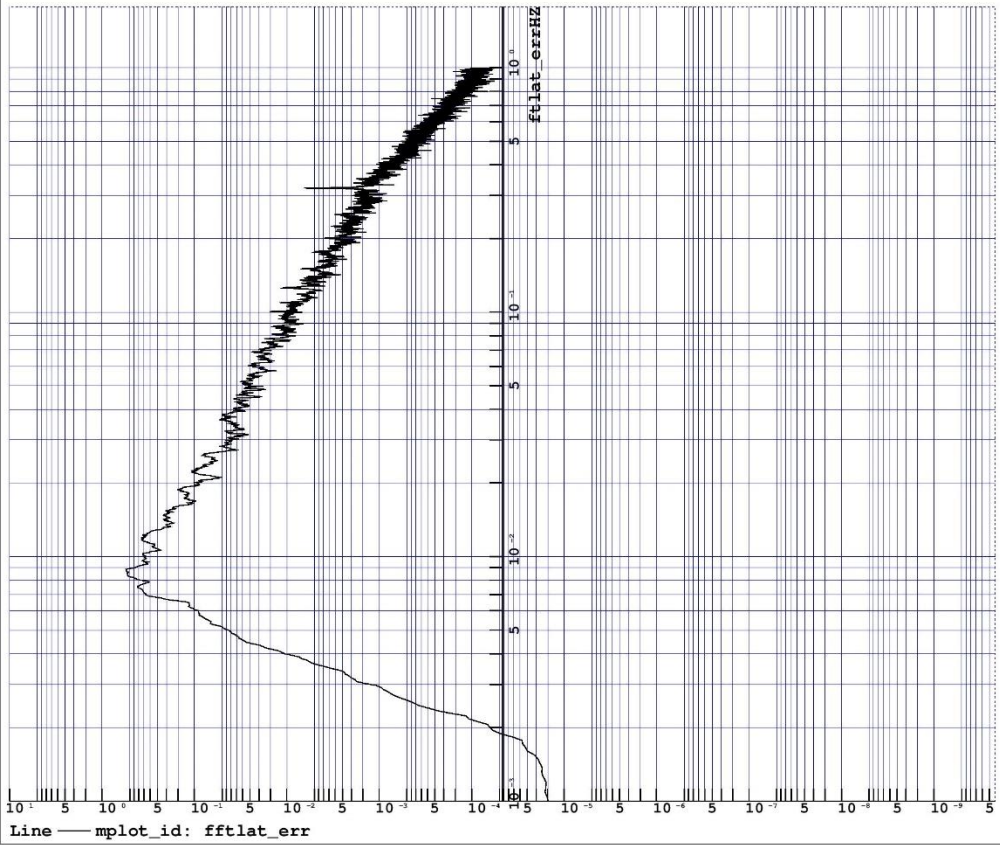


Calc_Date: 2011-03-13

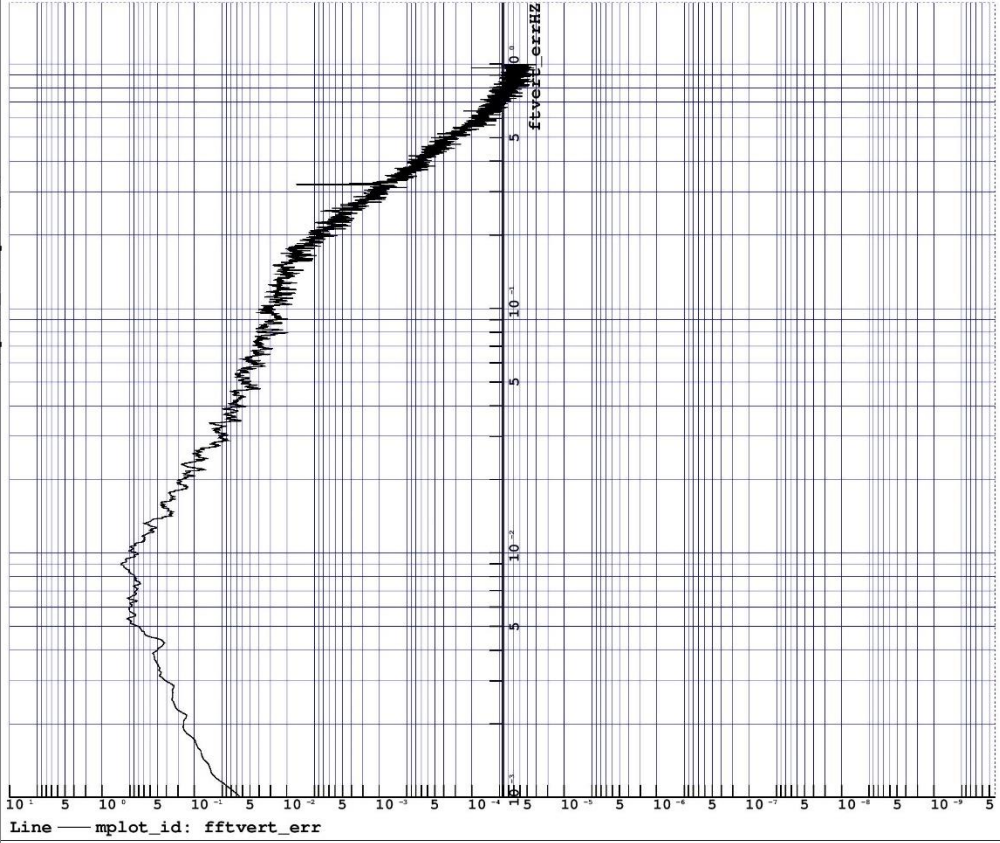
Fourier Series of Lateral and Vertical Track Irregularities

Gensys Mplot.1009
Plot Date: 2011-03-13
Plot Time: 20.142
Plotfile: %\$trc_strix_track2_track_plot.mplotf
Mplot_ID:mplot_id

Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



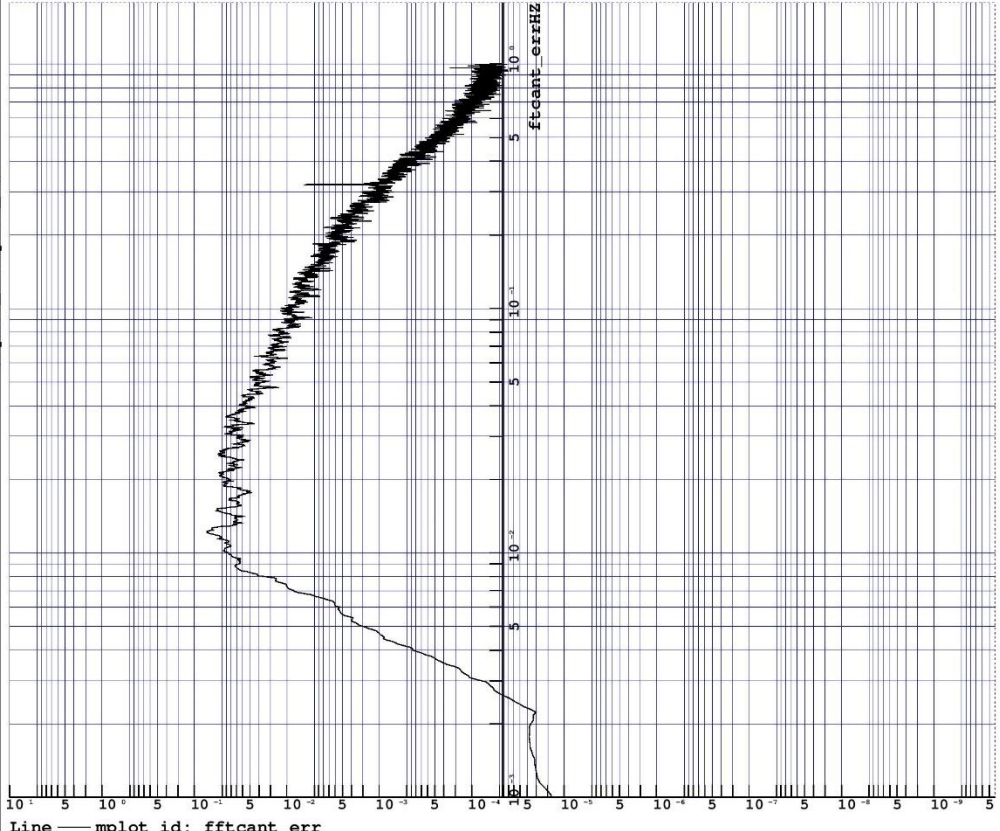
Calc_Date:2011-03-13



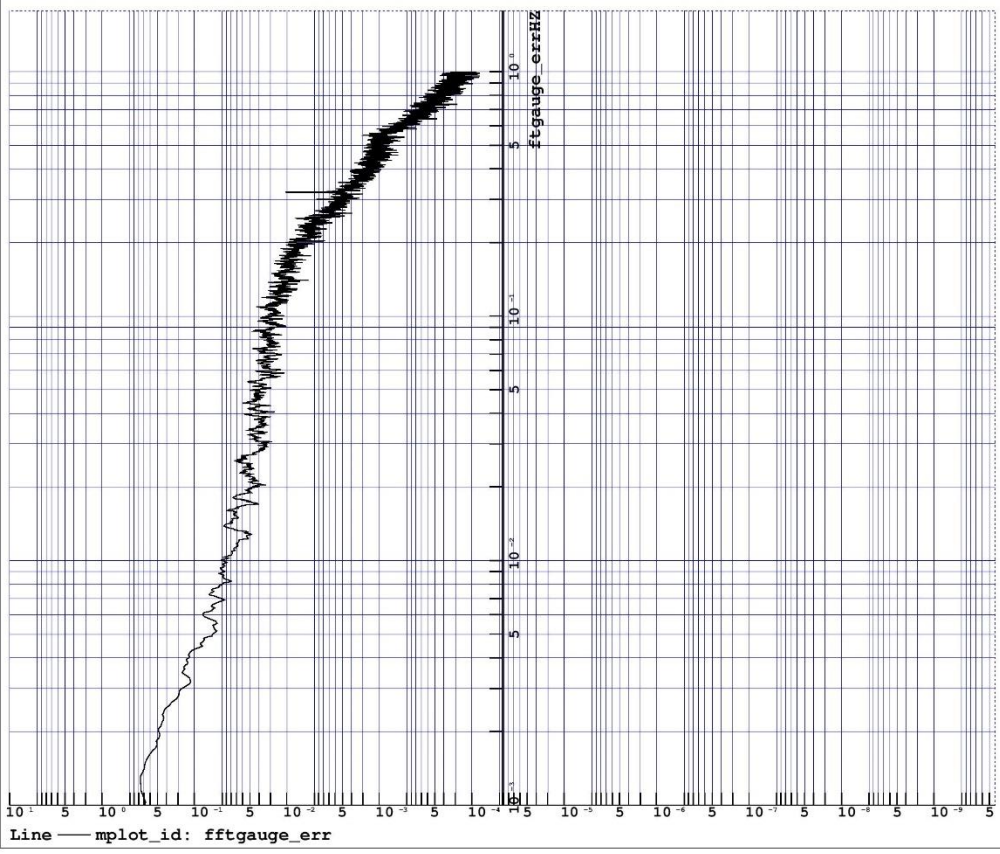
Calc_Date:2011-03-13

Fourier Series of Gauge and Cant Track Irregularities

Track file: track/Kra_Rgn_040930.trax_wdesign



Calc_Date:2011-03-13



Calc_Date:2011-03-13

ПРИЛОГ 3

Модел железничког возила за превоз руде гвожђа

```

##  Headlines
##  =====
head 1 "" # Intentionally left blank in order to set the page title in MPlot
head 2 "Fammoo040; constant side bearers; max axle load 30t $CalcType"
head 3 "Wheel/Rail= $ckpfr; Friction=$mu_; Speed=$vkmh"
head 4 "Curve Radius=$CurveRadius; Track irr.=$ctrack_irreg"
head 5 "Weight of load= $mL;"
###  Analysis specific input data
#[-]{ =====
fresp_param Fourier_CG1 1.e-4 fstart= .05 fstop= 20. fstep= -1.04
modal_param Schur_fact1 1.e-4
quasi_param Damped_Tens 1.e-4 .1 10 12
tsim_param heun_c tstart=.0 tstep= 0.001 tout= 0.010
# idebug= 1 # If idebug>0 a memory dump will be written to file "idebug_file"
# idebug_file= "calc.out"
# write_ca_file # During simulation, write continuously to file $ident.ca
#[-]} -----
###  Pre- & Post- Processing
#[-]{ =====
if_then_char_init CalcType .eq. TSIM .or.
CalcType .eq. MODAL
# pre_process= 'sed "s/trunf/tsim_BoBo.tsimf!$CURRENT_FILE!" npickf/flex_car.npickf > npickf/$IDENT.npickf'
# pre_process= 'npick npickf/$IDENT.npickf'
# pre_process= 'quasi $CURRENT_FILE'
# post_process= 'mplot mplotf/bogi_A.mplotf $IDENT'
# post_process= 'mplot mplotf/Tsim_Safe_OneIdent.mplotf $IDENT'
# post_process= 'mplot mplotf/critSpeedGoalfunc.mplotf $IDENT'
# post_process= 'mgv diags/$IDENT.ps'
endif
#[-]} -----

###
###  Track irregularities
###  =====
func char ctrack_irreg= Real_track
#[-]{
# insert file track/trc_irreg.ins
func const bo_ = 0.75 # Lateral semi-distance between the nominal rolling circles of the wheels
func const Track_Gauge= 1435. # Gauge to be used in the intpl_track_irr-commands
if_then_char_init ctrack_irreg .eq. "NoTrackIrr" # {{
func const YMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 0.
func const Xtrac_stop= 30000.
func intpl_track_irr2 Xtrac_start Xtrac_stop Ideal_track Track_Gauge
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "UIC518_wheel_unloading" # }}{
func const YMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3 # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 0.
func const Xtrac_stop= 3000.
func intpl_r lat_trac
-100.0 0.0
Xtrac_stop 0.0
func intpl_r vert_trac # vertical alignment in mm
-100.0 0.0
-10.0 0.0
-9.0 0.0
-8.0 0.0
0.0 0.0
66-6-.1 0.0
66-6-.00006 0.0 # Several points in order to avoid ringing in the spline interpolation
66-6-.00004 0.0
66-6-.00003 0.0
66-6-.00001 0.0
66-6 0.0
66-6+0.0003 0.0005
66-6+0.0006 0.001
66-6+0.006 0.01
66-0.006 9.99
66-0.0006 9.999

```

```

66-0.0003  9.9995
66      10.0      # 20 dip on high rail
66+0.0003  9.9995      # 6 m semi-span
66+0.0006  9.999
66+0.006   9.99
66+6-0.006  0.01
66+6-0.0006  0.001
66+6-0.0003  0.0005
66+6      0.0
66+6+.00001  0.0
66+6+.00003  0.0
66+6+.00004  0.0
66+6+.00006  0.0
Xtrac_stop 0.0
func intpl_r spv_trac      # track gauge in mm
-100.0      1435.
Xtrac_stop 1435.
func intpl_r fi_trac      # cant in mm
-100.0      0.0
-10.0      0.0
-9.0      0.0
-8.0      0.0
0.0      0.0
66-6-.1      0.0
66-6-.00006  0.0      # Several points in order to avoid ringing in the spline interpolation
66-6-.00004  0.0
66-6-.00003  0.0
66-6-.00001  0.0
66-6      0.0
66-6+0.0003 -0.001
66-6+0.0006 -0.002
66-6+0.006  -0.02
66-0.006  -19.98
66-0.0006 -19.998
66-0.0003 -19.999
66      -20.0      # 20 dip on high rail
66+0.0003  -19.999      # 6 m semi-span
66+0.0006  -19.998
66+0.006   -19.98
66+6-0.006  -0.02
66+6-0.0006 -0.002
66+6-0.0003 -0.001
66+6      0.0
66+6+.00001  0.0
66+6+.00003  0.0
66+6+.00004  0.0
66+6+.00006  0.0
Xtrac_stop 0.0
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "track_V120a" # }}{
func const YMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 1400.
func const Xtrac_stop= 3100.
func intpl_track_irr2 Xtrac_start Xtrac_stop track/track_V120a.trax Track_Gauge
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "track_V120b" # }}{
func const YMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 1050.
func const Xtrac_stop= 3000.
func intpl_track_irr2 Xtrac_start Xtrac_stop track/track_V120b.trax Track_Gauge
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "track_V160a" # }}{
func const YMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 700.
func const Xtrac_stop= 4200.
func intpl_track_irr2 Xtrac_start Xtrac_stop track/track_V160a.trac Track_Gauge
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "track_V200a" # }}{
func const YMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities

```

```

func const GMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 0.
func const Xtrac_stop= 4997.
func intpl_track_irr2 Xtrac_start Xtrac_stop track/track_V200a.trac Track_Gauge
elseif_then_char_init ctrack_irreg .eq. "Real_track" # }}
func const YMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Lateral irregularities
func const ZMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Vertical irregularities
func const GMtrac= 1e-3      # From mm to m; Scale factor 1.00; Gauge irregularities
func const CMtrac= 1e-3/(2*bo_) # From mm to rad; Scale factor 1.00; Cant irregularities
func const Xtrac_start= 1427400.
func const Xtrac_stop= 1428200.
func intpl_track_irr3 Xtrac_start Xtrac_stop track/Kra_Rgn_040930.trac_wdesign 1435
ro_trac_design f_trac_design z_trac_design

else
func print06_char_init " "
func print06_char_init " ***ERROR*** In Input Reading"
func print06_char_init " Unvalid value given for character variable ctrack_irreg"
func stop
endif # }}
s_var scalar_0 Xtrac_start # Save start coordinate as a scalar for post processing
s_var scalar_0 Xtrac_stop # Save stop coordinate as a scalar for post processing
#### Modify track gauge
##[-]{ =====
# 2) Manually by defining the variables gauge_average and gauge_dev
func const gauge_average= 1435. # Gauge to be removed from the track irregularity file
# func const gauge_dev_=-0.004 # Make the track 4 mm tighter
# func const gauge_dev_=0.000 # Do not change the gauge
func const gauge_dev_=0.004 # Make the track 4 mm wider
##[-]}
#[-]} -----

# func const Curve_TC_beg1= 40+Xtrac_start # Beginning of transition curve
# func const Curve_TC_end1= 160+Xtrac_start # End of transition curve
# s_var scalar_0 Curve_TC_beg1 # Store for evaluation
# s_var scalar_0 Curve_TC_end1 # of PCT
#[-]} -----

#### Wheel-rail geometry functions
#### =====
func char ckpfr= WP4_bv50i30_mb1i30_r
#[-]{
if_then_char_init ckpfr .eq. "ckona_fl" # {{
func copy_init lambda0= 0.025 # Rail inclination 1/40
func copy_init lambda = 0.30 # Effective conicity
s_var scalar_0 lambda
func operp_init epsilon= 50.7 * ( lambda - lambda0 ) # Contact angle difference parameter
insert file $genkpf/kpf_ckona_fl.kpfr
in_substruct kpf_ckona [ " " lambda lambda0 epsilon ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "rkona"
insert file $genkpf/kpf_rkona.kpfr
in_substruct kpf_rkona [ " " lambda ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "P8_EN54E3i20"
insert file $genkpf/EPSt30.0_EN54E3i20.kpfr
in_substruct EPSt30.0_EN54E3i20 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "ENS1002t32.5_uic60i20"
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_uic60i20.kpfr
in_substruct ENS1002t32.5_uic60i20 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "ENS1002t32.5_uic60i30"
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_uic60i30.kpfr
in_substruct ENS1002t32.5_uic60i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "ENS1002t32.5_uic60i40"
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_uic60i40.kpfr
in_substruct ENS1002t32.5_uic60i40 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "ENS1002t32.5_bv50i30"
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_bv50i30.kpfr
in_substruct ENS1002t32.5_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "S1002t32.5_bv50i30"

```



```

insert file $genkpf/S1002t32.5_bv50i30.kpfr
in_substruct S1002t32.5_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30"
insert file kpfr/WP4_bv50i30.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "P8_uic60i40"
insert file kpfr/P8_uic60i40.kpfr
in_substruct P8_uic60i40 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "P8_uic60i20"
insert file kpfr/P8_uic60i20.kpfr
in_substruct P8_uic60i20 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_r075"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_r075.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_r085"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_r085.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_r100"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_r100.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30 [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_mb1i30_l"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_mb1i30_l.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30_mb1i30_l [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_mb1i30_r"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_mb1i30_r.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30_mb1i30_r [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_mb1i30_l_150k"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_mb1i30_l_150k.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30_mb1i30_l [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "WP4_bv50i30_mb1i30_r_150k"
insert file kpfr/WP4_bv50i30_mb1i30_r_150k.kpfr
in_substruct WP4_bv50i30_mb1i30_r [ " " ]
#
elseif_then_char_init ckpfr .eq. "Variable_W/R-geom"
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_uic60i40.kpfr
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_bv50i30_worm_left3.kpfr
insert file $genkpf/ENS1002t32.5_bv50i30_worm_right3.kpfr
in_substruct ENS1002t32.5_uic60i40 [ tang_track ]
in_substruct ENS1002t32.5_bv50i30_worm_left3 [ right_curve ]
in_substruct ENS1002t32.5_bv50i30_worm_right3 [ left_curve ]
func kpfr_variable_1 " " -100.0 tang_track
0.0 tang_track
5.0 right_curve
495.0 right_curve
505.0 left_curve
1000.0 left_curve
1005.0 tang_track
3000.0 tang_track
#
else
func print06_char_init " "
func print06_char_init " ***ERROR*** In Input Reading"
func print06_char_init " Unvalid value given for character variable ckpfr"
func stop
endif # }}
#[-]} -----
#### Wheelset model (same for all vehicles)
#[-]{ =====
##
## Create wheelsets
## =====
substruct create_axl [
mass m_rigid_6 axl_$1 lsa_$1 0.0. -ro_$1 ma_$1 ma_$1 ma_$1 Jfa_$1 Jka_$1 Jpa_$1
constr fix_free_1 axl_$1.k= 0.
# initval set_var axl_$1.vk= -Vo/ro_$1 ]

```

```

#[-]} -----
### Track model (same for all vehicles)
#[-]{ =====
#
func const mu_ = 0.4      # Coefficient of friction between wheel and rail
func const kzrtF0_ = 0.  # Vertical prestress force rail - track
## Calculation of creep and creepforces between wheels and rails
## =====
substruct wr_coupl_pe3 [
func wr_coupl_pe3m
#
$1          # Name/number of the wheelset
lsa_$1     # Name of the linear local coordinate system
#
lat_trac  vert_trac  spv_trac  fi_trac  # Track irregularities memory fields
YMtrac  ZMtrac  GMtrac  # Multiplication factors for track irregularities
gauge_average      # Average gauge of spv_trac
gauge_dev_$1      # Modify average gauge for a different conicity
0                  # Type of contact normal to the contact surface
#
axl_$1          # Body wheel right side
axl_$1          # Body wheel left side
trc_$1          # Body track right side
trc_$1          # Body track left side
ro_$1r         # Nominal wheel radius right wheel
84e6           # kyrt_$1r  # Lateral stiffness rail - track
kzrt_$1r       # kzcr_$1r  # Vertical stiffness rail - track
kzrtF0_$1r     # kzcrF0_$1r  # Vertical prestress force rail - track
19.5e3         # cyrt_$1r  # Lateral damping rail - track
152e3          # czrt_$1r  # Vertical damping rail - track
bo_$1r         # Lateral semi-distance to nominal running circle, right side
ro_$1l         # Nominal wheel radius left wheel
84e6           # kyrt_$1l  # Lateral stiffness rail - track
kzrt_$1l       # kzcr_$1l  # Vertical stiffness rail - track
kzrtF0_$1l     # kzcrF0_$1l  # Vertical prestress force rail - track
19.5e3         # cyrt_$1r  # Lateral damping rail - track
152e3          # czrt_$1r  # Vertical damping rail - track
-bo_$1l        # Lateral semi-distance to nominal running circle, left side
cp1_$1r        # Name of contact point #1 right side
trc_$1 cp1_$1r.ksi cp1_$1r.bo 0. # Contact on track
axl_$1 0. cp1_$1r.bo 0. # Contact on wheel/wheelset
mu_$1r1        # Coefficient of friction
2.05e11 .3     # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$1r1/.6 mu_$1r1/.6 mu_$1r1/.6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0. 2400e6      # Prestress force and stiffness normal to the surface
cp1_$1l        # Name of contact point #1 left side
trc_$1 cp1_$1l.ksi cp1_$1l.bo 0. # Contact on track
axl_$1 0. cp1_$1l.bo 0. # Contact on wheel/wheelset
mu_$1l1        # Coefficient of friction
2.05e11 .3     # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$1l1/.6 mu_$1l1/.6 mu_$1l1/.6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0. 2400e6      # Prestress force and stiffness normal to the surface
cp2_$1r        # Name of contact point #2 right side
trc_$1 cp2_$1r.ksi cp2_$1r.bo 0. # Contact on track
axl_$1 0. cp2_$1r.bo 0. # Contact on wheel/wheelset
mu_$1r2        # Coefficient of friction
2.05e11 .3     # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$1r2/.6 mu_$1r2/.6 mu_$1r2/.6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0. 2400e6      # Prestress force and stiffness normal to the surface
cp2_$1l        # Name of contact point #2 left side
trc_$1 cp2_$1l.ksi cp2_$1l.bo 0. # Contact on track
axl_$1 0. cp2_$1l.bo 0. # Contact on wheel/wheelset
mu_$1l2        # Coefficient of friction
2.05e11 .3     # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$1l2/.6 mu_$1l2/.6 mu_$1l2/.6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0. 2400e6      # Prestress force and stiffness normal to the surface
cp3_$1r        # Name of contact point #3 right side
trc_$1 cp3_$1r.ksi cp3_$1r.bo 0. # Contact on track
axl_$1 0. cp3_$1r.bo 0. # Contact on wheel/wheelset
mu_$1r3        # Coefficient of friction
2.05e11 .3     # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$1r3/.6 mu_$1r3/.6 mu_$1r3/.6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0. 2400e6      # Prestress force and stiffness normal to the surface
cp3_$1l        # Name of contact point #3 left side
trc_$1 cp3_$1l.ksi cp3_$1l.bo 0. # Contact on track

```

```

axl_$1 0.    cp3_$1.bo 0.    # Contact on wheel/wheelset
mu_$113    # Coefficient of friction
2.05e11 .3 # Modulus of elasticity and Poisson's ratio
mu_$113/6 mu_$113/6 mu_$113/6 # Creepage reduction due to contaminated rail surface
0.         2400e6    # Prestress force and stiffness normal to the surface ]
##
## Animate track irregularities in GPlot
## =====
substruct animate_rails [ # $1= axl.no; $2= 1/r; $3= +/-
mass fixpoint_6 rail_$1$2 lsa_$1 0. $3bo_0.
no_warning func copy rail_$1$2.y= tral$1$2.y
no_warning func copy rail_$1$2.z= tral$1$2.z
no_warning func copy rail_$1$2.k= tral$1$2.k
no_warning func copy rail_$1$2.p= tral$1$2.p
if_then_char_init CalcType .ne. GLPLOT
body box_mass rail_$1$2 0.5 -.5 0.0325 -.0325 0.172 0.
endif ]
## Calculate wear and RCF indexes
## =====
substruct wear_RCF [
func fl_wear_w $1 mu_cp1$1 mu_cp2$1 mu_cp3$1
s_var var_0 cpa_$1.Fnu s_var var_0 cp1_$1.Fnu s_var var_0 cp2_$1.Fnu s_var var_0 cp3_$1.Fnu
s_var var_0 cpa_$1.FMnu s_var var_0 cp1_$1.FMnu s_var var_0 cp2_$1.FMnu s_var var_0 cp3_$1.FMnu
func lpass2q_0 cp1_$1.FMnuq= cp1_$1.FMnu 3.7
func max2 cp1_$1.FMnul= cp1_$1.FMnu cp1_$1.FMnuq
s_var sngl cp1_$1.FMnul
if_then_init .exist. cp2_$1.FMnu
func lpass2q_0 cp2_$1.FMnuq= cp2_$1.FMnu 3.7
func max2 cp2_$1.FMnul= cp2_$1.FMnu cp2_$1.FMnuq
else
func const cp2_$1.FMnul= 0.
endif
s_var sngl cp2_$1.FMnul
if_then_init .exist. cp3_$1.FMnu
func lpass2q_0 cp3_$1.FMnuq= cp3_$1.FMnu 3.7
func max2 cp3_$1.FMnul= cp3_$1.FMnu cp3_$1.FMnuq
else
func const cp3_$1.FMnul= 0.
endif
s_var sngl cp3_$1.FMnul
## Name whe_ Stress Van Stress Limit ForceLlim Cp1 Cp2 Cp3
func rolling_fatigue_3 RCF_$1 $1 300e6 0.32 0. 125 175 4000 cp1_$1.FMnul cp2_$1.FMnul cp3_$1.FMnul
## Surface fatigue index Subsurface fatigue index Deep subsurface fatigue index
s_var sngl RCF_$1.FPs s_var sngl RCF_$1.FPb s_var sngl RCF_$1.FPd
s_var sngl RCF_$1.FPs1 s_var sngl RCF_$1.FPs1
s_var sngl RCF_$1.FPs2 s_var sngl RCF_$1.FIs2
s_var sngl RCF_$1.FPs3 s_var sngl RCF_$1.FIs
func operp RCF_$1.FPbm= RCF_$1.FPb / 450e6 - 1
s_var sngl RCF_$1.FPbm ]
## Track-pieces (t)
## =====
func const myt_ = 2e3*2.5*2.5*1.36 # Density 2e3 kg/m^2
func const mzt_ = myt_
#
func const myt_ = 690 # New definition of the track - Saeed-Nebojsa
func const mzt_ = 750

substruct create_trc [
mass m_rigid_6f trc_$1 lsa_$1 0.0.0. 0. myt_$1 mzt_$1 `mzt_$1*(2.5^2+2.5^2)/12` 0.0.
constr fix_rigid_1 trc_$1 x 0. # constr fix_rigid_1 trc_$1 z 0.
constr fix_rigid_1 trc_$1 k 0. constr fix_rigid_1 trc_$1 p 0. ]

## Coupling trc - grd
## =====
func const kytg= 40e6 # Lateral stiffness under ballast
func const cytg= 2*.55*sqrt(kytg*myt_) # Lateral damping under ballast
substruct create_trc_couplz [
coupl p_lin kztg_$2= kmbaF0_$2-(ma_$2+mzt_$2)/2*9.81 220e6 # Vertical stiffness under ballast
func const cztg_$2= 2*0.36*sqrt(kztg_$2.v1*mzt_/2) # Vertical damping under ballast
coupl k3 kztg$2r trc_$2 0. bo_0.55 grd_$2 0. bo_0.55 kytg kytg kztg_$2r .3 .5 esys_$1 m
coupl k3 kztg$2l trc_$2 0. -bo_0.55 grd_$2 0. -bo_0.55 kytg kytg kztg_$2r .3 .5 esys_$1 m
coupl kc cztg$2r trc_$2 0. bo_0.55 grd_$2 0. bo_0.65 `2*pi*91*cztg_$2` cztg_$2 esys_$1 z
coupl kc cztg$2l trc_$2 0. -bo_0.55 grd_$2 0. -bo_0.65 `2*pi*91*cztg_$2` cztg_$2 esys_$1 z
coupl kc cytg$2 trc_$2 0. 0.2 0.172 grd_$2 0. -.2 0.172 `2*pi*72*cytg` cytg esys_$1 y ]

```

```

#[-]} -----
## Graphical figures
## -----
substruct body_bolster_3PB [ # $1= Name of bolster beam
body opengl_mass bol_$1 .20 .78 .78 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 4
  0.220 bsfr_$1+.070 -.535+hycg_$1 # Bottom
  -.220 bsfr_$1+.070 -.535+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1-.070 -.535+hycg_$1
  -.220 -bsfr_$1-.070 -.535+hycg_$1
  0. 0. 1.
  0. 0. 1.
  0. 0. 1.
  0. 0. 1.
body opengl_mass bol_$1 .20 .78 .78 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 20 # Top
  0.220 bsfr_$1+.070 -.662+hycg_$1 -.220 bsfr_$1+.070 -.662+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1-.070 -.662+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1-.070 -.662+hycg_$1
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
  0. .7 -.7 0. .7 -.7
  0. .7 -.7 0. .7 -.7
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
  0. -.7 -.7 0. -.7 -.7
  0. -.7 -.7 0. -.7 -.7
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
  0. 0. -1. 0. 0. -1.
body opengl_mass bol_$1 .20 .78 .78 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 12 # Front
  0.220 bsfr_$1+.070 -.662+hycg_$1 0.220 bsfr_$1+.070 -.535+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1 0.220 bsfr_$1-.120 -.535+hycg_$1
  0.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1 0.220 bsfr_$1-.325 -.535+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1 0.220 -bsfr_$1+.325 -.535+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1 0.220 -bsfr_$1+.120 -.535+hycg_$1
  0.220 -bsfr_$1-.070 -.662+hycg_$1 0.220 -bsfr_$1-.070 -.535+hycg_$1
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
  1. 0. 0. 1. 0. 0.
body opengl_mass bol_$1 .20 .78 .78 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 12 # Back
  -.220 bsfr_$1+.070 -.662+hycg_$1 -.220 bsfr_$1+.070 -.535+hycg_$1
  -.220 bsfr_$1-.120 -.662+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.120 -.535+hycg_$1
  -.220 bsfr_$1-.325 -.800+hycg_$1 -.220 bsfr_$1-.325 -.535+hycg_$1
  -.220 -bsfr_$1+.325 -.800+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.325 -.535+hycg_$1
  -.220 -bsfr_$1+.120 -.662+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1+.120 -.535+hycg_$1
  -.220 -bsfr_$1-.070 -.662+hycg_$1 -.220 -bsfr_$1-.070 -.535+hycg_$1
  -1. 0. 0. -1. 0. 0.
  -1. 0. 0. -1. 0. 0.
  -1. 0. 0. -1. 0. 0.
  -1. 0. 0. -1. 0. 0.
  -1. 0. 0. -1. 0. 0.
  -1. 0. 0. -1. 0. 0. ]
substruct body_wedge_3PB [ # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
body opengl_mass wedge_$1 1. 0. 0. 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_TRIANGLE_STRIP 5
  $2-.098 0.065 0.050
  $20.007 0.065 -.100 # out side of wedge
  $20.007 0.065 0.050
  $20.034 0.065 -.100
  $20.034 0.065 0.050
  0. 1. 0.
  0. 1. 0. # out side of wedge
  0. 1. 0.

```

```

0. 1. 0.
0. 1. 0.
body opengl_mass wedge_$1 1. 0. 0. 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_TRIANGLE_STRIP 5
$2-.098 -.065 0.050
$20.007 -.065 -.100 # in side of wedge
$20.007 -.065 0.050
$20.034 -.065 -.100
$20.034 -.065 0.050
0. -1. 0.
0. -1. 0. # out side of wedge
0. -1. 0.
0. -1. 0.
0. -1. 0.
body opengl_mass wedge_$1 1. 0. 0. 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 4
$20.034 0.065 -.100 # Friction side of wedge
$20.034 0.065 0.050
$20.034 -.065 -.100
$20.034 -.065 0.050
1. 0. 0.
1. 0. 0.
1. 0. 0.
1. 0. 0.
body opengl_mass wedge_$1 1. 0. 0. 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 4
$20.007 0.065 -.100 # Contact to bolster beam
$2-.098 0.065 0.050
$20.007 -.065 -.100
$2-.098 -.065 0.050
-.7 0. -.7
-.7 0. -.7
-.7 0. -.7
-.7 0. -.7]
substruct body_sfr_3PB [ # $1= Name of side-frame, $2 Side (+=right / -=left)
body opengl_mass sfr_$1 .16 .63 .47 1. # Red Green Blue Transparency
  GL_QUAD_STRIP 42
0.362 .080 -.160+hscg_$1 0.362 -.080 -.160+hscg_$1 # Bottom front
0.362 .080 -.160+hscg_$1 0.362 -.080 -.160+hscg_$1
0.730 .080 -.507+hscg_$1 0.730 -.080 -.507+hscg_$1
aba_$1-.130 .080 -.388+hscg_$1 aba_$1-.130 -.080 -.388+hscg_$1
aba_$1-.130 .080 -.677+hscg_$1 aba_$1-.130 -.080 -.677+hscg_$1 # Rubber pad
aba_$1+.130 .080 -.677+hscg_$1 aba_$1+.130 -.080 -.677+hscg_$1
aba_$1+.130 .080 -.388+hscg_$1 aba_$1+.130 -.080 -.388+hscg_$1 # Sharp corner
aba_$1+.130 .080 -.388+hscg_$1 aba_$1+.130 -.080 -.388+hscg_$1
aba_$1+.235 .080 -.683+hscg_$1 aba_$1+.235 -.080 -.683+hscg_$1
aba_$1+.100 .080 -.833+hscg_$1 aba_$1+.100 -.080 -.833+hscg_$1 # Top front
-aba_$1-.100 .080 -.833+hscg_$1 -aba_$1-.100 -.080 -.833+hscg_$1 # Top rear
-aba_$1-.235 .080 -.683+hscg_$1 -aba_$1-.235 -.080 -.683+hscg_$1
-aba_$1-.130 .080 -.388+hscg_$1 -aba_$1-.130 -.080 -.388+hscg_$1
-aba_$1-.130 .080 -.388+hscg_$1 -aba_$1-.130 -.080 -.388+hscg_$1 # Sharp corner
-aba_$1-.130 .080 -.677+hscg_$1 -aba_$1-.130 -.080 -.677+hscg_$1
-aba_$1+.130 .080 -.677+hscg_$1 -aba_$1+.130 -.080 -.677+hscg_$1 # Rubber pad
-aba_$1+.130 .080 -.388+hscg_$1 -aba_$1+.130 -.080 -.388+hscg_$1
-0.730 .080 -.507+hscg_$1 -0.730 -.080 -.507+hscg_$1
-0.362 .080 -.160+hscg_$1 -0.362 -.080 -.160+hscg_$1
-0.362 .080 -.160+hscg_$1 -0.362 -.080 -.160+hscg_$1 # Bottom rear
0.362 .080 -.160+hscg_$1 0.362 -.080 -.160+hscg_$1 # Bottom front
0. 0. 1. 0. 0. 1. # Bottom front
.7 0. .7 .7 0. .7
0. 0. 1. 0. 0. 1.
1. 0. 0. 1. 0. 0.
0. 0. 1. 0. 0. 1. # Rubber pad
0. 0. 1. 0. 0. 1.
-1. 0. 0. -1. 0. 0. # Sharp corner
.8 0. .6 .8 0. .6
1. 0. 0. 1. 0. 0.
0. 0. -1. 0. 0. -1. # Top front
0. 0. -1. 0. 0. -1. # Top rear
-1. 0. 0. -1. 0. 0.
-.8 0. .6 -.8 0. .6
1. 0. 0. 1. 0. 0. # Sharp corner
0. 0. 1. 0. 0. 1.
0. 0. 1. 0. 0. 1. # Rubber pad
-1. 0. 0. -1. 0. 0.

```



```

0. 0. 1. 0. 0. 1.
1. 0. 0. 1. 0. 0.
1. 0. 0. 1. 0. 0.
body opengl_mass sfr_$1 .16 .63 .47 1. # Surface below the springs
GL_QUAD_STRIP 4
-.225 $2.080 -.290+hscg_$1
0.225 $2.080 -.290+hscg_$1
-.225 $2.080 -.160+hscg_$1
0.225 $2.080 -.160+hscg_$1
0. $21. 0.
0. $21. 0.
0. $21. 0.
0. $21. 0.
body opengl_mass sfr_$1 .16 .63 .47 1. # Surface above the springs
GL_QUAD_STRIP 4
-.225 $2.080 -.833+hscg_$1
0.225 $2.080 -.833+hscg_$1
-.225 $2.080 -.750+hscg_$1
0.225 $2.080 -.750+hscg_$1
0. $21. 0.
0. $21. 0.
0. $21. 0.
0. $21. 0.]

#[-]} -----
#### Lengths of the vehicles
#[-]{ =====
##
## Kockum's 3PB Iron Ore Wagon
## -----
func const buff.A_ = 10.597/2 # Distance car-mid to coupler
func const buff.A_2 = 10.597/2 # Distance car-mid to coupler
func const acb_ = 6.744/2 # half bogie pivot distance (longitudinal)
#[-]} -----
#### Freight loads
#[-]{ =====
func const hlcg = 2.193 # centre of gravity position of load, vertical
func const ml_ = 0 #102100 #98400 #75465 # weight of load
func const Jfl_1 = ml_1*(1.5^2+0.3^2)/3 # roll inertia, m*(1.5^2+h^2)/3
func const Jkl_1 = ml_1*(0.3^2+(acb_2+1.5)^2)*2/9 # pitch inertia, m*(h^2+a^2)/3
func const Jpl_1 = ml_1*(acb_2+1.5)^2+1.5^2)*2/9 # yaw inertia, m*(a^2+1.5^2)/3
#[-]} -----
#### Speed and Euler coordinate systems
#[-]{ =====
##
## Speed profile read from an external file
## -----
func intpl_r Speed_field insert free_form '(a,a)' track/Speed.txt # Vo speed in m/s
# func copy Vo= esys_2.vx
# func mul vkmh= esys_2.vx 3.6
## Manually define the speed
## -----
# func const Y_cp= 0.50*sign(CurveRadius) # lateral acc. in track plane
# func const vkmh= 3.6*sqrt(CurveRadius*(Y_cp+CurveCant/(2*bo_)*9.81))
#
# func const vkmh= 10 # Speed in km/h
# func const vkmh= 40 # Speed in km/h
func const vkmh= 80 # Speed in km/h
# func operp vkmh= 140 - 5 * time # Vary vkmh in order to calculate critical speed
func div Vo = vkmh 3.6 # The speed of the vehicle in m/s
# func intpl_r Speed_field insert free_form '(a,a)' track/PB1_brzina.dat # Vo speed in m/s

lsys e_abs_bends esys_1 Vo `Xtrac_start - buff.A_2`
ro_trac_design f_trac_design z_trac_design
# 4 4 4 4
6

s_var var_0 vkmh # Save vkmh for post processing
s_var sngl esys_1.b s_var sngl esys_1.c
s_var sngl esys_1.x s_var sngl esys_1.y s_var sngl esys_1.z
#[-]} -----
#### Vehicle models
#[-]{ =====
#### Kockum's 3PB Iron Ore Wagon

```

```

##[-]{ =====
substruct vhe_model_3PB [ # $1= Number of the vehicle
#
func const aba_$1= 1.778/2 # Wheelset longitudinal semi-distance
func const bsfr_$1= 2.007/2 # Side-frame lateral semi-distance
## Vehicle bodies
## -----
## Carbody (c)
func const hfloor_$1= 1.0 # floor level
func const hccg_$1= 1.37 # centre of gravity position of empty vehicle, vertical
func const mc_$1= 10536 # weight of empty body
func const Jfc_$1= `mc_$1*(1.5^2 + 0.3^2) /3` # roll inertia, m*(b^2+h^2)/3
func const Jkc_$1= `mc_$1*(0.3^2 + (acb_$1+1.5)^2)*2/9` # pitch inertia, m*(h^2+a^2)/3
func const Jpc_$1= `mc_$1*((acb_$1+1.5)^2 + 1.5^2) *2/9` # yaw inertia, m*(a^2+b^2)/3
# func const mc_$1= mc_tara+ml_$1 # weight of vehicle
# func const hccg_$1= (mc_tara*hccg_tara+ml_$1*hlcg_$1)/mc_$1 # centre of gravity position of loaded vehicle, vertical
# func const Jfc_$1= Jfc_tara+mc_tara*(hccg_$1-hccg_tara)^2+Jfl_$1+ml_$1*(hccg_$1-hlcg_$1)^2
# func const Jkc_$1= Jkc_tara+mc_tara*(hccg_$1-hccg_tara)^2+Jkl_$1+ml_$1*(hccg_$1-hlcg_$1)^2
# func const Jpc_$1= Jpc_tara+Jpl_$1
## Bolster beam (y)
func const hycg_$1= 0.75 # centre of gravity position, vertical
func const my_$1= 1050 # mass
func const Jfy_$1= 347 # moment of inertia, roll - values from QR
func const Jky_$1= 43 # moment of inertia, pitch - values from QR
func const Jpy_$1= 363 # moment of inertia, yaw - values from QR
## Wedges (w)
func const wedge.A_$1= 0.191 #
func const wedge.B_$1= bsfr_$1 #
func const wedge.H_$1= 0.600 #
## Side frames (s)
func const hscg_$1= 0.51 # centre of gravity position, vertical - values from QR
func const ms_$1= 400 # mass
func const Jfs_$1= 73 # moment of inertia, roll - values from Fuji Xia PhD
func const Jks_$1= 365 # moment of inertia, pitch - values from Fuji Xia PhD
func const Jps_$1= 335 # moment of inertia, yaw - values from Fuji Xia PhD
## Axle (a)
func const ro_$1= 0.915/2 # centre of gravity pos., vert. (wheel radius)
func const ma_$1= 1341 # mass
func const Jfa_$1= 322.7 # moment of inertia, roll - values from QR
func const Jka_$1= 100 # moment of inertia, pitch - values from QR
func const Jpa_$1= 322.7 # moment of inertia, yaw - values from QR
## Secondary suspension: Centerplate btw car-body and bolster beam
## -----
func const kzcyc.H_$1= 0.850 # Height from top of rail [m]
func const kxcyc.mu_$1= 0.50 # Coefficient of friction in sides of centerplate
func const kzcyc.mu_$1= 0.15*2/3 # Effective coefficient of friction in bottom of centerplate
func const kpcyc.ro_$1= 0.355/2 # Outer radius of centerplate [m]
coupl p_lin36 kzcyc_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 40e6 0. 0. 0. 0. # Only lateral stiffness
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
coupl p_nlin kxcyfb_$1= 0. # Front part of center plate
-1.007 -40e6 # Negative force when bolster beam
-.007 0. # travels in negative direction
1. 0.
coupl p_nlin kxcyfb_$1= 0. # Rear part of center plate
-1. 0. # Positive force when bolster beam
0.007 0. # travels in positive direction
1.007 40e6
coupl p_lin kfcyc_$1= 0. 40.e6 # Friction serie stiffness [N/m]
coupl p_nlin kzcyc_$1= 0.
0. -9.81*mc_$1/2/4 # Nominal tara load
9.81*mc_$1/2/4/40e6 0. # Center Plate cannot take tension force
1 0.
coupl p_lin36 czcy_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0. # Material damping 5%
.10*sqrt(40e6*mc_$1/2) 0. 0. 0. 0. 0.
0. .10*sqrt(40e6*mc_$1/2) 0. 0. 0. 0. # 2*set= c/sqrt(k*m)
0. 0. .10*sqrt(40e6*mc_$1/2) 0. 0. 0.
0. 0. 0. .10*sqrt(2*40e6*kpcyc.ro_$1^2*Jfy_$1) 0. 0.
0. 0. 0. 0. .10*sqrt(2*40e6*kpcyc.ro_$1^2*Jky_$1) 0.
0. 0. 0. 0. 0. .10*sqrt(2*40e6*kpcyc.ro_$1^2*Jpy_$1)

```



```

coupl p_lin kf2xycy_$1 = 0. 40.e6          # Friction serie stiffness [N/m]

## Secondary suspension: Side bearers btw car-body and bolster beam
## -----
func const SideBearer.H_$1= .842          # Height
func const SideBearer.B_$1 = 0.635        # Side bearers lateral semi-distance
func const SideBearer.mu_$1= 0.3          # Friction coeff side bearers
coupl p_nlin kxSideBearer_$1= 0.0
      -0.001001 -480          # longitudinal stiffness
      -0.001 -380
      0.001 380
      0.001001 480
coupl p_lin kySideBearer_$1= 0.0 380e3     # lateral stiffness
coupl p_nlin kzSideBearer_$1= -21500
      -1.0 -10e6             # vertical stiffness
      -0.032 -20400
      0.016 10200
      1.032 10400

## Secondary coil springs (kzys)
## -----
func const kzys.B_$1= bsfr_$1            # lateral semi-distance
func const kzys.H_$1= 0.535              # Upper surface of springs according to drawing
func const kcoilSpring.hs_$1= 0.260      # height of coil springs under bolster beam
## Definition of the stiffness of the springs in the secondary suspension
## -----
coupl p_lin kxys_$1= 0.0 1.4e6/(4+5+7)    # Secondary coil springs shear stiffness
coupl p_lin kyys_$1= 0.0 1.4e6/(4+5+7)    # distribute the shear stiffness equally to on all coil springs
coupl p_lin36 cmys_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0. # Damping
      5e3 0. 0. 0. 0. 0.
      0. 5e3 0. 0. 0. 0. # 2*set= c/sqrt(k*m)
      0. 0. 10e3 0. 0. 0.
      0. 0. 0. 0. 0. 0.
      0. 0. 0. 0. 0. 0.
      0. 0. 0. 0. 0. 0.

## Warp stiffness between bolster and sideframe
## -----
func const kfbosf.fo_$1 = 1500
coupl p_lin kfbosfp.k1_$1= 0. 1200        ## Definition of the yaw stiffness
coupl p_lin kfbosfp.k2_$1= 0. 120

## Longitudinal stops btw bolster beam and side frames
## -----
func const kxysst.B_$1= 1.
func const kxysst.H_$1= ro_$1+.090
coupl p_nlin_st kxysst_$1= 0.0 .001 20e6
## Lateral stops btw bolster beam and side frames
## -----
func const kyysst.B_$1= bsfr_$1          # lateral semi-distance
func const kyysst.H_$1= ro_$1+.090      # height above rail level
coupl p_nlin_st kyysst_$1= 0.0 .00975 20e6
# Secondary friction wedges
func const kzyw.A_$1= 0.191 # Contact btw bolster & wedges
func const kzyw.B_$1= bsfr_$1
func const kzyw.H_$1= 0.600
# coupl p_lin kzyw_$1 = -k3zwsF0/0.588 30e6 # Contact stiffness
coupl p_lin kzyw_$1 = 0. 30e6 # Contact stiffness
func const kfxyw.mu_$1= 0.25             # Friction coeff inside wedge
coupl p_lin kfxyw_$1 = 0.0 30e6          # Friction series stiffness
func const kxws.A_$1= 0.191 # Contact btw wedges & side-frame
func const kxws.B_$1= bsfr_$1
func const kxws.H_$1= 0.600
coupl p_lin kxws_$1= 0. 30e6             # Contact stiffness between wedge and wear plate on side frame
func const kf2yzws.mu_$1= 0.25          # Friction coeff wedge wear surface
coupl p_lin kf2yws_$1= 0.0 30e6         # Lateral friction series stiffness
coupl p_lin kf2zws_$1= 0.0 30e6         # Vertical friction series stiffness
func const k3zws.A_$1= 0.191           # Coil springs under wedges
func const k3zws.B_$1= bsfr_$1
func const k3zws.H_$1= 0.600
func const kcoilUnderWedge.hs_$1= 0.260+0.0127 # Springs under wedges 0.5" higher than under bolster beam
coupl p_lin k3xws_$1= 0. 40e3
coupl p_lin k3yws_$1= 0. 40e3
func const kmyw.A_$1= 0.191 # Contact btw bolster & wedges
func const kmyw.B_$1= bsfr_$1 # lateral and rotation
func const kmyw.H_$1= 0.700
coupl p_lin36 kmyw_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0.

```

```

0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 2e7 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 2e7 0. 0.
0. 0. 0. 0. 2e7 0.
0. 0. 0. 0. 0. 2e7
# Primary springs (kmba)
func const kmba.B_$1= bsfr_$1 # lateral semi-distance
func const kmba.H_$1= ro_$1 # Stiffnesses given at the equivalent height ro_$1
func const kmbaF0_$1= -9.81*(mc_$1+2*my_$1+4*ms_$1)/8 # Pre-load force at tara load
coupl p_lin36 kmba_$1= 0. 0. kmbaF0_$1 0. 0. 0. # Primary suspension
.9e6 0. 0. 0. 0. 0.
0. 1e6 0. 0. 0. 0.
0. 0. 30e6 0. 0. 0.
0. 0. 0. 100e3 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
coupl p_lin36 cmba_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0. # Material damping 20%
8e3 0. 0. 0. 0. 0.
0. 8e3 0. 0. 0. 0. # 2*set= c/sqrt(k*m)
0. 0. 70e3 0. 0. 0.
0. 0. 0. 2e3 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
# Primary stops, Longitudinal (kxbast)
func const kxbast.H_$1= ro_$1+.090 # bumpstop position, vertical
coupl p_nlin_st kxbast_$1= 0. 0. .0016 20e6
# Primary stops, Lateral (kybast)
func const kybast.H_$1= ro_$1+.090 # bumpstop position, vertical
coupl p_nlin_st kybast_$1= 0. 0. .0032 20e6
## lsys l_local l_name esys a b h
## -----
lsys l_local lsc_$1 esys_$1 0.0 0.0 0.0
lsys l_local lsb_$11 lsc_$1 acb_$1 0.0 0.0
lsys l_local lsb_$12 lsc_$1 -acb_$1 0.0 0.0
lsys l_local lsa_$111 lsb_$11 aba_$11 0.0 0.0
lsys l_local lsa_$112 lsb_$11 -aba_$11 0.0 0.0
lsys l_local lsa_$121 lsb_$12 aba_$12 0.0 0.0
lsys l_local lsa_$122 lsb_$12 -aba_$12 0.0 0.0
## mass m_rigid_6 m_name lsys acg bcg hcg m m m Jf Jk Jp
## -----
if_then_init ml_$1 .gt. 0
mass m_rigid_6 load_$1 lsc_$1 0.0 0.0 -hlcg_$1 ml_$1 ml_$1 ml_$1 Jfl_$1 Jkl_$1 Jpl_$1
endif
mass m_rigid_6 car_$1 lsc_$1 0.0 0.0 -hccg_$1 mc_$1 mc_$1 mc_$1 Jfc_$1 Jkc_$1 Jpc_$1
mass m_rigid_6 bol_$11 lsb_$11 0.0 0.0 -hycg_$11 my_$11 my_$11 my_$11 Jfy_$11 Jky_$11 Jpy_$11
mass m_rigid_6 sfr_$11r lsb_$11 0.0 bsfr_$11r -hscg_$11r ms_$11r ms_$11r ms_$11r Jfs_$11r Jks_$11r Jps_$11r
mass m_rigid_6 sfr_$11l lsb_$11 0.0 -bsfr_$11l -hscg_$11l ms_$11l ms_$11l ms_$11l Jfs_$11l Jks_$11l Jps_$11l
mass m_rigid_6 bol_$12 lsb_$12 0.0 0.0 -hycg_$12 my_$12 my_$12 my_$12 Jfy_$12 Jky_$12 Jpy_$12
mass m_rigid_6 sfr_$12r lsb_$12 0.0 bsfr_$12r -hscg_$12r ms_$12r ms_$12r ms_$12r Jfs_$12r Jks_$12r Jps_$12r
mass m_rigid_6 sfr_$12l lsb_$12 0.0 -bsfr_$12l -hscg_$12l ms_$12l ms_$12l ms_$12l Jfs_$12l Jks_$12l Jps_$12l
#Wedges on Leading bogie
mass massless12 wedge_$111r lsb_$11 wedge.A_$1 wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10 # Massless mass,
mass massless12 wedge_$111l lsb_$11 wedge.A_$1 -wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
mass massless12 wedge_$112r lsb_$11 -wedge.A_$1 wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
mass massless12 wedge_$112l lsb_$11 -wedge.A_$1 -wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
#Wedges on Trailing bogie
mass massless12 wedge_$121r lsb_$12 wedge.A_$1 wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10 # Massless mass,
mass massless12 wedge_$121l lsb_$12 wedge.A_$1 -wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
mass massless12 wedge_$122r lsb_$12 -wedge.A_$1 wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
mass massless12 wedge_$122l lsb_$12 -wedge.A_$1 -wedge.B_$1 -wedge.H_$1 1e-6 75 10
## Create wheelsets
## =====
in_substruct create_axl [ $111 ]
in_substruct create_axl [ $112 ]
in_substruct create_axl [ $121 ]
in_substruct create_axl [ $122 ]
## Create track-pieces
## =====
in_substruct create_trc [ $111 ]
in_substruct create_trc [ $112 ]
in_substruct create_trc [ $121 ]
in_substruct create_trc [ $122 ]
mass fixpoint_6 grd_$1 lsc_$1 0.0 0.0 0.0
mass fixpoint_6 grd_$111 lsa_$111 0.0 0.0 0.0

```

```

mass fixpoint_6 grd_$112 lsa_$112 0.0 0.0 0.0
mass fixpoint_6 grd_$121 lsa_$121 0.0 0.0 0.0
mass fixpoint_6 grd_$122 lsa_$122 0.0 0.0 0.0
## Acceleration response points on carbody floor
## =====
## func accp_bodyf f_name m_name a b h
## -----
func accp_bodyf car_$1b1 car_$1 acb_$1 0.0 -hfloor_$1
func accp_bodyf car_$1.m car_$1 0.0 0.0 -hfloor_$1
func accp_bodyf car_$1b2 car_$1 -acb_$1 0.0 -hfloor_$1
## Position points for gauging
## =====
##
## func pos_rlsys2 f_name m_name lsys a b h
## -----
# func pos_rlsys2 car_$1b1 car_$1 lsb_$11 acb_$1 1.5 -1.0
# func pos_rlsys2 car_$1b2 car_$1 lsb_$12 -acb_$1 1.5 -1.0
## Graphical representation of the bodies
## =====
## Car-body
## -----
if_then_char_init CalcType .eq. GLPLOT # {{
if_then_init ml_$1 .gt. 0
body opengl2_mass load_$1 1. .5 .5 1. # Red Green Blue Transparency
box acb_$1-aba_$1-ro_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.3 +1.5 -1.5
endif
body opengl2_mass car_$1 .5 .7 1. 1. # Red Green Blue Transparency
box buff.A_$1-.25 -(buff.A_$1-.25) 1.5 -1.5 +0.25 -.25
in_substruct body_bolster_3PB [ $11 ] # $1= Name of bolster beam
in_substruct body_bolster_3PB [ $12 ] # $1= Name of bolster beam
in_substruct body_sfr_3PB [ $11r + ] # $1= Name of side-frame
in_substruct body_sfr_3PB [ $11l - ]
in_substruct body_sfr_3PB [ $12r + ]
in_substruct body_sfr_3PB [ $12l - ]
# Leading bogie
in_substruct body_wedge_3PB [ $111r + ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $111l + ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $112r - ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $112l - ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
# Trailing bogie
in_substruct body_wedge_3PB [ $121r + ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $121l + ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $122r - ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
in_substruct body_wedge_3PB [ $122l - ] # $1= Name of wedge $2= (+=forward / -=backward)
else # }}
if_then_init ml_$1 .gt. 0
body box_mass load_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.3 +1.5 -1.5
endif
body box_mass_522 car_$1 buff.A_$1-.25 -(buff.A_$1-.25) 1.5 -1.5 0.25 -.25
body box_lsys bol_$11 lsb_$11 0.220 -0.220 bsfr_$11+.060 -bsfr_$11-.060 -.535 -0.9
body box_lsys bol_$12 lsb_$12 0.220 -0.220 bsfr_$12+.060 -bsfr_$12-.060 -.535 -0.9
body box_mass sfr_$11r 1.1 -1.1 .080 -.080 .1 -.1
body box_mass sfr_$12r 1.1 -1.1 .080 -.080 .1 -.1
body box_mass sfr_$11l 1.1 -1.1 .080 -.080 .1 -.1
body box_mass sfr_$12l 1.1 -1.1 .080 -.080 .1 -.1
endif # }}
## Wheelsets
## -----
body whe_set_mass axl_$111 ro_$111 bo_
body whe_set_mass axl_$112 ro_$112 bo_
body whe_set_mass axl_$121 ro_$121 bo_
body whe_set_mass axl_$122 ro_$122 bo_
## Track-pieces
## -----
if_then_char_init CalcType .ne. GLPLOT
body box_mass trc_$111 0.5 -0.5 1.2675 -1.2675 0.340 0.172
body box_mass trc_$112 0.5 -0.5 1.2675 -1.2675 0.340 0.172
body box_mass trc_$121 0.5 -0.5 1.2675 -1.2675 0.340 0.172
body box_mass trc_$122 0.5 -0.5 1.2675 -1.2675 0.340 0.172
endif
##### Couplings between the masses
###[-]{ =====
## Rubber bushings btw load & car
## =====
if_then_init ml_$1 .gt. 0 # {{

```

```

coupl p_lin36 kload_$1= 0. 0. -ml_$1*9.81/4 0. 0. 0.
10e6 0. 0. 0. 0. 0.
0. 10e6 0. 0. 0. 0.
0. 0. 10e6 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
coupl p_lin36 cload_$1= 0. 0. 0. 0. 0. 0.
.20*kload_$1.xx/pi/9 0. 0. 0. 0. 0.
0. .20*kload_$1.yy/pi/9 0. 0. 0. 0.
0. 0. .20*kload_$1.zz/pi/9 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
0. 0. 0. 0. 0. 0.
coupl k kload$1lf # Stiffness left front
load_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
kload_$1lf esys_$1 m # Property and direction of action
coupl k kload$1rf # Stiffness right front
load_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
kload_$1rf esys_$1 m # Property and direction of action
coupl k kload$1lb # Stiffness left back
load_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
kload_$1lb esys_$1 m # Property and direction of action
coupl k kload$1rb # Stiffness right back
load_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
kload_$1rb esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c cload$1lf # Stiffness left front
load_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
cload_$1lf esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c cload$1rf # Stiffness right front
load_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 acb_$1-aba_$1-ro_$1 1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
cload_$1rf esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c cload$1lb # Stiffness left back
load_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 -1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
cload_$1lb esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c cload$1rb # Stiffness right back
load_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.4 # Body #1 and its attachment point
car_$1 -acb_$1+aba_$1+ro_$1 1.3 -1.4 # Body #2 and its attachment point
cload_$1rb esys_$1 m # Property and direction of action
endif # }}
## Center plates btw car & bolster beam
## =====
coupl k kzcycy$11f # Front Vert.stiffness
car_$1 acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcycy_$11f esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcycy$11r # Right Vert.stiffness
car_$1 acb_$1 kpcy.ro_$1 -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 0. kpcy.ro_$1 -kzcycy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcycy_$11r esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcycy$11l # Left Vert.stiffness
car_$1 acb_$1 -kpcy.ro_$1 -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 0. -kpcy.ro_$1 -kzcycy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcycy_$11l esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcycy$11b # Back Vert.stiffness
car_$1 acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 -kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcycy_$11b esys_$1 z # Property and direction of action
func mul kzcycy$11f.Ffr= kzcycy$11f.F2z kzcycy.mu_$1 s_var sngl kzcycy$11f.Ffr
func mul kzcycy$11r.Ffr= kzcycy$11r.F2z kzcycy.mu_$1 s_var sngl kzcycy$11r.Ffr
func mul kzcycy$11l.Ffr= kzcycy$11l.F2z kzcycy.mu_$1 s_var sngl kzcycy$11l.Ffr
func mul kzcycy$11b.Ffr= kzcycy$11b.F2z kzcycy.mu_$1 s_var sngl kzcycy$11b.Ffr
coupl kf2 kf2xycy$11f # Front 2-dim friction
car_$1 acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 kpcy.ro_$1 0. -kzcycy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xycy_$11f kf2xycy_$11f kzcycy$11f.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xycy$11r # Right 2-dim friction
car_$1 acb_$1 kpcy.ro_$1 -kzcycy.H_$1 # Body #1 and its attachment point

```

```

bol_$11 0. kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xyxy_$11r kf2xyxy_$11r kzcy$11r.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xyxy$11l # Left 2-dim friction
car_$1 acb_$1 -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 0. -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xyxy_$11l kf2xyxy_$11l kzcy$11l.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xyxy$11b # Back 2-dim friction
car_$1 acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xyxy_$11b kf2xyxy_$11b kzcy$11b.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
s_var sngl kf2xyxy$11f.F2x s_var sngl kf2xyxy$11f.F2y s_var sngl kf2xyxy$11f.M2p
s_var sngl kf2xyxy$11r.F2x s_var sngl kf2xyxy$11r.F2y s_var sngl kf2xyxy$11r.M2p
s_var sngl kf2xyxy$11l.F2x s_var sngl kf2xyxy$11l.F2y s_var sngl kf2xyxy$11l.M2p
s_var sngl kf2xyxy$11b.F2x s_var sngl kf2xyxy$11b.F2y s_var sngl kf2xyxy$11b.M2p
# Friction on front end of center plate
coupl k kxcy$11f # Long.stiffness
car_$1 acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kxcyf_$11f esys_$1 x # Property and direction of action
func mul kxcy$11f.Ffr= kxcy$11f.F2x kxcy.mu_$1 # Breakout friction force, positive on bolster beam
coupl kf kfycy$11f # Name
car_$1 acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kfxcy_$11f kxcy$11f.Ffr esys_$1 y # Property and direction of action
s_var sngl kxcy$11f.dx s_var sngl kxcy$11f.F2x
s_var sngl kfycy$11f.dy s_var sngl kfycy$11f.F2y
# Friction on back end of center plate
coupl k kxcy$11b # Long.stiffness
car_$1 acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kxcyb_$11b esys_$1 x # Property and direction of action
func mul kxcy$11b.Ffr= kxcy$11b.F1x kxcy.mu_$1 # Breakout friction force, positive on car-body
coupl kf kfycy$11b # Name
car_$1 acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kfxcy_$11b kxcy$11b.Ffr esys_$1 y # Property and direction of action
s_var sngl kxcy$11b.dx s_var sngl kxcy$11b.F2x
s_var sngl kfycy$11b.dy s_var sngl kfycy$11b.F2y

coupl k kcy$11 # Lat.stiffness
car_$1 acb_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$11 0. 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kcy_$11 esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c czcy$11 # Small material viscous damping in all directions
car_$1 acb_$1 0. -kzcy.H_$1
bol_$11 0. 0. -kzcy.H_$1
czcy_$11 esys_$1 m

# Second bogie
coupl k kzcy$12f # Front Vert.stiffness
car_$1 -acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcy_$12f esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcy$12r # Right Vert.stiffness
car_$1 -acb_$1 kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 0. kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcy_$12r esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcy$12l # Left Vert.stiffness
car_$1 -acb_$1 -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 0. -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcy_$12l esys_$1 z # Property and direction of action
coupl k kzcy$12b # Back Vert.stiffness
car_$1 -acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kzcy_$12b esys_$1 z # Property and direction of action
func mul kzcy$12f.Ffr= kzcy$12f.F2z kzcy.mu_$1 s_var sngl kzcy$12f.Ffr
func mul kzcy$12r.Ffr= kzcy$12r.F2z kzcy.mu_$1 s_var sngl kzcy$12r.Ffr
func mul kzcy$12l.Ffr= kzcy$12l.F2z kzcy.mu_$1 s_var sngl kzcy$12l.Ffr
func mul kzcy$12b.Ffr= kzcy$12b.F2z kzcy.mu_$1 s_var sngl kzcy$12b.Ffr
coupl kf2 kf2xyxy$12f # Front 2-dim friction
car_$1 -acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xyxy_$12f kf2xyxy_$12f kzcy$12f.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xyxy$12r # Right 2-dim friction
car_$1 -acb_$1 kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point

```

```

bol_$12 0. kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xycy_$12r kf2xycy_$12r kzcy$12r.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xycy$12l # Left 2-dim friction
car_$1 -acb_$1 -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 0. -kpcy.ro_$1 -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xycy_$12l kf2xycy_$12l kzcy$12l.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
coupl kf2 kf2xycy$12b # Back 2-dim friction
car_$1 -acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kf2xycy_$12b kf2xycy_$12b kzcy$12b.Ffr esys_$1 x y # Property and direction of action
s_var sngl kf2xycy$12f.F2x s_var sngl kf2xycy$12f.F2y s_var sngl kf2xycy$12f.M2p
s_var sngl kf2xycy$12r.F2x s_var sngl kf2xycy$12r.F2y s_var sngl kf2xycy$12r.M2p
s_var sngl kf2xycy$12l.F2x s_var sngl kf2xycy$12l.F2y s_var sngl kf2xycy$12l.M2p
s_var sngl kf2xycy$12b.F2x s_var sngl kf2xycy$12b.F2y s_var sngl kf2xycy$12b.M2p
# Friction on front end of center plate
coupl k kxcy$12f # Long.stiffness
car_$1 -acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kxcyf_$12f esys_$1 x # Property and direction of action
func mul kxcy$12f.Ffr= kxcy$12f.F2x kxcy.mu_$1 # Breakout friction force, positive on bolster beam
coupl kf kfycy$12f # Name
car_$1 -acb_$1+kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kfxcy_$12f kxcy$12f.Ffr esys_$1 y # Property and direction of action
s_var sngl kxcy$12f.dx s_var sngl kxcy$12f.F2x
s_var sngl kfycy$12f.dy s_var sngl kfycy$12f.F2
# Friction on back end of center plate
coupl k kxcy$12b # Long.stiffness
car_$1 -acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kxcyb_$12b esys_$1 x # Property and direction of action
func mul kxcy$12b.Ffr= kxcy$12b.F1x kxcy.mu_$1 # Breakout friction force, positive on car-body
coupl kf kfycy$12b # Name
car_$1 -acb_$1-kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 -kpcy.ro_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kfxcy_$12b kxcy$12b.Ffr esys_$1 y # Property and direction of actio
s_var sngl kxcy$12b.dx s_var sngl kxcy$12b.F2x
s_var sngl kfycy$12b.dy s_var sngl kfycy$12b.F2y
coupl k kycy$12 # Lat.stiffness
car_$1 -acb_$1 0. -kzcy.H_$1 # Body #1 and its attachment point
bol_$12 0. 0. -kzcy.H_$1 # Body #2 and its attachment point
kycy_$12 esys_$1 m # Property and direction of action
coupl c czcy$12 # Small material damping in all directions
car_$1 -acb_$1 0. -kzcy.H_$1
bol_$12 0. 0. -kzcy.H_$1
czcy_$12 esys_$1 m
## Side bearers
## =====
coupl k kycbs$11r car_$1 acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kySideBearer_$11r esys_$1 y # Leading bogie
coupl k kycbs$11l car_$1 acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kySideBearer_$11l esys_$1 y
coupl k kzcb$11r car_$1 acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kzSideBearer_$11r esys_$1 z
coupl k kzcb$11l car_$1 acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kzSideBearer_$11l esys_$1 z
s_var sngl kzcb$11l.d s_var sngl kzcb$11r.d
s_var sngl kzcb$11l.Fz s_var sngl kzcb$11r.Fz
func mul Fkfs$11r= kzcb$11r.F SideBearer.mu_$1
func abs Fkfs$11r_abs= Fkfs$11r
func mul Fkfs$11l= kzcb$11l.F SideBearer.mu_$1
func abs Fkfs$11l_abs= Fkfs$11l
coupl kf kxcbs$11r car_$1 acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kxSideBearer_$11r Fkfs$11r_abs esys_$1 x
coupl kf kxcbs$11l car_$1 acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$11 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kxSideBearer_$11l Fkfs$11l_abs esys_$1 x
coupl k kycbs$12r car_$1 -acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kySideBearer_$12r esys_$1 y # Trailing bogie
coupl k kycbs$12l car_$1 -acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kySideBearer_$12l esys_$1 y
coupl k kzcb$12r car_$1 -acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kzSideBearer_$12r esys_$1 z
coupl k kzcb$12l car_$1 -acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kzSideBearer_$12l esys_$1 z
s_var sngl kzcb$12l.d s_var sngl kzcb$12r.d

```

```

s_var sngl kzcb$12l.Fz s_var sngl kzcb$12r.Fz
func mul Fkfs$12r= kzcb$12r.F SideBearer.mu_$1
func abs Fkfs$12r_abs= Fkfs$12r
func mul Fkfs$12l= kzcb$12l.F SideBearer.mu_$1
func abs Fkfs$12l_abs= Fkfs$12l

```

```

coupl kf kxcbs$12r car_$1 -acb_$1 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kxSideBearer_$12r Fkfs$12r_abs esys_$1 x
coupl kf kxcbs$12l car_$1 -acb_$1 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1
bol_$12 0.0 -SideBearer.B_$1 -SideBearer.H_$1 kxSideBearer_$12l Fkfs$12l_abs esys_$1 x

```

Secondary suspension: Coil-springs btw bolster and sideframes Inner springs 5 Pieces/side

=====

```

coupl k_coil3 Coil_D5_Inner$11l
bol_$11 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11l 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
5*87500 5*87500 5*1121*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.313*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Inner$11r
bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
5*87500 5*87500 5*1121*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.313*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Inner$12l
bol_$12 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12l 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
5*87500 5*87500 5*1121*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.313*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Inner$12r
bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
5*87500 5*87500 5*1121*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.313*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
s_var sngl Coil_D5_Inner$11l.dz s_var sngl Coil_D5_Inner$11r.dz
s_var sngl Coil_D5_Inner$12l.dz s_var sngl Coil_D5_Inner$12r.dz
s_var sngl Coil_D5_Inner$11l.Fz s_var sngl Coil_D5_Inner$11r.Fz
s_var sngl Coil_D5_Inner$12l.Fz s_var sngl Coil_D5_Inner$12r.Fz

```

Secondary suspension: Coil-springs btw bolster and sideframes Outer springs 7 Pieces/side

=====

```

coupl k_coil3 Coil_D5_Outer$11l
bol_$11 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11l 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
7*87500 7*87500 7*2242*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.250*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Outer$11r
bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
7*87500 7*87500 7*2242*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.250*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Outer$12l
bol_$12 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12l 0.0 -kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
7*87500 7*87500 7*2242*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.250*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_D5_Outer$12r
bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1+0.260
7*87500 7*87500 7*2242*0.453592*9.81/.0254 0.0 0.0.
10.250*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
s_var sngl Coil_D5_Outer$11l.dz s_var sngl Coil_D5_Outer$11r.dz
s_var sngl Coil_D5_Outer$12l.dz s_var sngl Coil_D5_Outer$12r.dz
s_var sngl Coil_D5_Outer$11l.Fz s_var sngl Coil_D5_Outer$11r.Fz
s_var sngl Coil_D5_Outer$12l.Fz s_var sngl Coil_D5_Outer$12r.Fz
coupl c cmys$11l bol_$11 0. -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11l 0. -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 # Material damping in coil springs
cmys_$11l esys_$1 m
coupl c cmys$11r bol_$11 0. kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$11r 0. kzys.B_$1 -kzys.H_$1
cmys_$11r esys_$1 m
coupl c cmys$12l bol_$12 0. -kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12l 0. -kzys.B_$1 -kzys.H_$1
cmys_$12l esys_$1 m
coupl c cmys$12r bol_$12 0. kzys.B_$1 -kzys.H_$1 sfr_$12r 0. kzys.B_$1 -kzys.H_$1
cmys_$12r esys_$1 m

```

Secondary suspension: Longitudinal stops btw bolster and sideframes

=====

```

coupl k kxysst$11r bol_$11 0.0 kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 sfr_$11r 0.0 kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 kxysst_$11r esys_$1 x
coupl k kxysst$11l bol_$11 0.0 -kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 sfr_$11l 0.0 -kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 kxysst_$11l esys_$1 x
coupl k kxysst$12r bol_$12 0.0 kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 sfr_$12r 0.0 kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 kxysst_$12r esys_$1 x
coupl k kxysst$12l bol_$12 0.0 -kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 sfr_$12l 0.0 -kxysst.B_$1 -kxysst.H_$1 kxysst_$12l esys_$1 x
# s_var sngl kxysst$11r.d # Displacement in stops
s_var sngl kxysst$11l.d
s_var sngl kxysst$11r.d
s_var sngl kxysst$12l.d
s_var sngl kxysst$12r.d
s_var sngl kxysst$11r.F # Forces in stops
s_var sngl kxysst$11l.F

```

```

s_var snl kyysst$12r.F
s_var snl kyysst$12l.F
## Secondary suspension: Lateral stops btw bolster and sideframes
## =====
## coupl k c_name body1 a1 b1 h1 body2 a2 b2 h2 prop esys dire
# -----
coupl k kyysst$11r bol_$11 0.0 kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 sfr_$11r 0.0 kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 kyysst_$11r esys_$1 y
coupl k kyysst$111 bol_$11 0.0 -kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 sfr_$111 0.0 -kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 kyysst_$111 esys_$1 y
coupl k kyysst$12r bol_$12 0.0 kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 sfr_$12r 0.0 kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 kyysst_$12r esys_$1 y
coupl k kyysst$12l bol_$12 0.0 -kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 sfr_$12l 0.0 -kyysst.B_$1 -kyysst.H_$1 kyysst_$12l esys_$1 y
s_var snl kyysst$11r.d # Displacement in stops
s_var snl kyysst$11l.d
s_var snl kyysst$12r.d
s_var snl kyysst$12l.d
s_var snl kyysst$11r.F # Forces in stops
s_var snl kyysst$11l.F
s_var snl kyysst$12r.F
s_var snl kyysst$12l.F
## c_name body1 a1 b1 h1 prop_1 esys dire
## -----
func operp kzyw$111.k= bol_$11.k + 0.91630 # 0.91630 [rad] = 52.5[deg]
func operp kzyw$112.k= bol_$11.k - 0.91630
func operp kzyw$121.k= bol_$12.k + 0.91630
func operp kzyw$122.k= bol_$12.k - 0.91630
#Leading bogie
coupl k_r kzyw$111r bol_$11 kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$111r kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$111r esys_$1 z 0 kzyw$111.k 0
coupl k_r kzyw$111l bol_$11 kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$111l kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$111l esys_$1 z 0 kzyw$111.k 0
coupl k_r kzyw$112r bol_$11 -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$112r -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$112r esys_$1 z 0 kzyw$112.k 0
coupl k_r kzyw$112l bol_$11 -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$112l -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$112l esys_$1 z 0 kzyw$112.k 0
#Trailing bogie
coupl k_r kzyw$121r bol_$12 kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$121r kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$121r esys_$1 z 0 kzyw$121.k 0
coupl k_r kzyw$121l bol_$12 kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$121l kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$121l esys_$1 z 0 kzyw$121.k 0
coupl k_r kzyw$122r bol_$12 -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$122r -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$122r esys_$1 z 0 kzyw$122.k 0
coupl k_r kzyw$122l bol_$12 -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$122l -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kzyw_$122l esys_$1 z 0 kzyw$122.k 0
####Leading bogie
func operp kfxyw_$111r.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$111r.Fz # Available friction force in contact surfaces
func operp kfxyw_$112r.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$112r.Fz
func l_lim kfxyw_$111r.Ffr= 0.
func l_lim kfxyw_$112r.Ffr= 0.
s_var var_0 kfxyw_$111r.Ffr
s_var var_0 kfxyw_$112r.Ffr
func operp kfxyw_$111l.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$111l.Fz # Available friction force in contact surfaces
func operp kfxyw_$112l.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$112l.Fz
func l_lim kfxyw_$111l.Ffr= 0.
func l_lim kfxyw_$112l.Ffr= 0.
s_var var_0 kfxyw_$111l.Ffr
s_var var_0 kfxyw_$112l.Ffr
#Friction surface btw. bolster & wedge
coupl kf_r kfxyw$111r bol_$11 kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$111r kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfxyw_$111r kfxyw_$111r.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$111.k 0
coupl kf_r kfxyw$112r bol_$11 -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$112r -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfxyw_$112r kfxyw_$112r.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$112.k 0
coupl kf_r kfxyw$111l bol_$11 kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$111l kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfxyw_$111l kfxyw_$111l.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$111.k 0
coupl kf_r kfxyw$112l bol_$11 -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$112l -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfxyw_$112l kfxyw_$112l.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$112.k 0
s_var var_0 kfxyw$111r.p
s_var var_0 kfxyw$112r.p
s_var var_0 kfxyw$111l.p
s_var var_0 kfxyw$112l.p
s_var var_0 kfxyw$111l.F1x
s_var var_0 kfxyw$111l.F1y
s_var var_0 kfxyw$111l.F1z
####Trailing bogie
func operp kfxyw_$121r.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$121r.Fz # Available friction force in contact surfaces
func operp kfxyw_$122r.Ffr= kfxyw.mu_$1 * -kzyw$122r.Fz
func l_lim kfxyw_$121r.Ffr= 0.

```



```

func l_lim kfyw_$122r.Ffr= 0.
s_var var_0 kfyw_$121r.Ffr
s_var var_0 kfyw_$122r.Ffr
func operp kfyw_$1211.Ffr= kfyw.mu_$1 * -kzyw$1211.Fz # Available friction force in contact surfaces
func operp kfyw_$1221.Ffr= kfyw.mu_$1 * -kzyw$1221.Fz
func l_lim kfyw_$1211.Ffr= 0.
func l_lim kfyw_$1221.Ffr= 0.
s_var var_0 kfyw_$1211.Ffr
s_var var_0 kfyw_$1221.Ffr
#Friction surface btw. bolster & wedge
coupl kf_r kfyw$121r bol_$12 kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$121r kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfyw_$121r kfyw_$121r.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$121.k 0
coupl kf_r kfyw$122r bol_$12 -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$122r -kzyw.A_$1 kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfyw_$122r kfyw_$122r.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$122.k 0
coupl kf_r kfyw$1211 bol_$12 kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$1211 kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfyw_$1211 kfyw_$1211.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$121.k 0
coupl kf_r kfyw$1221 bol_$12 -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1
wedge_$1221 -kzyw.A_$1 -kzyw.B_$1 -kzyw.H_$1 kfyw_$1221 kfyw_$1221.Ffr esys_$1 x 0 kzyw$122.k 0
s_var var_0 kfyw$121r.p
s_var var_0 kfyw$122r.p
s_var var_0 kfyw$1211.p
s_var var_0 kfyw$1221.p
## Friction surface btw. wedges & side-frame
## =====
## c_name body1 a1 b1 h1 prop_1 esys dire
## -----
## Leading bogie
coupl k kxws$111r wedge_$111r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$111r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$111r esys_$1 x
coupl k kxws$1111 wedge_$1111 kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$1111 kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$1111 esys_$1 x
coupl k kxws$112r wedge_$112r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$112r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$112r esys_$1 x
coupl k kxws$1121 wedge_$1121 -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$1121 -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$1121 esys_$1 x
## Trailing bogie
coupl k kxws$121r wedge_$121r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$121r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$121r esys_$1 x
coupl k kxws$1211 wedge_$1211 kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$1211 kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$1211 esys_$1 x
coupl k kxws$122r wedge_$122r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$122r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$122r esys_$1 x
coupl k kxws$1221 wedge_$1221 -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$1221 -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kxws_$1221 esys_$1 x
func operp kf2yzws_$111r.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * -kxws$111r.Fx # Available friction force in contact surfaces - leading and
trailing bogie!!!!
func operp kf2yzws_$112r.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * kxws$112r.Fx
func operp kf2yzws_$121r.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * -kxws$121r.Fx
func operp kf2yzws_$122r.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * kxws$122r.Fx
func l_lim kf2yzws_$111r.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$112r.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$121r.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$122r.Ffr= 0.
s_var var_0 kf2yzws_$111r.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$112r.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$121r.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$122r.Ffr
#Store normal contact force in gp file
s_var var_0 kxws$111r.Fx
s_var var_0 kxws$112r.Fx
s_var var_0 kxws$121r.Fx
s_var var_0 kxws$122r.Fx
func operp kf2yzws_$1111.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * -kxws$1111.Fx # Available friction force in contact surfaces
func operp kf2yzws_$1121.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * kxws$1121.Fx
func operp kf2yzws_$1211.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * -kxws$1211.Fx
func operp kf2yzws_$1221.Ffr= kf2yzws.mu_$1 * kxws$1221.Fx
func l_lim kf2yzws_$1111.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$1121.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$1211.Ffr= 0.
func l_lim kf2yzws_$1221.Ffr= 0.
s_var var_0 kf2yzws_$1111.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$1121.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$1211.Ffr
s_var var_0 kf2yzws_$1221.Ffr
#Store normal contact force in gp file

```

```

s_var var_0 kxws$111.Fx
s_var var_0 kxws$112.Fx
s_var var_0 kxws$121.Fx
s_var var_0 kxws$122.Fx
## Leading bogie
coupl kf2 kf2yzws$111r wedge_$111r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$11r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$111r kf2zws_$111r kf2yzws_$111r.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$111l wedge_$111l kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$11l kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$111l kf2zws_$111l kf2yzws_$111l.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$112r wedge_$112r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$11r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$112r kf2zws_$112r kf2yzws_$112r.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$112l wedge_$112l -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$11l -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$112l kf2zws_$112l kf2yzws_$112l.Fftr esys_$1 y z
## Trailing bogie
coupl kf2 kf2yzws$121r wedge_$121r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$12r kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$121r kf2zws_$121r kf2yzws_$121r.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$121l wedge_$121l kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$12l kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$121l kf2zws_$121l kf2yzws_$121l.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$122r wedge_$122r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$12r -kxws.A_$1 kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$122r kf2zws_$122r kf2yzws_$122r.Fftr esys_$1 y z
coupl kf2 kf2yzws$122l wedge_$122l -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1
sfr_$12l -kxws.A_$1 -kxws.B_$1 -kxws.H_$1 kf2yws_$122l kf2zws_$122l kf2yzws_$122l.Fftr esys_$1 y z
s_var var_0 kf2yzws$111r.p1
s_var var_0 kf2yzws$111l.p1 # Save variables for post-processing
s_var var_0 kf2yzws$112r.p1
s_var var_0 kf2yzws$112l.p1
s_var var_0 kf2yzws$111r.p2
s_var var_0 kf2yzws$111l.p2
s_var var_0 kf2yzws$112r.p2
s_var var_0 kf2yzws$112l.p2
s_var var_0 kf2yzws$121r.p1
s_var var_0 kf2yzws$121l.p1
s_var var_0 kf2yzws$122r.p1
s_var var_0 kf2yzws$122l.p1
s_var var_0 kf2yzws$121r.p2
s_var var_0 kf2yzws$121l.p2
s_var var_0 kf2yzws$122r.p2
s_var var_0 kf2yzws$122l.p2
s_var var_0 kf2yzws$111r.F2y s_var var_0 kf2yzws$111r.F2z
s_var var_0 kf2yzws$112r.F2y s_var var_0 kf2yzws$112r.F2z
s_var var_0 kf2yzws$121r.F2y s_var var_0 kf2yzws$121r.F2z
s_var var_0 kf2yzws$122r.F2y s_var var_0 kf2yzws$122r.F2z
s_var var_0 kf2yzws$111l.F2y s_var var_0 kf2yzws$111l.F2z
s_var var_0 kf2yzws$112l.F2y s_var var_0 kf2yzws$112l.F2z
s_var var_0 kf2yzws$121l.F2y s_var var_0 kf2yzws$121l.F2z
s_var var_0 kf2yzws$122l.F2y s_var var_0 kf2yzws$122l.F2z
s_var gpdatt_force1 kf2yzws$111r.F2z
s_var gpdatt_force1 kf2yzws$112r.F2z
s_var gpdatt_force1 kf2yzws$111l.F2z
s_var gpdatt_force1 kf2yzws$112l.F2z ### Staviti sve sile
## Yaw stiffness of the three piece bogie - spring connecting bolster and side frame
=====
coupl k kbosf$11r bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$11r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k2_$1 esys_$1 p
coupl kf kfbosf$11r bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$11r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k1_$1 kfbosf.fo_$1 esys_$1
coupl k kbosf$11l bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$11l 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k2_$1 esys_$1 p
coupl kf kfbosf$11l bol_$11 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$11l 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k1_$1 kfbosf.fo_$1 esys_$1 p

coupl k kbosf$12r bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$12r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k2_$1 esys_$1 p
coupl kf kfbosf$12r bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$12r 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k1_$1 kfbosf.fo_$1 esys_$1 p

coupl k kbosf$12l bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
sfr_$12l 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
kfbosfp.k2_$1 esys_$1 p

```

```

coupl kf      kfbosf$12l bol_$12 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
              sfr_$12l 0.0 kzys.B_$1 -kzys.H_$1
              kfbosfp.k1_$1 kfbosf.fo_$1 esys_$1 p
## Coil Springs btw wedges & side-frames
## =====
coupl k_coil3 Coil_5062$111l
  wedge_$111l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$111l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$111r
  wedge_$111r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$112l
  wedge_$112l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$112r
  wedge_$112r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$121l # Trailing bogie - coil springs btw. wedges & side-frame
  wedge_$121l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$12l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$121r
  wedge_$121r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$12r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$122l
  wedge_$122l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$12l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5062$122r
  wedge_$122r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$12r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 996*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.563*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
s_var var_0 Coil_5062$111l.dz s_var var_0 Coil_5062$111r.dz
s_var var_0 Coil_5062$112l.dz s_var var_0 Coil_5062$112r.dz
s_var var_0 Coil_5062$121l.dz s_var var_0 Coil_5062$121r.dz
s_var var_0 Coil_5062$122l.dz s_var var_0 Coil_5062$122r.dz
s_var var_0 Coil_5062$111l.F1z s_var var_0 Coil_5062$111r.F1z
s_var var_0 Coil_5062$112l.F1z s_var var_0 Coil_5062$112r.F1z
s_var var_0 Coil_5062$121l.F1z s_var var_0 Coil_5062$121r.F1z
s_var var_0 Coil_5062$122l.F1z s_var var_0 Coil_5062$122r.F1z
coupl k_coil3 Coil_5063$111l
  wedge_$111l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$111r
  wedge_$111r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$112l
  wedge_$112l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$112r
  wedge_$112r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
  sfr_$11r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
  87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
  12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$121l # Trailing bogie - coil springs btw. wedges & side-frame
  wedge_$121l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1

```

```

sfr_$12l k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$121r
wedge_$121r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
sfr_$12r k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$122l
wedge_$122l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
sfr_$12l -k3zws.A_$1 -k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
coupl k_coil3 Coil_5063$122r
wedge_$122r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1
sfr_$12r -k3zws.A_$1 k3zws.B_$1 -k3zws.H_$1+0.260+0.0127
87500 87500 480*0.453592*9.81/.0254 0.0.0.
12.688*.0254 6.563*.0254 .5 esys_$1 m
s_var var_0 Coil_5063$111l.dz s_var var_0 Coil_5063$111r.dz
s_var var_0 Coil_5063$112l.dz s_var var_0 Coil_5063$112r.dz
s_var var_0 Coil_5063$121l.dz s_var var_0 Coil_5063$121r.dz
s_var var_0 Coil_5063$122l.dz s_var var_0 Coil_5063$122r.dz
s_var var_0 Coil_5063$111l.F1z s_var var_0 Coil_5063$111r.F1z
s_var var_0 Coil_5063$112l.F1z s_var var_0 Coil_5063$112r.F1z
s_var var_0 Coil_5063$121l.F1z s_var var_0 Coil_5063$121r.F1z
s_var var_0 Coil_5063$122l.F1z s_var var_0 Coil_5063$122r.F1z
## Lateral, Roll, Pitch Yaw Stiffness btw. bolster & wedges
## =====
coupl k kmyw$111r bol_$11 kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 # Leading bogie
wedge_$111r kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$111r esys_$1 m
coupl k kmyw$111l bol_$11 kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$111l kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$111l esys_$1 m
coupl k kmyw$112r bol_$11 -kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$112r -kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$112r esys_$1 m
coupl k kmyw$112l bol_$11 -kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$112l -kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$112l esys_$1 m
## -----
coupl k kmyw$121r bol_$12 kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 # Trailing bogie
wedge_$121r kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$111r esys_$1 m
coupl k kmyw$121l bol_$12 kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$121l kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$111l esys_$1 m
coupl k kmyw$122r bol_$12 -kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$122r -kmyw.A_$1 kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$112r esys_$1 m
coupl k kmyw$122l bol_$12 -kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1
wedge_$122l -kmyw.A_$1 -kmyw.B_$1 -kmyw.H_$1 kmyw_$112l esys_$1 m
## Spring Plank
## =====
## coupl k c_name body1 a1 b1 h1 body2 a2 b2 h2 prop esys dire
## -----
# coupl k kmss$11r sfr_$11r 0.0. -kmss_H sfr_$11l 0.0. -kmss_H kmss_$11r esys_$1 m
# coupl k kmss$12r sfr_$12r 0.0. -kmss_H sfr_$12l 0.0. -kmss_H kmss_$12r esys_$1 m
## Primary suspension: Rubber pads
## =====
## coupl k c_name body1 a1 b1 h1 body2 a2 b2 h2 prop esys dire
## -----
coupl k kmba$111r sfr_$11r aba_$11 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$111 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$111r esys_$1 m
coupl k kmba$111l sfr_$11l aba_$11 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$111 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$111l esys_$1 m
coupl k kmba$112r sfr_$11r -aba_$11 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$112 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$112r esys_$1 m
coupl k kmba$112l sfr_$11l -aba_$11 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$112 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$112l esys_$1 m
coupl k kmba$121r sfr_$12r aba_$12 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$121 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$121r esys_$1 m
coupl k kmba$121l sfr_$12l aba_$12 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$121 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$121l esys_$1 m
coupl k kmba$122r sfr_$12r -aba_$12 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$122 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$122r esys_$1 m
coupl k kmba$122l sfr_$12l -aba_$12 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$122 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 kmba_$122l esys_$1 m
## coupl c c_name body1 a1 b1 h1 body2 a2 b2 h2 prop esys dire
## -----
coupl c cmba$111r sfr_$11r aba_$11 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$111 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$111r esys_$1 m
coupl c cmba$111l sfr_$11l aba_$11 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$111 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$111l esys_$1 m
coupl c cmba$112r sfr_$11r -aba_$11 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$112 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$112r esys_$1 m
coupl c cmba$112l sfr_$11l -aba_$11 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$112 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$112l esys_$1 m
coupl c cmba$121r sfr_$12r aba_$12 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$121 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$121r esys_$1 m
coupl c cmba$121l sfr_$12l aba_$12 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$121 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$121l esys_$1 m
coupl c cmba$122r sfr_$12r -aba_$12 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$122 0.0 kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$122r esys_$1 m
coupl c cmba$122l sfr_$12l -aba_$12 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 axl_$122 0.0 -kmba.B_$1 -kmba.H_$1 cmba_$122l esys_$1 m
## Primary suspension: Longitudinal stops
## =====

```

```

## coupl k c_name  body1  a1  b1  h1  body2 a2 b2  h2  prop  esys dire
## -----
coupl k kxbast$111r sfr_$11r aba_$11 bsfr_$11r -kxbast.H_$1 axl_$111 0.0 bsfr_$11r -kxbast.H_$1 kxbast_$111r esys_$1 x
coupl k kxbast$112r sfr_$11r -aba_$11 bsfr_$11r -kxbast.H_$1 axl_$112 0.0 bsfr_$11r -kxbast.H_$1 kxbast_$112r esys_$1 x
coupl k kxbast$121r sfr_$12r aba_$12 bsfr_$12r -kxbast.H_$1 axl_$121 0.0 bsfr_$12r -kxbast.H_$1 kxbast_$121r esys_$1 x
coupl k kxbast$122r sfr_$12r -aba_$12 bsfr_$12r -kxbast.H_$1 axl_$122 0.0 bsfr_$12r -kxbast.H_$1 kxbast_$122r esys_$1 x
coupl k kxbast$111l sfr_$11l aba_$11 -bsfr_$11l -kxbast.H_$1 axl_$111 0.0 -bsfr_$11l -kxbast.H_$1 kxbast_$111l esys_$1 x
coupl k kxbast$112l sfr_$11l -aba_$11 -bsfr_$11l -kxbast.H_$1 axl_$112 0.0 -bsfr_$11l -kxbast.H_$1 kxbast_$112l esys_$1 x
coupl k kxbast$121l sfr_$12l aba_$12 -bsfr_$12l -kxbast.H_$1 axl_$121 0.0 -bsfr_$12l -kxbast.H_$1 kxbast_$121l esys_$1 x
coupl k kxbast$122l sfr_$12l -aba_$12 -bsfr_$12l -kxbast.H_$1 axl_$122 0.0 -bsfr_$12l -kxbast.H_$1 kxbast_$122l esys_$1 x
s_var snl kxbast$111r.d # Displacement in stops
s_var snl kxbast$111l.d
s_var snl kxbast$111r.F # Forces in stops
s_var snl kxbast$111l.F
s_var snl kxbast$112r.d
s_var snl kxbast$112l.d
s_var snl kxbast$112r.F
s_var snl kxbast$112l.F
## Primary suspension: Lateral stops
## =====
## coupl k c_name  body1  a1  b1  h1  body2 a2 b2  h2  prop  esys dire
## -----
coupl k kybast$111r sfr_$11r aba_$11 bsfr_$11r -kybast.H_$1 axl_$111 0.0 bsfr_$11r -kybast.H_$1 kybast_$111r esys_$1 y
coupl k kybast$112r sfr_$11r -aba_$11 bsfr_$11r -kybast.H_$1 axl_$112 0.0 bsfr_$11r -kybast.H_$1 kybast_$112r esys_$1 y
coupl k kybast$121r sfr_$12r aba_$12 bsfr_$12r -kybast.H_$1 axl_$121 0.0 bsfr_$12r -kybast.H_$1 kybast_$121r esys_$1 y
coupl k kybast$122r sfr_$12r -aba_$12 bsfr_$12r -kybast.H_$1 axl_$122 0.0 bsfr_$12r -kybast.H_$1 kybast_$122r esys_$1 y
coupl k kybast$111l sfr_$11l aba_$11 -bsfr_$11l -kybast.H_$1 axl_$111 0.0 -bsfr_$11l -kybast.H_$1 kybast_$111l esys_$1 y
coupl k kybast$112l sfr_$11l -aba_$11 -bsfr_$11l -kybast.H_$1 axl_$112 0.0 -bsfr_$11l -kybast.H_$1 kybast_$112l esys_$1 y
coupl k kybast$121l sfr_$12l aba_$12 -bsfr_$12l -kybast.H_$1 axl_$121 0.0 -bsfr_$12l -kybast.H_$1 kybast_$121l esys_$1 y
coupl k kybast$122l sfr_$12l -aba_$12 -bsfr_$12l -kybast.H_$1 axl_$122 0.0 -bsfr_$12l -kybast.H_$1 kybast_$122l esys_$1 y
s_var snl kybast$111r.d # Displacement in stops
s_var snl kybast$111l.d
s_var snl kybast$111r.F # Forces in stops
s_var snl kybast$111l.F
s_var snl kybast$112r.d
s_var snl kybast$112l.d
s_var snl kybast$112r.F
s_var snl kybast$112l.F
###[-] -----
##### Contact between wheels and rails
###[-]{ =====
## Vertical rail-track stiffness
## =====
func add axl_$111.X= lsa_$111.pn axl_$111.x
func add axl_$112.X= lsa_$112.pn axl_$112.x
func add axl_$121.X= lsa_$121.pn axl_$121.x
func add axl_$122.X= lsa_$122.pn axl_$122.x
func operp kzrt_$111= 220e6 # + `220e6*0.15` * sin(`2*pi/.5` * axl_$111.X)
func operp kzrt_$112= 220e6 # + `220e6*0.15` * sin(`2*pi/.5` * axl_$112.X)
func operp kzrt_$121= 220e6 # + `220e6*0.15` * sin(`2*pi/.5` * axl_$121.X)
func operp kzrt_$122= 220e6 # + `220e6*0.15` * sin(`2*pi/.5` * axl_$122.X)
s_var snl kzrt_$111
s_var snl kzrt_$112
s_var snl kzrt_$121
s_var snl kzrt_$122
## Calculation of creep and creepforces between wheels and rails
## =====
in_substruct wr_coupl_pe3 [ $111 ]
in_substruct wr_coupl_pe3 [ $112 ]
in_substruct wr_coupl_pe3 [ $121 ]
in_substruct wr_coupl_pe3 [ $122 ]
## Animate track irregularities in GPLOT
## =====
in_substruct animate_rails [ $111 l - ]
in_substruct animate_rails [ $111 r + ]
in_substruct animate_rails [ $112 l - ]
in_substruct animate_rails [ $112 r + ]
in_substruct animate_rails [ $121 l - ]
in_substruct animate_rails [ $121 r + ]
in_substruct animate_rails [ $122 l - ]
in_substruct animate_rails [ $122 r + ]
## Calculate wear and RCF indexes
## =====
in_substruct wear_RCF [ $1111 ]
in_substruct wear_RCF [ $111r ]

```

```

in_substruct wear_RCF [ $1121 ]
in_substruct wear_RCF [ $112r ]
###[-]} -----
## Couplings between track and ground
## =====
in_substruct create_trc_couplz [ $1 $111 ]
in_substruct create_trc_couplz [ $1 $112 ]
in_substruct create_trc_couplz [ $1 $121 ]
in_substruct create_trc_couplz [ $1 $122 ]
##### Regulate the longitudinal position of the vehicle
###[-]{ =====
## Longitudinal stiffness connecting the carbody to the lsc_$1 coordinate system
## =====
func const mvhe_$1= mc_$1+2*my_$1+4*ms_$1+4*ma_$1+4*Jka_$1/ro_$1^2
coupl k_lin kxcg$1 car_$1 x 0 0 -hccg_$1*.6 grd_$1 x 0 0 -hccg_$1*.6 (2*pi*.25)^2*mvhe_$1 # fo= 0.25[Hz]
coupl c_lin cxcg$1 car_$1 x 0 0 -hccg_$1*.6 grd_$1 x 0 0 -hccg_$1*.6 4*pi*.7*.25*mvhe_$1 # zeta=0.7
## Apply pitch moment on the wheelsets
## =====
# func const fxcg_$1= 0.25
#
# func const Kreg_$1= (2*pi*fxcg_$1)^2*mvhe_$1*ro_$1/4
# func const Creg_$1= 4*pi*.70*fxcg_$1*mvhe_$1*ro_$1/4
# func operp car_x = ( car_$1.x * mc_$1 + bog_$11.x * mb_$11 + bog_$12.x * mb_$12 +
# axl_$111.x * ma_$111 + axl_$112.x * ma_$112 + axl_$121.x * ma_$121 + axl_$122.x * ma_$122 ) / mvhe_$1
# func operp car_vx = ( car_$1.vx * mc_$1 + bog_$11.vx * mb_$11 + bog_$12.vx * mb_$12 +
# axl_$111.vx * ma_$111 + axl_$112.vx * ma_$112 + axl_$121.vx * ma_$121 + axl_$122.vx * ma_$122 ) / mvhe_$1
##
# func mul MtractionK_$1= Kreg_$1 car_x
# func mul MtractionC_$1= Creg_$1 car_vx
# func add Mtraction_$1= MtractionK_$1 MtractionC_$1
# func lpass2_0 MtractionF1_$1= Mtraction_$1 5. .9239 # Second order low pass filter, start value equal to 0(zero)
# func lpass2_0 MtractionF2_$1= MtractionF1_$1 5. .3827 # Second order low pass filter, start value equal to 0(zero)
##
# func incr axl_$111.Mk= MtractionF2_$1
# func incr axl_$112.Mk= MtractionF2_$1
# func incr axl_$121.Mk= MtractionF2_$1
# func incr axl_$122.Mk= MtractionF2_$1
###[-]} -----
###[-]} -----
#[-]} -----
in_substruct vhe_model_3PB [ 1 ]
#### Viscous damper for quasistatic solution
#[-]{ =====
# func const kfxyw.mu_$1 = 0 # For quasi-static calculations
# func const kf2yzws.mu_$1 = 0 # Set friction coefficients in bogie = 0
# func const czcg_$1 = 0.2*2.*sqrt(mc_$1*4.*(4.2E6+2.*0.194E6)) ## Add 20% vertical damping btw. carbody and ground point
# func print06_init czcg_$1 ## Print on screen
# coupl c_lin ccg_$1 car_$1 z 0.0 0.0 0.0
# grd_$1 z 0.0 0.0 0.0 czcg_$1
#[-]} -----
#### Read input data for flexible masses
#[-]{ =====
# if_then_char_init CalcType .ne. NPICKR
# insert file npickr/$IDENT.npickr
# endif
# insert file npickr/tors.npickr # Torsional eigenmode wheelset
#[-]} -----
#### Initial values
#[-]{ =====
if_then_char_init CalcType .eq. TSIM
.or. CalcType .eq. MODAL
initval read_gpdat gp/3PB_LKAB_empty_quasi.gp 2000
initval set_var axl_111.vk= -Vo/ro_111
initval set_var axl_112.vk= -Vo/ro_112
initval set_var axl_121.vk= -Vo/ro_121
initval set_var axl_122.vk= -Vo/ro_122
endif
# if_then_char_init CalcType .eq. QUASI
# initval set_var kf2yzws.mu_$1 = 0.
# endif
#[-]} -----
#### Store variables for postprocessing
#[-]{ =====

```

```

insert file $gensys/calc/insert_files/save_car1.ins # Save variables for carbody
insert file $gensys/calc/insert_files/save_bol1.ins # Save variables for bolster beam
insert file $gensys/calc/insert_files/save_sfr1.ins # Save variables for bogie
insert file $gensys/calc/insert_files/save_bog1.ins # Save variables for bogie
insert file $gensys/calc/insert_files/save_ax11.ins # Save variables for axle
insert file $gensys/calc/insert_files/save_mass_1.ins # Save variables for axle
in_substruct save_mass_1 [ load_2 ]
in_substruct save_car1 [ 1 ]
in_substruct save_bol1 [ 11 ]
in_substruct save_bol1 [ 12 ]
in_substruct save_sfr1 [ 11r ]
in_substruct save_sfr1 [ 111 ]
in_substruct save_sfr1 [ 12r ]
in_substruct save_sfr1 [ 121 ]
in_substruct save_ax11 [ 111 ]
in_substruct save_ax11 [ 112 ]
in_substruct save_ax11 [ 121 ]
in_substruct save_ax11 [ 122 ]
s_var var_0 lsb_11.pn
s_var var_0 lsb_12.p
s_var force_on wedge_1111 x      # Store all forces acting on wedge 1111
s_var force_on wedge_1111 y
s_var force_on wedge_1111
##### Write to GPdat-file for animations in program GPLOT
##[-]{ =====
s_var gpdat_r1      # Create a gp-file for animation in gplot
# s_var gpdat_force1 kzcb11r.F1y
# s_var gpdat_force1 kzcb111.F1y
if_then_init.exist.cp1_111r.Fx
s_var gpdat_force1 cp1_111r.Fx s_var gpdat_force1 cp1_111r.Fy s_var gpdat_force1 cp1_111r.Fz
s_var gpdat_force1 cp1_1111.Fx s_var gpdat_force1 cp1_1111.Fy s_var gpdat_force1 cp1_1111.Fz
s_var gpdat_force1 cp1_112r.Fx s_var gpdat_force1 cp1_112r.Fy s_var gpdat_force1 cp1_112r.Fz
s_var gpdat_force1 cp1_1121.Fx s_var gpdat_force1 cp1_1121.Fy s_var gpdat_force1 cp1_1121.Fz
endif
if_then_init.exist.cp2_111r.Fx
s_var gpdat_force1 cp2_111r.Fx s_var gpdat_force1 cp2_111r.Fy s_var gpdat_force1 cp2_111r.Fz
s_var gpdat_force1 cp2_1111.Fx s_var gpdat_force1 cp2_1111.Fy s_var gpdat_force1 cp2_1111.Fz
s_var gpdat_force1 cp2_112r.Fx s_var gpdat_force1 cp2_112r.Fy s_var gpdat_force1 cp2_112r.Fz
s_var gpdat_force1 cp2_1121.Fx s_var gpdat_force1 cp2_1121.Fy s_var gpdat_force1 cp2_1121.Fz
endif
if_then_init.exist.cp3_111r.Fx
s_var gpdat_force1 cp3_111r.Fx s_var gpdat_force1 cp3_111r.Fy s_var gpdat_force1 cp3_111r.Fz
s_var gpdat_force1 cp3_1111.Fx s_var gpdat_force1 cp3_1111.Fy s_var gpdat_force1 cp3_1111.Fz
s_var gpdat_force1 cp3_112r.Fx s_var gpdat_force1 cp3_112r.Fy s_var gpdat_force1 cp3_112r.Fz
s_var gpdat_force1 cp3_1121.Fx s_var gpdat_force1 cp3_1121.Fy s_var gpdat_force1 cp3_1121.Fz
endif
s_var gpdat_wheel_info 111r lsa_111.b $genkpf/./w_prof/WP4/WP4t32.5_2004.wheel
s_var gpdat_wheel_info 1111 lsa_111.b $genkpf/./w_prof/WP4/WP4t32.5_2004.wheel
s_var gpdat_wheel_info 112r lsa_112.b $genkpf/./w_prof/WP4/WP4t32.5_2004.wheel
s_var gpdat_wheel_info 1121 lsa_112.b $genkpf/./w_prof/WP4/WP4t32.5_2004.wheel
if_then_char_init ckpfr.eq."Variable_W/R-geom"
s_var gpdat_rail_info_right -100 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
0 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
5 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_low3.rail
300 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_low3.rail
305 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
320 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
325 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_high3.rail
620 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_high3.rail
625 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
750 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
s_var gpdat_rail_info_left -100 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
0 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
5 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_high3.rail
300 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_high3.rail
305 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
320 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
325 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_low3.rail
620 $genkpf/./r_prof/bv50_worn/worn_rail_low3.rail
625 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
750 $genkpf/./r_prof/bv50/bv50i30.rail
else
s_var gpdat_rail_info_right -100 $genkpf/./r_prof/uic60/uic60i40.rail
3000 $genkpf/./r_prof/uic60/uic60i40.rail
s_var gpdat_rail_info_left -100 $genkpf/./r_prof/uic60/uic60i40.rail

```

```

3000 $genkpf/./r_prof/uic60/uic60i40.rail
endif
##[-]} -----
#[-]} -----
### Limit values according to UIC 518 4th edition, 2009
#[-]{ =====
## Static vertical forces
## =====
func const Q_stat_axle_111= (mc_1+2*my_1+4*ms_1+4*ma_1)*9.81/4
func const Q_stat_axle_112= (mc_1+2*my_1+4*ms_1+4*ma_1)*9.81/4
func const Q_stat_axle_121= (mc_1+2*my_1+4*ms_1+4*ma_1)*9.81/4
func const Q_stat_axle_122= (mc_1+2*my_1+4*ms_1+4*ma_1)*9.81/4
func max_init Q_stat_axle_max= Q_stat_axle_111 Q_stat_axle_112 Q_stat_axle_121 Q_stat_axle_122
func min_init Q_stat_axle_min= Q_stat_axle_111 Q_stat_axle_112 Q_stat_axle_121 Q_stat_axle_122

func const Q_stat_wheel_111l= Q_stat_axle_111/2
func const Q_stat_wheel_111r= Q_stat_axle_111/2
func const Q_stat_wheel_112l= Q_stat_axle_112/2
func const Q_stat_wheel_112r= Q_stat_axle_112/2
func const Q_stat_wheel_121l= Q_stat_axle_121/2
func const Q_stat_wheel_121r= Q_stat_axle_121/2
func const Q_stat_wheel_122l= Q_stat_axle_122/2
func const Q_stat_wheel_122r= Q_stat_axle_122/2
func max_init Q_stat_wheel_max= Q_stat_wheel_111l Q_stat_wheel_111r Q_stat_wheel_112l Q_stat_wheel_112r Q_stat_wheel_121l Q_stat_wheel_121r Q_stat_wheel_122l Q_stat_wheel_122r
func min_init Q_stat_wheel_min= Q_stat_wheel_111l Q_stat_wheel_111r Q_stat_wheel_112l Q_stat_wheel_112r Q_stat_wheel_121l Q_stat_wheel_121r Q_stat_wheel_122l Q_stat_wheel_122r

## 10.1.1 Safety
## 10.1.1.1 Track-shift force recommended limit
#
func const S2m_lim_111= 1.0*(10e3+Q_stat_axle_111/3.)
func const S2m_lim_112= 1.0*(10e3+Q_stat_axle_112/3.)
func const S2m_lim_121= 1.0*(10e3+Q_stat_axle_121/3.)
func const S2m_lim_122= 1.0*(10e3+Q_stat_axle_122/3.)
s_var scalar_0 S2m_lim_111
s_var scalar_0 S2m_lim_112
s_var scalar_0 S2m_lim_121
s_var scalar_0 S2m_lim_122
func const S2m_lim_min= 1.0*(10e3+Q_stat_axle_min/3.)
s_var scalar_0 S2m_lim_min
## 10.1.1.2 Derailment quotient
func const YQ2m_lim= 0.8
s_var scalar_0 YQ2m_lim
## 10.1.1.3 Instability
func const sS_lim= S2m_lim_min/2
s_var scalar_0 sS_lim
## 10.1.1.4 Overturning criterion
func const eta_lim= 1.0
s_var scalar_0 eta_lim
## 10.1.2 Track fatigue
## =====
## 10.1.2.1 Vertical force Q: Limit values for Q 99.85 percentile
func const Q_lim_min = 90e3+Q_stat_wheel_min
if_then_init Q_stat_wheel_max .lt. 125e3
if_then_init vkmh .le. 160
no_warning func min_init Q_lim_min= Q_lim_min 200e3
elseif_then_init vkmh .le. 200
no_warning func min_init Q_lim_min= Q_lim_min 190e3
elseif_then_init vkmh .le. 250
no_warning func min_init Q_lim_min= Q_lim_min 180e3
elseif_then_init vkmh .le. 300
no_warning func min_init Q_lim_min= Q_lim_min 170e3
else
no_warning func min_init Q_lim_min= Q_lim_min 160e3
endif
else
no_warning func const Q_lim_min= 0e3
func print06_char_init " "
func print06_char_init "* warning * In Input Reading"
func print06_char_init " Too high static wheel load"
func print06_char_init " Q_lim_min according to UIC 518 cannot be determined"
endif
s_var scalar_0 Q_lim_min
## 10.1.2.2 Quasi-static lateral force in curves (Yqst):
#

```



```

func operp Yqst_lim_111= 30e3 + 10500e3 * abs( lsa_111.b )
func operp Yqst_lim_112= 30e3 + 10500e3 * abs( lsa_112.b )
func operp Yqst_lim_121= 30e3 + 10500e3 * abs( lsa_121.b )
func operp Yqst_lim_122= 30e3 + 10500e3 * abs( lsa_122.b )
s_var var_0 Yqst_lim_111
s_var var_0 Yqst_lim_112
s_var var_0 Yqst_lim_121
s_var var_0 Yqst_lim_122
func min Yqst_lim_min= Yqst_lim_111 Yqst_lim_112 Yqst_lim_121 Yqst_lim_122
s_var scalar_0 Yqst_lim_min
## 10.1.2.3 Quasi-static vertical force in curves less than 600 m (Qqst):
func const Qqst_lim= 145e3
s_var scalar_0 Qqst_lim
## 10.1.2.4 Quasi-static track loading forces in curves less than 600 m (Qqst):
func const Bqst_lim= 180e3
s_var scalar_0 Bqst_lim
func const car.ay_lim= 2.5 # passenger vehicles (tractive and trailer stock)
func const car.az_lim= 2.5
s_var scalar_0 car.ay_lim
s_var scalar_0 car.az_lim
func const car.say_lim= 0.50 # passenger vehicles (tractive and trailer stock)
func const car.saz_lim= 0.75
s_var scalar_0 car.say_lim
s_var scalar_0 car.saz_lim
## 10.1.3.3 Quasi-static lateral accelerations car.ay_qst
#
# func const car.ay_qst_lim= 1.50 # traction units
func const car.ay_qst_lim= 1.30 # bogie wagons and bogie special vehicles
# func const car.ay_qst_lim= 1.30 # non-bogie wagons and non-bogie special vehicles
#
s_var scalar_0 car.ay_qst_lim
#[-]} -----
#### Excite the vehicle in order to calculate critical speed
#[-]{ =====
# initval set_var car_1.vy= .15
# initval set_var car_1.vp= .15
# force rel_1sys1 deacc_car_1 car_1 0 0 -hccg_1 -mc_1*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0 # Deacceleration vkmh_deacc in
[km/h/s]
# force rel_1sys1 deacc_bol_11 bol_11 0 0 -hycg_11 -my_11*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0 # as external forces
# force rel_1sys1 deacc_bol_12 bol_12 0 0 -hycg_12 -my_12*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_sfr_111 sfr_111 0 0 -hscg_111 -ms_11*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_sfr_11r sfr_11r 0 0 -hscg_11r -ms_11*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_sfr_121 sfr_121 0 0 -hscg_121 -ms_12*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_sfr_12r sfr_12r 0 0 -hscg_12r -ms_12*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_axl_111 axl_111 0 0 -ro_111 -(ma_111+Jka_111/ro_111^2)*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_axl_112 axl_112 0 0 -ro_112 -(ma_112+Jka_112/ro_112^2)*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_axl_121 axl_121 0 0 -ro_121 -(ma_121+Jka_121/ro_121^2)*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
# force rel_1sys1 deacc_axl_122 axl_122 0 0 -ro_122 -(ma_122+Jka_122/ro_122^2)*vkmh_deacc/3.6 0.0 0.0 0.0
#[-]} -----
#### Noise and Corrugation
#[-]{ =====
substruct saveCorrugation [
func cabs cp1_$11.anu= cp1_$11.nux cp1_$11.nuy func cabs cp1_$1r.anu= cp1_$1r.nux cp1_$1r.nuy
func cabs cp2_$11.anu= cp2_$11.nux cp2_$11.nuy func cabs cp2_$1r.anu= cp2_$1r.nux cp2_$1r.nuy
func cabs cp3_$11.anu= cp3_$11.nux cp3_$11.nuy func cabs cp3_$1r.anu= cp3_$1r.nux cp3_$1r.nuy
s_var var_0 cp1_$11.anu s_var var_0 cp1_$1r.anu
s_var var_0 cp2_$11.anu s_var var_0 cp2_$1r.anu
s_var var_0 cp3_$11.anu s_var var_0 cp3_$1r.anu ]
# in_substruct saveCorrugation [ 111 ]
# in_substruct saveCorrugation [ 112 ]
#[-]} -----
#### Stop the simulation at tstop or the end of the track
#### =====
tstop= 80.
if_then lsa_111.pn .gt. Xtrac_stop
func print06_char_all " "
func print06_char_all " Execution interrupted due to lsa_111.pn > Xtrac_stop"
func print06_char_all " -----"
func stop
endif
eof # Always end the input data file with an eof-mark

```