



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MKP ANALÝZA NÁRAZOVEJ SKÚŠKY MODELU OSOBNÉHO AUTOMOBILU ZO STAVEBNICE LEGO®

FEA CRASH TEST OF A LEGO® PASSENGER CAR MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zoja Barančoková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Bc. Zoja Barančoková**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

MKP analýza nárazovej skúšky modelu osobného automobilu zo stavebnice LEGO®

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvoriť MKP analýzu nárazovej skúšky reálneho vozidla si vyžaduje značné množstvo prostriedkov. Preto spôsob tvorby takejto MKP analýzy je vhodné overiť na jednoduchšej zostave napr. na modeli zo stavebnice LEGO®. Ten obsahuje oveľa menej vstupných parametrov pre vytvorenie MKP modelu, ktorý bude vhodne simulovať realitu.

Ciele diplomové práce:

Tvorba modelu geometrie osobného automobilu zo stavebnice LEGO®.
Tvorba MKP analýzy nárazovej skúšky.
Experiment nárazovej skúšky a porovnanie s MKP výsledkami.

Seznam doporučené literatury:

LS-DYNA® Theory Manual, 2006. California: Livermore Software Technology Corporation. ISBN 0-9778540-0-0.

LEGO®Crash Simulations in LS-DYNA®: Data Management for Large-Scale Models, 2019. In: DYNAMore Express [online]. Dostupné z: https://www.dynamore.de/de/download/presentation/2020/lego_crash_simulations_in_ls-dyna.pdf.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá tvorbou MKP analýzy nárazovej skúšky modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione. Pri analyzovaní nárazových skúšok reálnych vozidiel, do výpočtu vstupuje veľké množstvo parametrov. LEGO® modely ponúkajú možnosť analyzovať tento jav s menším počtom vstupných parametrov a vytvoriť simuláciu nárazovej skúšky, ktorá sa bude zhodovať s reálnym rozpojením modelu pri náraze. Prvým krokom bola tvorba a diskretizácia CAD modelov jednotlivých LEGO® kociek, z ktorých je LEGO® model zložený. Najdôležitejšou časťou bola definícia parametrov normálovej a šmykovej sily zlyhania v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, zabezpečujúci rozpojenie LEGO® kociek pri simulácii nárazu, ktorá bola realizovaná v programe LS-DYNA. Zároveň boli vykonané experimentálne merania veľkostí zaťažujúcich síl, ktoré sú potrebné na rozpojenie dvojice LEGO® kociek, pre najpoužívanejšie typy kontaktov, nachádzajúcich sa v zvolenom LEGO® modeli. Výsledky simulácii nárazovej skúšky boli porovnané so sériou reálnych nárazov, ktoré boli vykonané rovnomerne zrýchleným pohybom opotrebovaného a nového LEGO® modelu po naklonenej rovine zo vzdialeností 1 m a 1,6 m od nárazovej bariéry. Po porovnaní výsledkov bolo nutné parametre zlyhania modifikovať, aby sa docielila presnejšia zhoda v rozpojení MKP modelu s reálnym LEGO® modelom.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

LEGO®, LEGO® Challenge, nárazová skúška, MKP, LS-DYNA, sila rozpojenia

ABSTRACT

This master's thesis deals with a FEA crash test of a LEGO® Ferrari 812 Competizione model. There are many parameters that must be considered in the calculation of FEA crash test of vehicles. LEGO® models offer the possibility to analyse this phenomenon with a lower number of input variables and create FEA crash test in which the disconnection of the LEGO® brick will be the same as in real-life crash test. The first step was the creation and discretization of CAD models of individual LEGO® bricks from which the LEGO® model is composed. The most important part was the definition of normal and shear failure forces in contact card *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, ensuring the disconnection of the LEGO® bricks during simulation of crash test, which was implemented in LS-DYNA software. Additionally, experimental measurements were taking place to measure the loading forces which are needed to disconnect two LEGO® bricks. For this experiment were chosen the most used types of contact of the LEGO® bricks which are found in selected LEGO® model. Results of FEA crash tests were compared with a series of real-life crash tests that were done by accelerated linear motion of used and new LEGO® models. The accelerated linear motion was achieved by putting the model on a tilted surface, 1 m, and 1,6 m from the crash barrier. After comparing the results, the parameters of contact failure had to be modified to ensure a closer match of LEGO® bricks disconnection between FEA crash test and real-life crash test.

KEYWORDS

LEGO®, LEGO® Challenge, crash test, FEA, LS-DYNA, clamping force

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BARANČOKOVÁ, Zoja. *MKP analýza nárazovej skúšky modelu osobného automobilu zo stavebnice LEGO®*. Online, Diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedúci práce Jozef Dlugoš. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157964>.



ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Jozefa Dlugoša, PhD. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dne 24. mája 2024

.....

Zoja Barančoková

POĎAKOVANIE

Moja veľká vďaka patrí vedúcemu diplomovej práce Ing. Jozefovi Dluhošovi, Ph.D. za jeho cenné rady, ochotu, trpezlivosť a celkové vedenie počas písania tejto práce. Ďalej ďakujem doc. Ing. Matrinovi Fuskovi, Ph.D. z Technickej univerzity v Ostrave za pomoc pri experimentálnom zistení síl rozpojenia LEGO® kociek a taktiež Ing. Ľubošovi Kotkovi, Ph.D. za pomoc pri realizovaní experimentu nárazovej skúšky LEGO® modelu. V neposlednom rade ďakujem svojej rodine a priateľom za podporu počas celého štúdia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Využitie LEGO® v inžinierskom odvetví.....	12
1.1 LEGO® EDUCATION	12
1.1.1 LEGO® MINDSTORMS® EV3	12
1.1.2 LEGO® EDUCATION WeDo 2.0.....	13
1.1.3 LEGO® EDUCATION SPIKE™	14
1.1.4 LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION	15
1.2 LEGO® SERIOUS PLAY®	16
1.3 LEGO® Bugatti Chiron.....	17
2 LEGO® Challenge.....	19
2.1 Prototyp	19
2.2 Model LEGO® Technic Porsche 911 GT3	21
2.2.1 Vplyv veľkosti siete.....	21
2.2.2 Definícia materiálu	22
2.2.3 Upínacia sila a trenie	22
2.2.4 Celkový model.....	23
2.3 Zrážka LEGO® Technic Porsche 911 GT3 a Bugatti Chiron.....	24
3 Geometria LEGO® modelu.....	26
3.1 Anatomia LEGO® kociek	26
3.2 CAD modely LEGO® kociek	27
3.3 Diskretizácia LEGO® kociek.....	28
4 Materiál LEGO® kociek.....	31
4.1 ABS materiál	31
4.2 Experimentálne overenie	31
5 Sila rozpojenia.....	33
5.1 Maximálne trecie zaťaženie.....	33
5.2 Kontakt TIEBREAK	34
5.3 Určenie parametrov <i>NFLF</i> a <i>SFLF</i>	36
5.3.1 Modely geometrie.....	36
5.3.2 Nastavenie modelov	37
5.3.3 Parametre <i>NFLF</i> a <i>SFLF</i>	39
5.4 Experimentálne overenie sily rozpojenia	43
5.4.1 Príprava a priebeh testovania.....	43
5.4.2 Výsledky testovania.....	45
6 Tvorba modelu pre MKP analýzu nárazovej skúšky.....	48
6.1 Kontakty	48
6.2 Rotačné prvky.....	50
6.3 Parametre nárazu	50
7 Experimentálne overenie nárazovej skúšky.....	52
7.1 Vplyv opakovanosti nárazu.....	53
7.2 Vplyv dĺžky dráhy	56

7.3	Vplyv použitého modelu	57
8	Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky.....	60
8.1	Opotrebovaný model LEGO® Ferrari 812 Competizione.....	61
8.2	Nový model LEGO® Ferrari 812 Competizione.....	65
8.3	Modifikácia parametrov kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY....	68
Záver	74
Použité informačné zdroje.....	76
Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	80

ÚVOD

Keď v roku 1932 tesár Ole Kirk Kristiansen začal vyrezávať drevené hračky pre deti, ešte netušil, že spolu so svojím synom vybudujú spoločnosť, ktorá sa stane jednou z najznámejších na svete. LEGO® dnes poznajú ľudia všetkých vekových kategórií nezávisle na tom či majú záľubu v LEGO® stavebniciach alebo nie. Každý ale nie je oboznámený s významom tohto slova, ktoré vzniklo jednoduchým zložením začiatočných slabík dvoch dánskych slov „Leg Godt“ („dobro sa hrať“). V latinčine je ich možné preložiť ako „staviam“ a Kristiansen si pri tvorení názvu nebol vedomý tohto prekladu, ktorý tiež vystihuje podstatu značky. [1]

V dnešnej dobe LEGO® vytvára tematicky rôznorodé stavebnice pre deti, ktoré si pomocou nich trénujú predstavivosť, kreativitu a už od ranného detstva sa môžu zoznamovať s tým, ako fungujú jednoduché mechanické konštrukcie. Zložitejšie stavebnice obľubujú hlavne dospelí, ktorí sa pri stavaní vracajú naspäť do detských čias a zo svojich modelov tvoria veľkolepé zbierky.

Fascinujúce nie je LEGO® stavebnice len skladať ale taktiež sledovať, čo sa s nimi stane, keď napríklad padnú na zem a rozletia sa desiatky, stovky jednotlivých kociek. Táto myšlienka bola jedným zo stavebných kameňov pri tvorbe LEGO® Challenge pracovníkmi v spoločnostiach DYNAMore GmbH a SCALE GmbH, ktorí pomocou metódy konečných prvkov (MKP) vytvorili simuláciu čelného nárazu modelu LEGO® Porsche 911 GT3, zo série modelov vozidiel LEGO® Technic. Na základe úspechu, ktorý tento projekt zožal, pokračovali s vytvorením modelu, z rovnakej série, LEGO® Bugatti Chiron a simulovaním niekoľkých typov zrážok s modelom LEGO® Porsche 911 GT3. Presnosť simulácii bola overená aj experimentálnymi zrážkami skutočných LEGO® modelov.

Práve LEGO® Challenge bola inšpiráciou pre vznik tejto diplomovej práce, ktorá sa zaoberá vytvorením simulácie nárazovej skúšky LEGO® modelu pomocou MKP analýzy. Pre túto prácu bol zvolený menší model zo série Speed Champions, LEGO® Ferrari 812 Competizione a náraz bol realizovaný rovnomerne zrýchleným pohybom po naklonenej rovine, kde na jej konci bola uchytená nárazová bariéra. Kľúčovým aspektom pri tvorbe simulačného modelu bolo zistenie veľkosti sily, potrebnej na rozpojenie jednotlivých LEGO® kociek, ktorá zabezpečovala správne chovanie modelu pri náraze do bariéry.

Diplomová práca obsahuje prehľad zaujímavých LEGO® stavebníc, ktoré sú používané ako edukačné pomôcky v technickej oblasti pre deti a študentov a podrobnejší popis vzniku LEGO® Challenge. Následne je opísaná tvorba jednotlivých CAD modelov LEGO® kociek, obsiahnutých v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione, v programe SpaceClaim, ich úpravy potrebné pre správnu funkciu simulácii a definovanie materiálu LEGO® kociek. Veľká časť práce sa venuje analýze, už spomínanej, sily rozpojenia pomocou teoretických zdrojov a navrhnutým experimentom. Ďalej je opísané samotné vytvorenie modelu, nastavenie parametrov simulácie v prostredí ANSA a výsledky experimentálneho overenia nárazovej skúšky LEGO® modelu, ktoré sú porovnané s výslednými simuláciami, realizované v programe LS-DYNA. Na záver je vykonaná úprava simulačných modelov nárazovej skúšky.

1 VYUŽITIE LEGO® V INŽINIERSKOM ODVETVÍ

Od vzniku spoločnosti LEGO® prešli stavebnice rozsiahlym vývojom a v súčasnosti neslúžia len na hranie. Sú využívané aj ako edukačné pomôcky pri vzdelávaní detí v oblasti robotiky, mechaniky a informatiky. Špeciálne typy stavebníc sa dajú použiť vo firmách ako pomôcky počas pracovných seminárov, kde účastníci riešia problémy zostavením jednoduchých modelov a diskutujú o možných riešeniach.

Jednou z najobľúbenejších LEGO® tématických sa vo svete inžinierstva stal LEGO® Technic. Obsahuje špeciálne typy kociek (ozubené kolesá, hriadele, spojovacie prvky a iné), ktoré je možné využiť na zostrojenie funkčných mechanizmov alebo mechanických konštrukcií, pomocou ktorých je možné popísať základné fyzikálne a mechanické princípy. Napríklad na modeloch vozidiel sa dá demonštrovať dynamika vozidla alebo funkcia diferenciálu.

1.1 LEGO® EDUCATION

LEGO® EDUCATION je projekt spoločnosti LEGO®, ktorý vznikol za účelom vzdelávať deti rôznych vekových kategórií v oblastiach vedy, techniky, inžinierstva a matematiky [2]. Modely sú vybavené klasickými kockami, kockami typu Technic a elektronickými prvkami. LEGO® ku každej stavebnici ponúka aj výučbové plány, pomocou ktorých sa deti môžu podrobnejšie zoznámiť so základmi dizajnu, konštrukcie a programovania.

Tematika LEGO® EDUCATION obsahuje veľké množstvo stavebníc a táto podkapitola zahŕňa podrobnejší opis tých, ktoré sa učitelia snažia implementovať do výučbového plánu študentov a taktiež sa stali predmetom výskumných prác na univerzitách.

1.1.1 LEGO® MINDSTORMS® EV3

LEGO® MINDSTORMS® EV3 (viz *obr. 1*) je tretia generácia programovateľných robotov, ktorých konštrukcia je tvorená LEGO® kockami typu Technic. Primárnym prvkom tohto modelu je inteligentná EV3 kocka, ktorá sa používa ako kontrolná a napájacia stanica robota. Následne konštrukcia obsahuje dva typy elektromotorov, dotykový senzor, senzor rozpoznávania farby a intenzity svetla, infračervený senzor a ovládacie zariadenie. Robota je možné uviesť do pohybu základnými funkciami, ktoré sú nainštalované v rozhraní EV3 kocky. Pre rozsiahlejšie programovanie sa využíva EV3 softvér, alebo EV3 programovacia aplikácia. Oba prístupy používajú grafické programovacie prostredie. [3]

Roboty LEGO® MINDSTORMS® boli vytvorené pre deti na základných a stredných školách. Využitie našli aj u študentov na vysokých školách, so zameraním na mechatroniku a robotiku, ktorí si s týmito stavebnicami môžu overiť svoje teoretické znalosti v praxi.

Pomocou jednotlivých komponentov je možné vytvárať nielen robotov podľa manuálu, ale aj rôzne typy mechanizmov, medzi ktoré patrí napríklad paralelný mechanizmus. Jeden z problémových bodov návrhu je singularita, čo spôsobuje stratu tuhosti mechanizmu. Kinematická singularita sa objavuje v mechanizmoch, kde sa ich počet stupňov voľnosti mení, a tým sa obmedzuje pohyb konkrétnej časti mechanizmu [4]. Pomocou LEGO®

MINDSTORMS® je možné tento problém vizualizovať a zároveň študenti vidia fungovanie a pohyb naprogramovaného robota v trojrozmernom priestore. [5]



Obr. 1 LEGO® MINDSTORM® EV3 [6]

1.1.2 LEGO® EDUCATION WeDo 2.0

LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 (viz obr. 2) je druhá generácia vzdelávacích stavebníc, ktoré vznikli s cieľom prehľbovať vedomosti detí na základných školách, u ktorých sa prejavuje záujem o predmety týkajúce sa vedy a techniky. Stavebnica obsahuje LEGO® kocky typu Technic, Smarthub, malý motor, snímač pohybu, snímač náklonu a možnosť programovania jednotlivých zostrojených modelov [7].



Obr. 2 LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 stavebnica [7]

Vzdelávanie pomocou LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 obsahuje niekoľko možných návrhov použitia tejto stavebnice. Ako prvé sa deti zoznámia so základnými funkciami, ktoré

LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 ponúka a následne môžu pracovať na riešení jednotlivých problémov. Základné projekty obsahujú riešenie problému krok po kroku a pri pokročilejších projektoch deti dostanú len záchytné body, ktoré im majú pomôcť dostať sa ku celkovému riešeniu. [8]

Všetky LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 projekty sú rozdelené na tri základné etapy: objavovanie, vytváranie a zdieľanie [8]. Počas prvej etapy sa deti zoznámia so zadaným fyzikálnym alebo inžinierskym problémom a diskutujú o tom, ako by bolo možné problém vyriešiť. V druhej etape deti v skupinách zostroja a naprogramujú LEGO® model týkajúci sa zadanej témy. Posledná etapa je zameraná na dokumentáciu a prezentáciu dosiahnutých výsledkov pred ostatnými skupinami.

Spoločnosť LEGO® stavebnice LEGO® EDUCATION WeDo 2.0 už vyradila z predaja a boli nahradené komplexnejšími stavebnicami LEGO® EDUCATION SPIKE™ a LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION.

1.1.3 LEGO® EDUCATION SPIKE™

LEGO® EDUCATION SPIKE™ sú vzdelávacie pomôcky určené pre deti na základných školách, ktoré obsahujú dva typy stavebníc pre deti prvého (LEGO® EDUCATION SPIKE™ Essential (viz obr. 3)) a druhého stupňa (LEGO® EDUCATION SPIKE™ PRIME (viz obr. 4)) [9]. Výuka je zameraná na základný rozvoj abstraktného a kritického myslenia, matematických schopností a základov programovania. Pomocou kociek deti dokážu pretvárať svoje nápady do reálnych modelov. Taktiež sa týmto spôsobom LEGO® snaží vzbudiť v deťoch záujem o inžinierske odvetvie.



Obr. 3 LEGO® EDUCATION SPIKE™ Essential stavebnica [9]

Stavebnice obsahujú LEGO® Technic kocky, motory a inteligentný rozbočovač. V LEGO® EDUCATION SPIKE™ Essential (viz obr. 3) sa nachádzajú aj štyri mini figúrky s rozličnými osobnosťami, ktoré môžu deti použiť na opísanie problémovej situácie rozpovedaním príbehu. Následne je možné si modely naprogramovať cez aplikáciu SPIKE™ App. Stavebnice LEGO® EDUCATION SPIKE™ Essential sú vybavené blokovým

kódovaním na základe ikon. LEGO® EDUCATION SPIKE™ PRIME (viz obr. 4) je rozšírený o možnosť programovania v jazyku Python. [10]



Obr. 4 LEGO® EDUCATION SPIKE™ PRIME stavebnica [9]

1.1.4 LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION

LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION sú stavebnice zamerané pre deti základných (BRICQ MOTION Essential (viz obr. 5)) a stredných škôl (BRICQ MOTION PRIME (viz obr. 6)) [9]. Zostrojením jednoduchých modelov deti skúmajú fyzikálne princípy mechanizmov.



Obr. 5 LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION Essential stavebnica [11]

Stavebnica LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION Essential (viz obr. 5) je navrhnutá tak, aby sa deti zoznámili a porozumeli pôsobeniu síl a momentov. Toto je docieľené pohybom figúrky v smere dopredu alebo dozadu pri rôznych rýchlostiach. [11]

Rozšírená verzia tejto stavebnice je LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION PRIME (viz obr. 6), na ktorých si študenti vyskúšajú pôsobenie Newtonovho tretieho pohybového zákona. V skupinách navrhnu a zostroja konštrukciu nárazu, ktorú môžu, na základe získaných výsledkov, modifikovať. [11]



Obr. 6 LEGO® EDUCATION BRICQ MOTION PRIME stavebnica [11]

1.2 LEGO® SERIOUS PLAY®

Program LEGO® SERIOUS PLAY® je inovatívny a experimentálny proces, ktorý bol navrhnutý pre podporu výkonnosti spoločností. Počas pracovných seminárov organizátor zadá tému, na ktorú účastníci postavia malý metaforický model pomocou LEGO® kociek, nachádzajúcich sa v špeciálnom type stavebníc, ktoré LEGO® ponúka. Na začiatku každý účastník obdrží štartovaciu stavebnicu (viz obr. 7), v ktorej sa nachádzajú klasické LEGO® kocky, DUPLO® kocky a niekoľko špeciálnych LEGO® elementov. Štartovaciu stavebnicu je možné rozšíriť aj o ďalšie typy (spojovacie materiály, prieskumná stavebnica alebo stavebnica s krajinkou a postavami) v závislosti na tom, o aký typ seminára sa jedná. [12, 13]



Obr. 7 LEGO® SERIOUS PLAY® štartovacia stavebnica [12]

Vytvorený metaforický model slúži ako oporný bod pri rozpovedaní príbehu na zadanú problematiku a následne prebieha diskusia s ostatnými účastníkmi. Celý proces sa opakuje, čím si účastníci prehĺbujú svoje vedomosti a tým nachádzajú lepšie riešenia. Časový plán pracovných seminárov je variabilný, môže byť navrhnutý na krátke stretnutia (3 až 4 hodiny), alebo dlhé (až 3 dni), pričom odporúčaná dĺžka je jeden deň [13].

LEGO® SERIOUS PLAY® je možné implementovať aj ako vzdelávaciu pomôcku pre študentov v inžinierskych odvetviach ako napríklad softvérové, stavebné, priemyselné alebo systémové inžinierstvo. Študentom sa týmto procesom zvyšuje záujem a motivácia pri ich štúdiu a pomáha im v rozvoji komunikačných a organizačných schopností, schopnosti pracovať v tíme alebo pod stresom (tzv. soft skills), ktoré patria medzi základné kvality každého inžiniera. Proces výučby je podobný ako priebeh pracovných seminárov vo firmách. Učiteľ definuje požiadavky pre vyriešenie danej problematiky, následne študenti analyzujú možné riešenia, zostroja model v určitom časovom rozmedzí a prezentujú dosiahnuté výsledky. V ďalšom kroku môže učiteľ požiadavky pozmeniť, na základe ktorých je potrebné model modifikovať a celý proces sa opakuje. [14]

1.3 LEGO® BUGATTI CHIRON

LEGO® Technic disponuje veľkou ponukou modelov vozidiel. Avšak neostáva len pri nich, zaoberá sa aj prácou na projektoch skutočnej veľkosti. Medzi tieto pozoruhodné modely patrí napríklad Lamborghini Sián, McLaren Formula 1, Ferrari Daytona SP3, McLaren Senna a iné.

V roku 2018 spoločnosť LEGO® predstavila svoj najzložitejší projekt, Bugatti Chiron s pohonnou jednotkou. Okrem troch komponentov (oceľový rám, pneumatiky a oceľová reťaz) boli pre zostrojenie exteriéru (viz obr. 8) aj interiéru (viz obr. 9) modelu použité len LEGO® Technic prvky. Projekt bol realizovaný v Kladne v Českej republike, kde sa nachádza sídlo oficiálneho centra pre stavbu LEGO® modelov. [15, 16]



Obr. 8 Model LEGO® Bugatti Chiron [15]

Základom vozidla bola oceľová konštrukcia, na ktorú boli napojené vrstvy LEGO® Technic kociek, pospájané LEGO® hriadeľmi a kolíkmi, čo zabezpečilo väčšiu tuhosť celkovej konštrukcie. Exteriér modelu bol vytvorený pomocou systému trojuholníkových prvkov, ktoré boli na konštrukciu pripojené pomocou aktuárov. Ich nastavením sa docielil aerodynamický vzhľad modelu tak, aby zodpovedal skutočnému vozidlu. Pohon motora bol vytvorený pomocou 2 034 kusov LEGO® L – motorov, ktoré boli rozdelené na 24 balení po 96 kusov. Tento modul bol následne napojený na hlavný hnací hriadeľ, ktorý bol spojený so zadnou nápravou. [15, 16]



Obr. 9 Model LEGO® Bugatti Chiron – interiér [16]

Celkovo sa model skladá z viac ako 1 000 000 prvkov LEGO® Technic a má hmotnosť 1 500 kg. Zároveň na zloženie modelu nebolo použité žiadne lepidlo. Teoretický výkon motoru je 3,95 kW (5,2 HP) a odhadovaný krútiaci moment je 92 Nm. Maximálna rýchlosť Bugatti Chiron bola otestovaná na nemeckej trati, kde model dosahoval cez 20 km·h⁻¹. [16]

2 LEGO® CHALLENGE

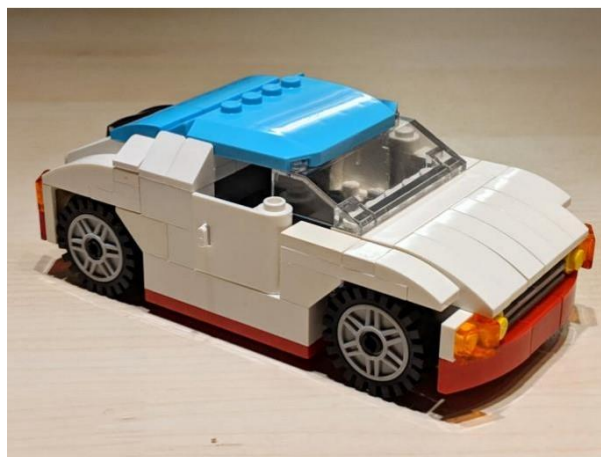
Stavbu LEGO® modelov obľubujú ľudia všetkých vekových kategórii. Fascinujúce je aj vidieť, čo sa s nimi stane, ak narazia do steny alebo jeden do druhého. Tento dôvod prispel ku vytvoreniu LEGO® Challenge, ktorá pomocou metódy konečných prvkov simuluje správanie modelov LEGO® Technic pri náraze. Ďalším motívom vzniku tohto projektu bolo vytvorenie vzdelávacieho materiálu pre študentov strojného inžinierstva, ktorý sa zaoberajú riešením problémov pomocou MKP.

LEGO® Challenge vznikla pracovníkmi v spoločnostiach DYNAmore GmbH a SCALE GmbH. Nakoľko bol projekt realizovaný vo viacerých krajinách, pre členov bolo potrebné zdieľať jednotlivé dáta medzi sebou. Z tohto dôvodu bol využitý systém LoCo. Jedná sa o SPDM (proces simulácie a dátového manažmentu) systém, ktorý slúži na nastavenie procesu simulácie, spracovanie dát a ich zdieľanie medzi jednotlivými členmi. Vývoj tohto systému bol najdôležitejším aspektom realizovania LEGO® Challenge. [17]

Pre simulovanie čelného nárazu bol použitý model LEGO® Technic Porsche 911 GT3. Na základe veľkého úspechu bol následne vytvorený model stavebnice LEGO® Technic Bugatti Chiron a bol zrealizovaný bočný náraz týchto dvoch modelov.

2.1 PROTOTYP

Predtým než vznikla nárazová skúška modelu LEGO® Technic Porsche 911 GT3, bol navrhnutý malý prototyp vozidla, ktorý slúžil na oboznámenie s tým, ako sa bude LEGO® vozidlo správať pri náraze. Virtuálny model bol namodelovaný v LEGO® CAD softvéri BrickLink Studio a následne bol vytvorený aj reálny model pre experimentálnu časť projektu (viz obr. 10) [18].

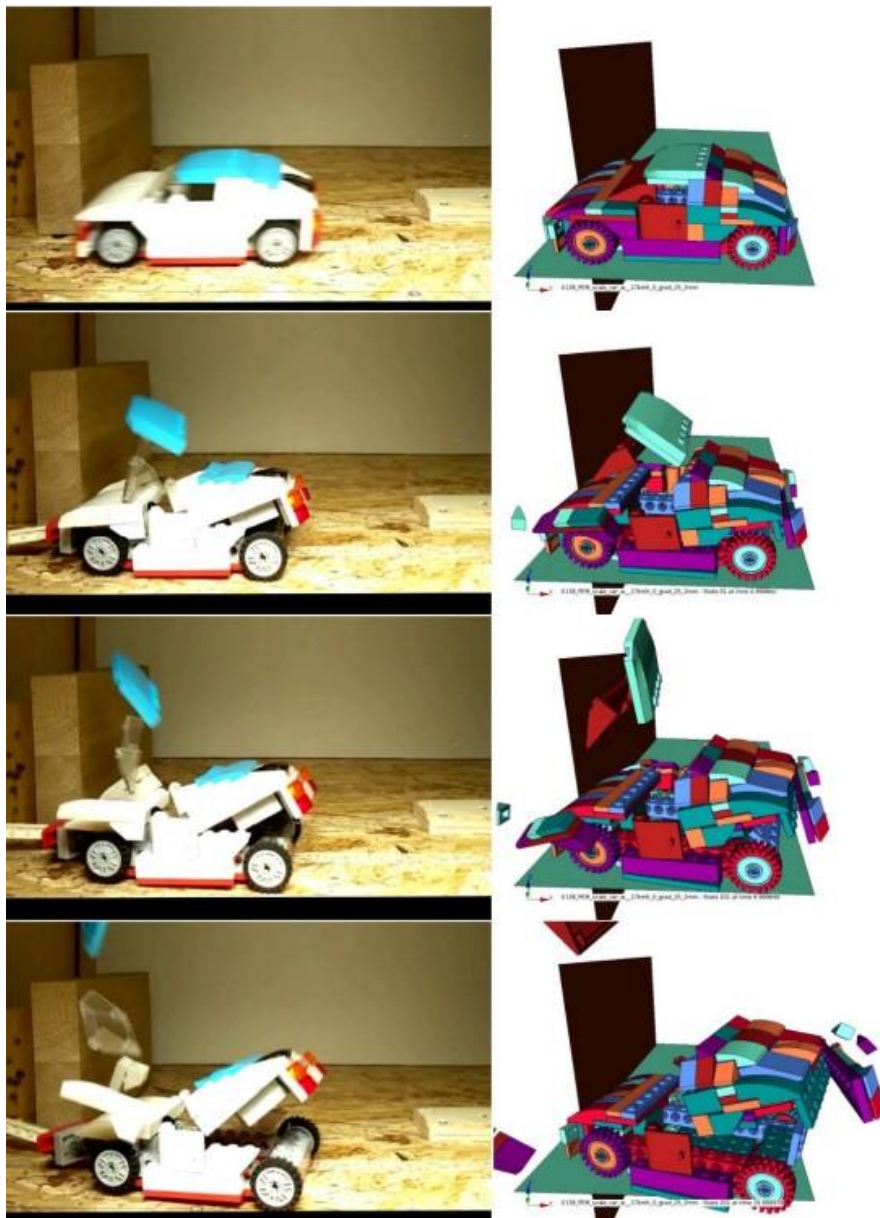


Obr. 10 Finálny model prototypu vozidla [18]

Prvým krokom bolo zostavenie LoCo knižnice, ktorá zahŕňala všetky potrebné súbory simulácie LEGO® vozidla. Jednalo sa o CAD súbory LEGO® kociek z programu LDraw, súbory diskretizovaných kociek a materiálových vlastností, komponenty potrebné pre realizovanie nárazu (nárazové bariéry) a súbory parametrov potrebných pre nastavenie simulácie. Dôležitou súčasťou knižnice bol skript, ktorý obsahoval informácie o polohe

a farbe každej kocky. Tento koncept umožňoval diskretizovať každú kocku len raz a následne ju, pomocou úpravy skriptu, niekoľkokrát umiestniť do modelu. [18]

Jednotlivé LEGO® kocky boli diskretizované pomocou objemových štvorstenových prvkov s dĺžkou hrany 1 mm a 2 mm. Pri spájaní kociek do celkového modelu bola zanedbaná zvieracia sila, ktorá drží kocky spojené pohromade. Namiesto toho bol v modeli použitý základný kontakt s trením medzi jednotlivými kockami. Po vytvorení modelu bolo vykonaných niekoľko typov nárazu vozidla do bariéry s rôznymi posunmi a s rozličnými rýchlosťami. [18]



Obr. 11 Porovnanie experimentu a simulácie v čase 0 ms, 5 ms, 10 ms a 20 ms [18]

Výsledky simulácie boli overené pomocou experimentálnych testov. Pre tento účel bol zostrojený malý drevený priestor, ktorý slúžil na realizovanie saňových skúšok modelu vozidla. Uvedenie vozidla do pohybu bolo zabezpečené prakom, ktorý umožnil vozidlu

zrýchliť až na $15 - 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Obr. 11 zobrazuje výsledky čelného nárazu do bariéry s presahom 25 % pre simulačný a reálny model, ktorého výsledky boli považované za prijateľné. Celkovo bola simulácia otestovaná pre štyri typy nárazu [18]:

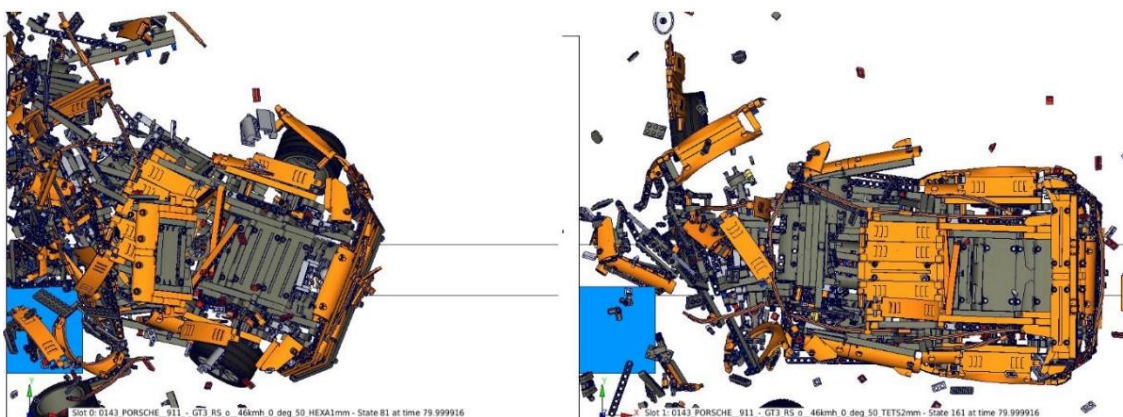
- čelný náraz,
- čelný náraz do bariéry s presahom 50%,
- čelný náraz do bariéry s presahom 25%,
- čelný náraz s natočením vozidla o 30° .

2.2 MODEL LEGO® TECHNIC PORSCHE 911 GT3

Na základe pozitívnych výsledkov nárazu malého prototypu vozidla bol tímom pracovníkov DYNAMore GmbH a SCALE GmbH zostrojený nárazový test oficiálneho modelu LEGO® Technic Porsche 911 GT3. Aj v tomto prípade bola využitá knižnica v systéme LoCo, ktorá umožňovala každému členovi pracovať na určitej časti projektu. Súbor potrebné pre finálnu simuláciu boli prepojené pomocou skriptu, ktorý bol následne použitý na nastavenie simulačného prostredia LS-DYNA. Nakoľko sa jednalo o komplexnejší model než v predchádzajúcom prípade, bolo potrebné podrobnejšie preskúmať jednotlivé parametre vstupujúce do simulácie.

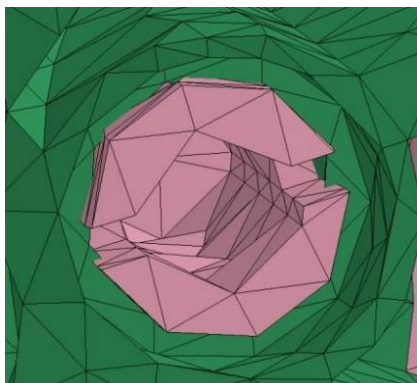
2.2.1 VPLYV VEĽKOSTI SIETE

Prvotne bol skúmaný vplyv veľkosti siete na priebeh simulácie. Jednotlivé kocky boli diskretizované pomocou objemových štvorcov s dĺžkou hrany 1 mm a 2 mm. Porovnaním bolo zistené, že sa model správa rozdielne v závislosti od použitej veľkosti prvku (viz obr. 12).



Obr. 12 Vplyv veľkosti siete: variant 1 mm (vľavo) a 2 mm (vpravo) [17]

Problémom boli LEGO® kocky, ktoré sa používajú ako spojovacie hriadele a v LEGO® Technic modeloch sú obsiahnuté vo veľkých množstvách. Majú ale veľmi malé plochy, ktoré nebolo možné prvkami o veľkosti 2 mm správne diskretizovať a tým dochádzalo ku zvýšenej diskretizačnej chybe. Tá mala za následok prieniky medzi spojovacím hriadeľom a LEGO® Technic kockou (viz obr. 13), ktoré viedli ku nefyzikálnemu správaniu kontaktu. Z tohto dôvodu sa pri náraze simulačný model nesprával rovnako ako skutočný model. [17]

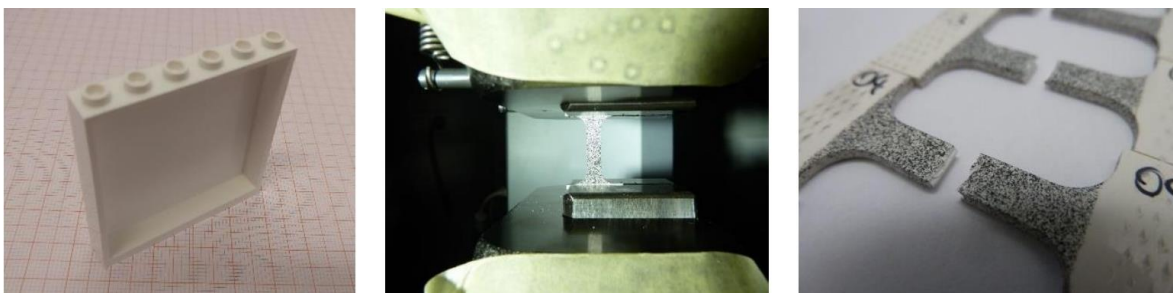


Obr. 13 Prienik prvkov medzi spojovanými časťami [17]

Na základe týchto poznatkov boli jednotlivé kocky diskretizované štvorstennými o veľkosti hrany 1 mm. Aby model vozidla neobsahoval príliš veľa prvkov, boli LEGO® Technic kocky, ktoré reprezentujú nosníky, diskretizované pomocou šesťstenov. Tým sa zmenšil ich počet o viac ako 800 000 a v závere model obsahoval približne 19,5 miliónov prvkov [17].

2.2.2 DEFINÍCIA MATERIÁLU

Pre zabezpečenie realistického správania modelu vozidla počas simulácie, bolo potrebné zistiť vlastnosti materiálu LEGO® kociek. Tieto informácie boli získané pomocou materiálových testov (viz obr. 14) vzorku a následne použité v materiálových listoch modelu. Na základe výsledkov bol skalibrovaný materiálový list *MAT_024 (model elasto-plastického materiálu s izotropným spevňovaním). Pre gumové časti (pneumatiky) bol požitý materiálový list *MAT_077 (všeobecný model hyperelastického materiálu). Nakoľko tieto prvky nemajú v modeli veľké zastúpenie, boli použité parametre z verejných zdrojov. [17]



Obr. 14 Materiálový test vzorku [17]

2.2.3 UPÍNACIA SILA A TRENIE

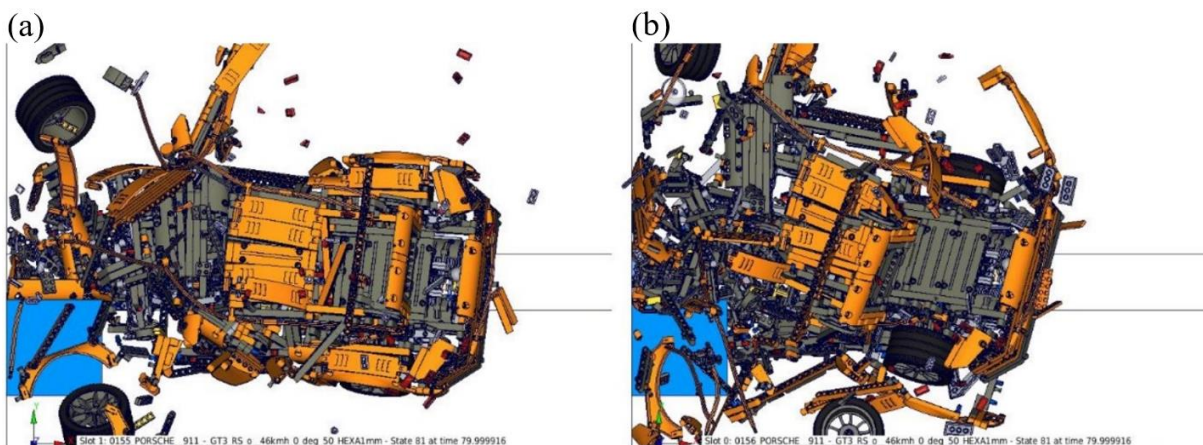
Ďalším dôležitým parametrom bolo určenie veľkosti upínacej sily, ktorá zabezpečuje spojenie dvoch LEGO® kociek. Na začiatku bol používaný klasický kontakt s trením, pri ktorom sa niektoré typy kociek neoddeľovali tak ako pri reálnych testoch. Preto bolo pristúpené k aplikácii kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY (podrobnejšie kapitola 5). Pre správne nastavenie parametrov kontaktu bol realizovaný experiment rozpojenia dvoch

LEGO® kociek, čím boli zistené veľkosti normálovej a šmykovej sily. Výsledky testu slúžili na určenie hodnôt $NFLF$ a $SFLF$ v karte kontaktu, (viz obr. 15). [17]

*CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY									
\$	cid								title
\$	ssid	msid	sstyp	mstyp	sboxid	mboxid	spr	mpr	
\$	7002	1001	4	2					
\$	fs	fd	dc	vc	vdc	penchk	bt	dt	
\$					20.0				
\$	sfs	sfm	sst	mst	sfst	sfmt	fsf	vsf	
\$			-0.15	-0.15					
\$	nflf	sflf	nen	mes					
\$	1.45E-4	3.0E-5							

Obr. 15 Nastavenie parametrov v karte *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY [17]

Ďalší parameter, ktorý bolo potrebné v LEGO® Technic modeli nastaviť, bol statický a dynamický koeficient trenia, ktorých veľkosť ovplyvňovala rozpojenie kociek pri náraze podobne ako veľkosť prvkov siete. Obr. 16 (a) zobrazuje správanie modelu pri hodnote koeficientu dynamického trenia 0,1 a koeficientu statického trenia 0,2. Na obr. 16 (b) sú hodnoty nastavené na 0,05 pre koeficient dynamického trenia a 0,1 pre koeficient statického trenia. Správanie modelu ukazuje, že pri použití väčších hodnôt koeficientov boli potrebné väčšie sily na rozpojenie kociek, z toho dôvodu sa pri náraze modelu nerozpojili tak ako v skutočnosti. Aj v tomto prípade hodnoty koeficientov boli skalibrované na základe vykonaných experimentov. [17]



Obr. 16 Vplyv veľkosti koeficientu statického a dynamického trenia: (a) väčšie, (b) menšie hodnoty koeficientov [17]

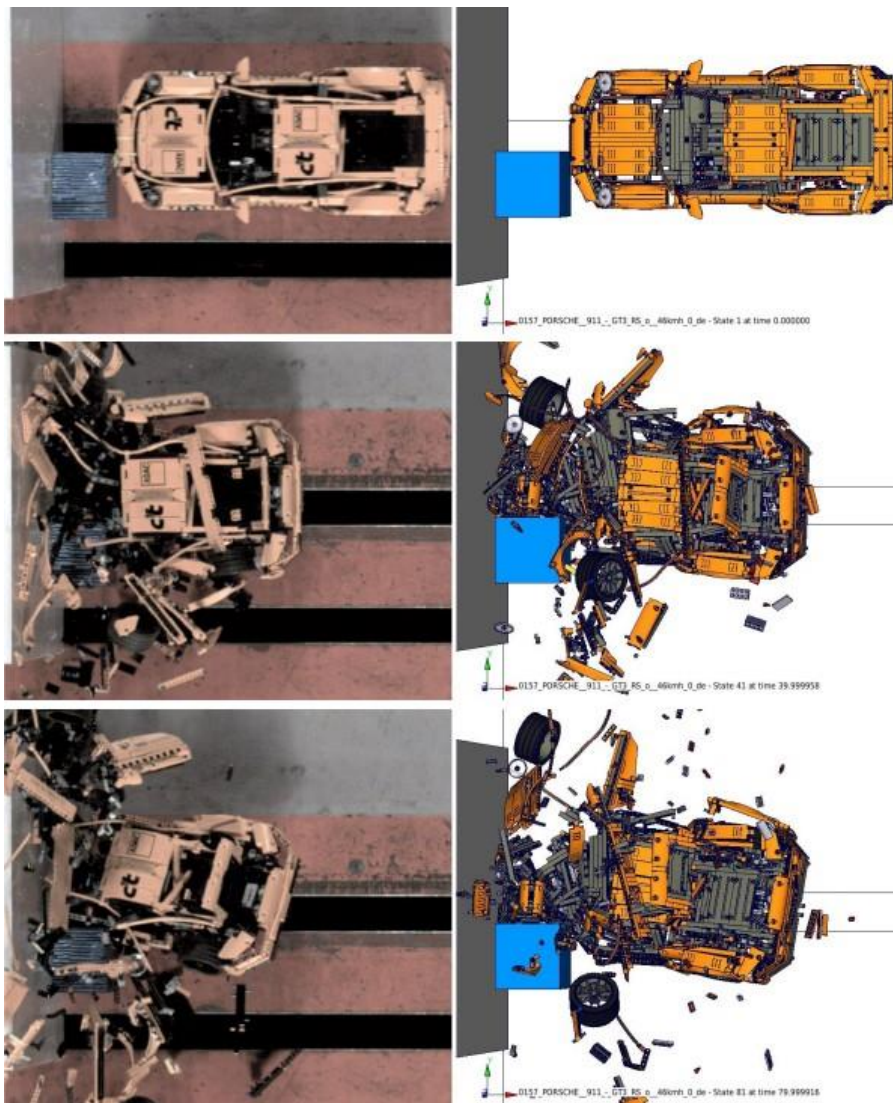
2.2.4 CELKOVÝ MODEL

V celkovom modeli vozidla bolo potrebné nastaviť ešte dve podmienky predtým, než mohla byť spustená simulácia nárazu vozidla. Prvou podmienkou bolo zamedzenie penetrácie jednotlivých kociek pri náraze vozidla. Z tohto dôvodu bol použitý medzi jednotlivými kockami *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE [17].

Druhou podmienkou bolo potrebné uviesť vozidlo do pohybu zadefinovaním počiatočnej rýchlosti vozidla. To bolo zabezpečené zadefinovaním počiatočnej rýchlosti vozidla pre všetky uzly v modeli použitím karty *INITIAL_VELOCITY_GENERATION. Rotácia

kolies bola simulovaná použitím rovnakej karty, avšak s rozdielnou počiatočnou rýchlosťou. Bola tu zadefinovaná translačná aj rotačná rýchlosť kolies, ktorá bola určená polomerom kolesa a rýchlosťou vozidla. [17]

Po nastavení všetkých parametrov bola simulovaná čelná zrážka vozidla do bariéry s presahom. Simulačný čas nárazu bol 120 ms a celkový výpočtový čas bol 22 hodín [17]. Obr. 17 porovnáva výsledky simulácie voči experimentálnej zrážke. Aj keď sa model simulácie nesprával úplne rovnako ako skutočná zrážka, výsledky boli považované za prijateľné.



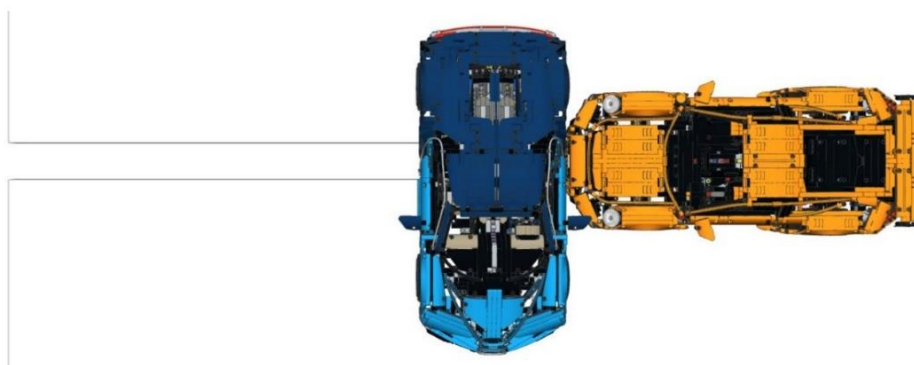
Obr. 17 Porovnanie výsledkov simulácie pre simulačný čas 0 ms, 40 ms a 80 ms [17]

2.3 ZRÁŽKA LEGO® TECHNIC PORSCHE 911 GT3 A BUGATTI CHIRON

Simulácia nárazu LEGO® Technic Porsche 911 GT3 mala veľký úspech. Preto projekt pokračoval s ďalším cieľom vytvoriť zrážku modelu LEGO® Technic Porsche 911 GT3 s LEGO® Technic Bugatti Chiron.

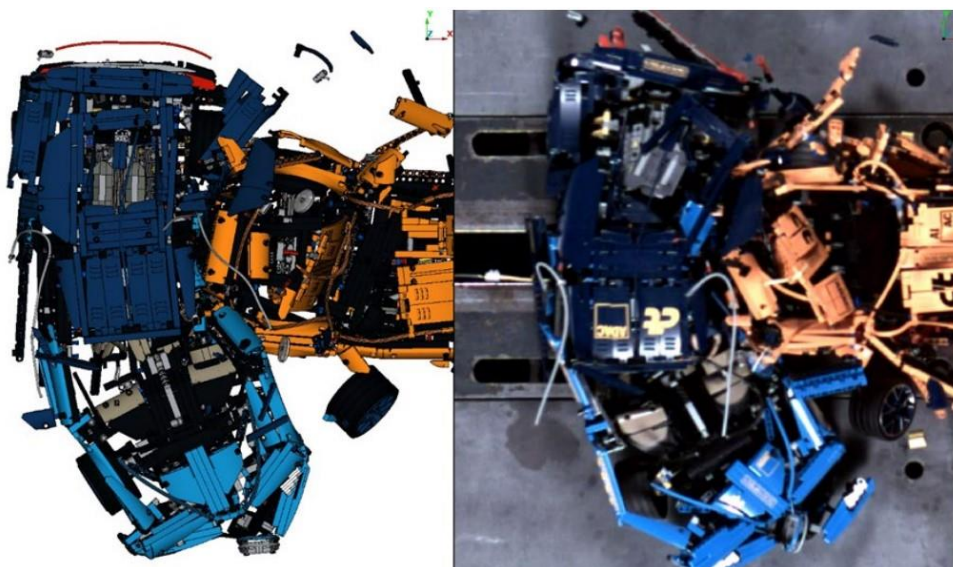
Proces tvorby simulačného modelu Bugatti Chiron pozostával z rovnakého postupu a hodnôt parametrov ako v prípade Porsche 911 GT3. Jediným rozdielom bol počet prvkov siete modelu, ktorý bol v prípade Bugatti Chiron až 25 miliónov a celkovo simulácia obsahovala približne 45 miliónov prvkov [17].

Následne bol vytvorený simulačný model bočného nárazu vozidiel, keď sa model Porsche 911 GT3 pohyboval rýchlosťou $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a narazil do bočnej časti nepohyblivého Bugatti Chiron, približne do miesta, kde sa nachádzal B – stĺpik (viz obr. 18). Simulačný čas bol stanovený na 130 ms a celkový výpočtový čas bol 54 hodín. [17]



Obr. 18 Finálne nastavenie zrážky modelov vozidiel [17]

Výsledky počiatočnej fázy simulácie zrážky boli zhodnotené ako veľmi dobré, ale pri experimentálnom overení dosiahli vozidlá väčšie celkové poškodenie. Dôvodom bol simulačný čas, ktorý pokrýval len náraz vozidiel, ale v skutočnosti modely po zrazení spolu ešte zrýchľovali, až narazili do steny za nárazovou zónou, kde boli úplne zničené. Taktiež model Bugatti Chiron dosiahol počas simulácie menšie škody ako v realite (viz obr. 19). To mohlo byť spôsobené použitím pomerne jednoduchého materiálového modelu alebo ďalšími problémami, ktoré sa týkali naladenia parametrov kontaktu a trenia pri spojení kociek pomocou spojovacích kolíkov. [17]



Obr. 19 Porovnanie simulácie a experimentu v čase 38 ms [17]

3 GEOMETRIA LEGO® MODELU

LEGO® má vo svojej ponuke veľké množstvo modelov vozidiel, ktoré je možné rozdeliť do dvoch kategórií. Prvou kategóriou sú modely zo série LEGO® Technic, ktoré sú vytvorené zo špeciálnych technických LEGO® komponentov (napríklad nosníky, čapy, spojovacie kolíky, ozubené kolesá a iné), vďaka ktorým sú v týchto modeloch podrobne navrhnuté časti vozidla ako riadenie, motor alebo diferenciál. Druhou kategóriou je edícia menších modelov vozidiel Speed Champions, ktoré sú zložené prevažne z klasických LEGO® kociek, ale taktiež obsahujú malé množstvo LEGO® Technic prvkov.

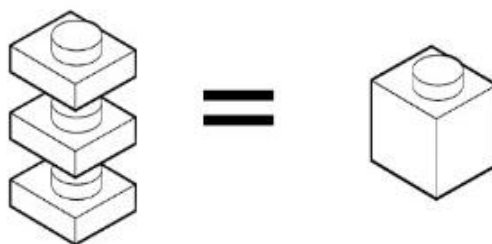
Pre túto nárazovú skúšku bolo vybrané vozidlo z kategórie LEGO® Speed Champions. Jedná sa o model Ferrari 812 Competizione (viz obr. 20), ktorý je zložený z 261 dielikov (vrátane figúrky) a meria cez 160 mm na dĺžku, 70 mm na šírku a 40 mm na výšku [19].



Obr. 20 LEGO® Ferrari 812 Competizione [19]

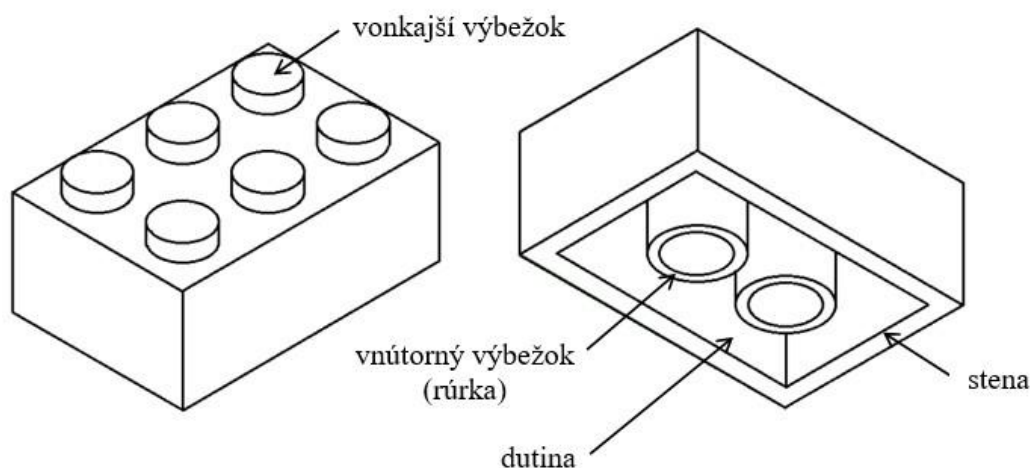
3.1 ANATÓMIA LEGO® KOCIEK

LEGO® prvky prešli počas svojej existencie veľkým vývojom a každým rokom sa objavujú nové typy, ktoré zabezpečujú zobrazenie väčšieho množstva detailov v modeloch. Základný dizajn klasických LEGO® kociek je navrhnutý tak, že spojenie troch plochých kociek výskovo zodpovedá jednej klasickej kocke (viz obr. 21) [20]. Týmto princípom je dosiahnutá kompaktnosť jednotlivých modelov.



Obr. 21 Spojenie troch plochých LEGO® kociek výskovo zodpovedá klasickej LEGO® kocke [20]

Princíp spojenia klasických LEGO® kociek je zabezpečený zasunutím vonkajších výbežkov (nachádzajúcich sa na vrchnej strane kocky), do dutiny druhej kocky. V dutine kocky sa vyskytujú aj vnútorné výbežky (označované aj ako rúrky), ktoré umožňujú zaistenie všetkých spojených vonkajších výbežkov (viz *obr. 22*). Tie sú vyrábané s malým presahom, čím sa v spojení kociek vyvinie dostatočne veľká spojovacia sila, ktorá zabraňuje samovoľnému rozpojeniu kociek. Slúžia tiež na určovanie typu kocky, napríklad kocka s dvoma vonkajšími výbežkami po šírke a so štyrmi po dĺžke sa označuje ako kocka 2×4 . [21]



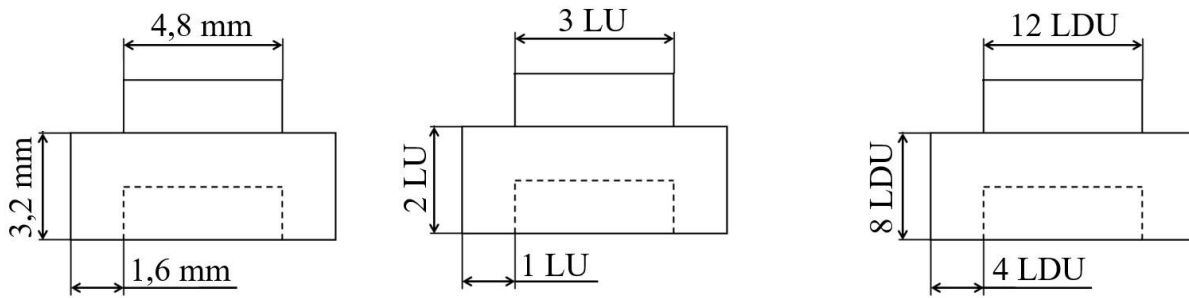
Obr. 22 Popis častí základnej LEGO® kocky

3.2 CAD MODELY LEGO® KOCIEK

Jednotlivé CAD modely LEGO® kociek sú voľne dostupné v špeciálnom LEGO® formáte, ktorý je možné použiť pre programy systému LDraw. LDraw obsahuje knižnicu všetkých CAD súborov LEGO® kociek, pomocou ktorej je možné si vytvoriť virtuálne LEGO® modely, následne manuál pre stavbu a taktiež slúži na renderovanie 3D obrázkov modelu alebo prípadné animácie [22].

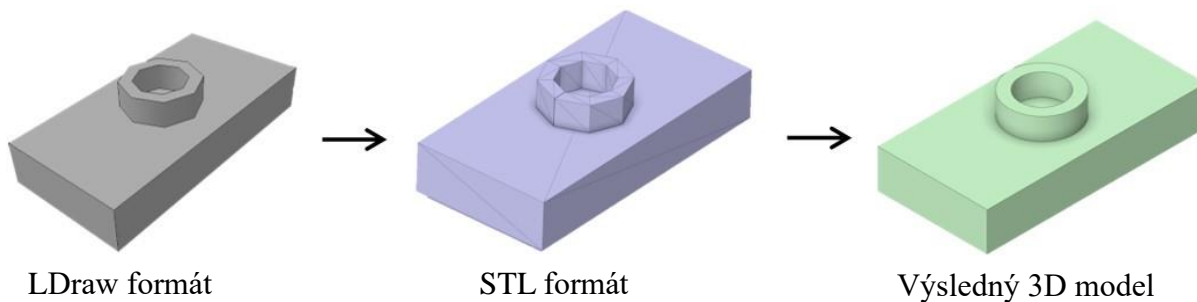
LEGO® nepoužíva klasický metrický systém pre určovanie rozmerov kociek. Zaviedli vlastné LEGO® jednotky (LU), kde $1 \text{ LU} = 1,6 \text{ mm}$. Tento rozmer zodpovedá výške vonkajšieho výbežku a ďalšie rozmery kocky sú jeho násobkom (napríklad výška plochej kocky 1×1 je 2 LU, šírka 5 LU). Hlavným dôvodom prečo LEGO® používa špeciálny typ jednotiek je ten, že pri návrhu modelov si môžu ľudia rýchlo spočítať aké typy a koľko kociek bude v návrhu potrebných napríklad pre vyplnenie medzery.

LU jednotky majú ale jednu neprijemnosť, nakoľko pri ich delení môžu niektoré rozmery LEGO® kociek dosiahnuť hodnoty v desatinných číslach. Preto vznikol ďalší typ jednotiek LDU (LDraw jednotky), kde $1 \text{ LDU} = \frac{1}{4} \text{ LU} = 0,4 \text{ mm}$. LDU pri delení vždy dosahujú hodnoty celých čísiel, čo pomáha ešte rýchlejšiemu určeniu typu kociek, ktoré sú pri návrhu potrebné. Na *obr. 23* je vidieť LEGO® kocku 1×1 v skutočných rozmeroch a následne jej zobrazenie v LEGO® a LDraw jednotkách. [23, 24]



Obr. 23 Porovnanie skutočný rozmerov LEGO® kocky ku zobrazeniu rozmerov v LU a LDU jednotkách

Pretože všetky LDraw súbory kociek sú v jednotkách LDU, bolo ich nutné premodelovať pomocou CAD programu (v prípade tejto diplomovej práce bol použitý SpaceClaim). Ďalším dôvodom bolo to, že pri prevedení LDraw formátu do formátu STL, boli CAD modely LEGO® kociek fazetované a z toho dôvodu nebolo vhodné tento formát použiť pre následnú tvorbu diskretizačného modelu (viz obr. 24). Na základe týchto dvoch poznatkov bola vytvorená vlastná knižnica CAD modelov LEGO® kociek, z ktorých je LEGO® model Ferrari 812 Competizione zložený. Celkovo sa jednalo o 78 rôznych typov LEGO® kociek, ktoré LEGO® model obsahuje.



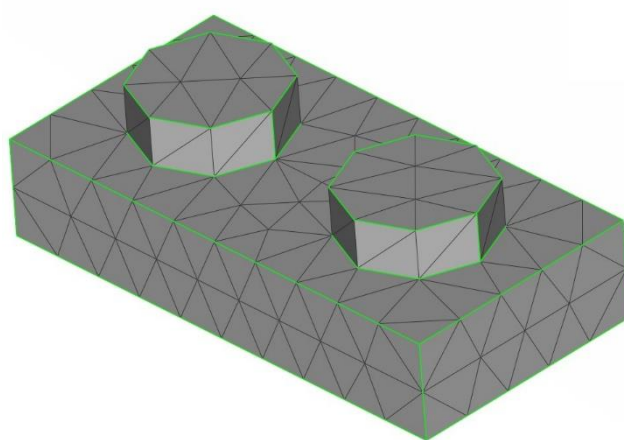
Obr. 24 Prevedenie LEGO® kocky 6092583 do výsledného formátu

3.3 DISKRETIZÁCIA LEGO® KOCIEK

Pre vytvorenie simulačného modelu bolo potrebné určiť typ a veľkosť prvkov siete, ktoré boli následne použité pre diskretizáciu jednotlivých CAD modelov LEGO® kociek obsiahnutých v LEGO® modeli a taktiež v simulačných modeloch dvojíc LEGO® kociek. Tie slúžili na určenie parametrov normálovej a šmykovej sily zlyhania (*NFLF* a *SFLF*) v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, ktorý zabezpečuje spojenie jednotlivých LEGO® kociek (podrobnejšie podkapitola 5.3).

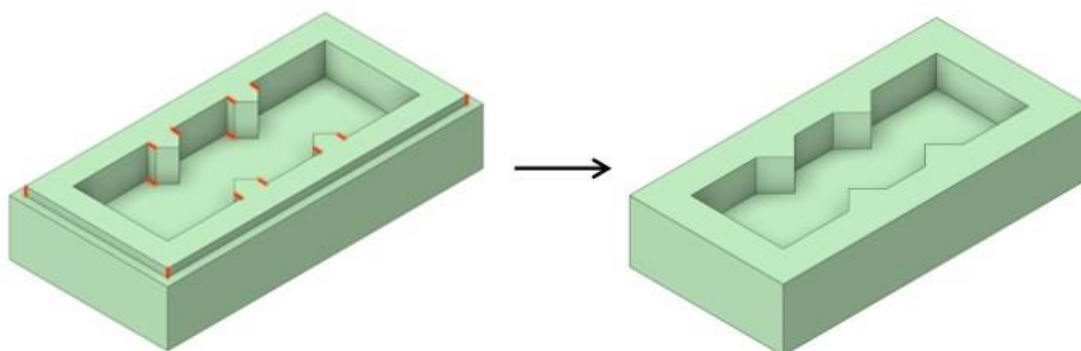
Zvolené boli objemové lineárne štvorsteny, na základe štúdie LEGO® Challenge [17], ktorá tento typ prvkov použila pre diskretizovanie väčšiny LEGO® kociek, ktoré sa nachádzali v modeli LEGO® Porsche 911 GT3 a LEGO® Bugatti Chiron. Veľkosť hrany prvku bola nastavená na hodnotu 1,6 mm, ktorá bola zvolená na základe výšky vonkajšieho výbežku LEGO® kocky (viz obr. 25).

Výbežok jednej kocky je v kontakte s druhou kockou len v určitých bodoch a ich počet závisí na type LEGO® kocky. Kontakt kociek môže byť napríklad v troch alebo štyroch bodoch, alebo aj po celom obvode výbežku. Z tohto dôvodu bol počet uzlov výbežku kocky nastavený na hodnotu osem, čím bolo docielené to, že stena kocky bola s výbežkom v kontakte u všetkých typoch kociek, ktoré model obsahoval a mohli byť jednoducho zvolené pre kontakt *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY. Ten bol aplikovaný medzi jednotlivé spojené kocky a pri simulácii nárazu modelu zabezpečoval rozpojenie kociek (podrobnejšie kapitola 5). Aby bola zabezpečená jeho správna funkcia, bolo potrebné v kontaktných miestach upraviť sieť tak, aby sa uzly steny a vonkajšieho výbežku kociek vzájomne dotýkali. Táto úprava bola dosiahnutá použitím štruktúrovanej siete vo vybraných miestach, prípadne upravením počtu uzlov hrán steny kocky.



Obr. 25 Diskretizácia LEGO® kocky 4211398

V niektorých typoch LEGO® kociek bolo nutné upraviť ich geometriu, nakoľko obsahovala krátke hrany, kde by sa pri diskretizácii tvorili veľmi malé prvky siete, ktoré by spôsobovali spomalenie výpočtu simulácie, prípadne divergovanie výpočtu. Obr. 26 reprezentuje jeden z typov týchto kociek. Vyznačené hrany majú dĺžku 0,4 mm, ale neovplyvňujú kontakt spojenia kociek a ani dizajn celkového modelu. Z tohto dôvodu bola geometria kocky upravená tak, aby neobsahovala tieto malé hrany.



Obr. 26 Úprava LEGO® kocky 6092583 odobraním hrán menších ako 0,4 mm (červené)

Určité typy kociek ale nebolo možné upraviť týmto spôsobom, pretože by bol porušený ich dizajn prípadne funkčnosť. Jednalo sa celkovo o typy LEGO® kociek, ktoré reprezentujú:

- puklice kolies (označenie: 6313457),
- výfuky (označenie: 6345880 a 6360675),
- volant (označenie: 73081),
- strechu vozidla (označenie: 6437891).

Všetky tieto kocky (viz *obr. 27*) pri diskretizácii generovali veľmi malé objemové prvky, ktoré spôsobovali predčasné ukončenie výpočtu simulácie. Taktiež pri náraze nebola použitá LEGO® figúrka, ktorá sa v tomto modeli nachádzala. V závislosti na tejto redukcii sa finálny model skladá z 247 kociek.



Obr. 27 LEGO® kocky a figúrka, ktoré neboli použité vo finálnom modeli vozidla [19, 25]

4 MATERIÁL LEGO® KOCIEK

LEGO® kocky sú vyrábané procesom vstrekovania roztavených plastových granúl, pri teplote 230 °C do kovových nádob v tvare LEGO® kociek a pomocou tlakového zaťaženia vyformované do požadovaných tvarov [26]. V závislosti od druhu LEGO® kocky sú pri výrobe využívané rôzne druhy materiálov, avšak najpoužívanejším je ABS materiál, z ktorého sú vyrábané klasické LEGO® kocky [27]. V simuláciách boli použité hodnoty Youngova modulu E a hustoty ρ uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Základné mechanické vlastnosti ABS materiálu [28, 29]

Mechanické vlastnosti	Hodnota
Youngov modul E	2 100 MPa
Hustota ρ	1060 kg·m ⁻³
Medza pevnosti v ťahu R_m	30 – 60 MPa

4.1 ABS MATERIÁL

ABS (akrylonitril butadién styrén) je termoplast, ktorý sa na výrobu LEGO® kociek používa na základe jeho výborných mechanických vlastností a kompatibilitou s ostatnými dokončovacími procesmi ako je lakovanie alebo povlakovanie. Jedná sa o tvrdý a húževnatý materiál, ktorý má nízky modul pružnosti v porovnaní s inými technickými plastmi, čo zabezpečuje vysokú odolnosť proti praskaniu či lámaniu pri dynamickom zaťažení. Tento typ plastov je odolný voči širokému spektru chemikálií, má dobré izolačné vlastnosti a odoláva vysokým teplotám. [28]

Na základe týchto vlastností je ABS materiál široko využiteľný aj v iných oblastiach. Jedná sa o druhý najpoužívanejší materiál dostupný pre 3D tlač, nakoľko sa dá jednoducho opracovávať a výsledné modely sú veľmi odolné proti poškodeniu. V elektronickom priemysle sa používa na výrobu krytov počítačov, domácich spotrebičov alebo audio zariadení. V automobilovom priemysle sa z neho zhotovujú vonkajšie časti karosérie, panely palubnej dosky alebo obloženia dverí. ABS materiál je široko používaný aj pri výrobe spotrebných tovarov a nachádza čoraz väčšie využitie v zdravotníctve. [28, 30]

4.2 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE

Mechanické vlastnosti ABS materiálu je možné overiť ťahovou skúškou, kde je vzorka materiálu upnutá upínacími čeľuťami do trhacieho stroja a zaťažovaná ťahovou silou až do momentu pretrhnutia. Výsledkom ťahovej skúšky je graf závislosti zaťažovacej sily F na predĺžení vzorku Δl , z ktorého je možné určiť pracovný diagram (závislosť napätia σ na pomernom pozdĺžnom predĺžení ε) na základe vzťahov [31]:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2)$$

kde F je zaťažujúca sila a S_0 je počiatková plocha prierezu, Δl je predĺženie skúšobnej časti vzorku a l_0 je počiatková dĺžka skúšobnej časti vzorku. Z pracovného diagramu sú následne určené základné materiálové charakteristiky ako medza klzu R_e (po jej prekročení dochádza ku trvalej deformácii), medza pevnosti R_m (maximálne zmluvné napätie, ktoré vzorka dokáže preniesť, dochádza ku vzniku krčku) a dopočítat' hodnoty ťažnosti A a kontrakcie Z [31]:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (3)$$

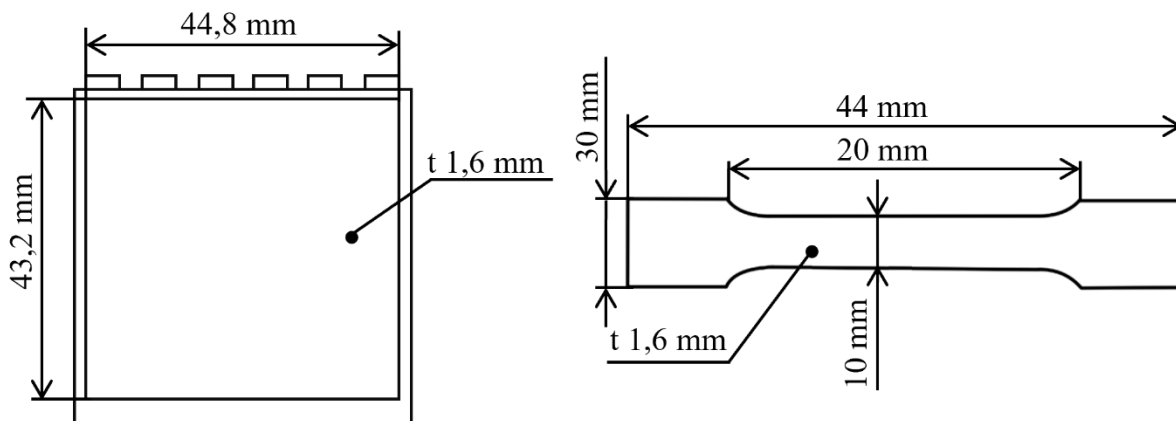
$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100, \quad (4)$$

kde l resp. S je dĺžka resp. prierez vzorku po pretrhnutí.

Pre ťahovú skúšku ABS materiálu LEGO® kociek bola navrhnutá skúšobná vzorka s rozmermi uvedenými na *obr. 28* vpravo, ktorú je možné vyfrézovať z LEGO® kocky 59349 (viz *obr. 28* vľavo). Sila potrebná na pretrhnutie vzorku bola určená:

$$F_{\max} = R_m \cdot S_0 = 65 \cdot 16 = 1040 \text{ N}, \quad (5)$$

kde R_m je medza pevnosti v ťahu, pre ktorú bola použitá vyššia hodnota ($R_m = 65 \text{ MPa}$) ako je udávané v *tab. 1*, aby sa nestalo, že by sa vzorka pri testovaní nepretrhla. Z časových dôvodov, avšak nebolo možné ťahovú skúšku realizovať.



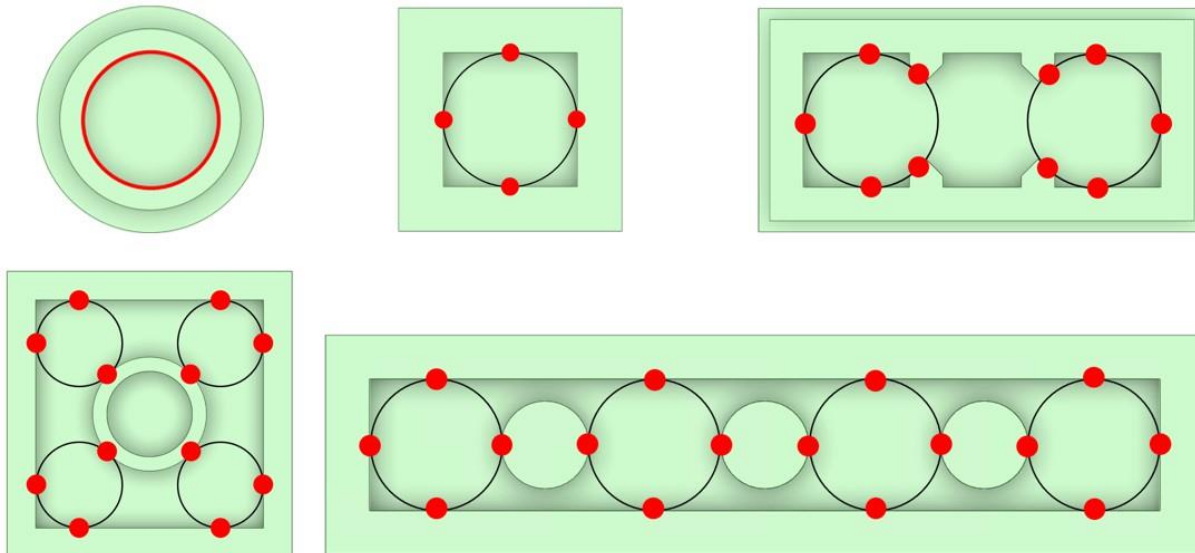
Obr. 28 Rozmery LEGO® kocky 59349 (vľavo), návrh skúšobného vzorku (vpravo)

5 SILA ROZPOJENIA

Spojenie LEGO® kociek je dosiahnuté pomocou zatlačenia vonkajších výbežkov jednej kocky do dutiny druhej kocky. Vonkajšie výbežky sú vyrábané s malým presahom, čím v kontakte kociek dochádza k elastickej deformácii, ktorá vyvodzuje normálové zaťaženie. Kocky sú spojené len pomocou statického trenia a je ich možné rozpojiť generovaním zaťažujúcej sily, ktorá prekročí maximálnu treciu silu medzi kontaktnými plochami.

Výbežok jednej kocky je v kontakte s druhou kockou len v určitých bodoch, v závislosti na tom, o aký typ kocky sa jedná. Na základe toho v koľkých bodoch sú kocky spojené, je potrebné generovať rozdielnu veľkosť zaťažujúcej sily, pri ktorej dochádza ku rozpojeniu dvojice kociek.

Tento typ kontaktu je v programe LS-DYNA možné simulovať pomocou typu kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, ktorého parametre je potrebné nastaviť tak, aby rozpojenie kociek zodpovedalo realite. Z toho dôvodu bola vykonaná skupina simulácií, pre spojenie kociek v štyroch bodoch, na základe ktorých boli odvodené parametre kontaktu, zabezpečujúce rozpojenie kociek po prekročení kritéria rozpadu. Taktiež bolo vykonané experimentálne overenie veľkosti sily potrebnej na rozpojenie kociek, pre päť najpoužívanejších typov spojenia, nachádzajúcich sa v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione, ktoré sú zobrazené na obr. 29, kde červené kruhy resp. kružnica, zobrazujú miesta, v ktorých sa vonkajší výbežok dotýka vnútorných plôch druhej kocky a čierne kružnice reprezentujú vonkajšie výbežky.



Obr. 29 Typy kontaktov najčastejšie sa vyskytujúcich v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione: čierna – vonkajšie výbežky, červená – miesta dotyku

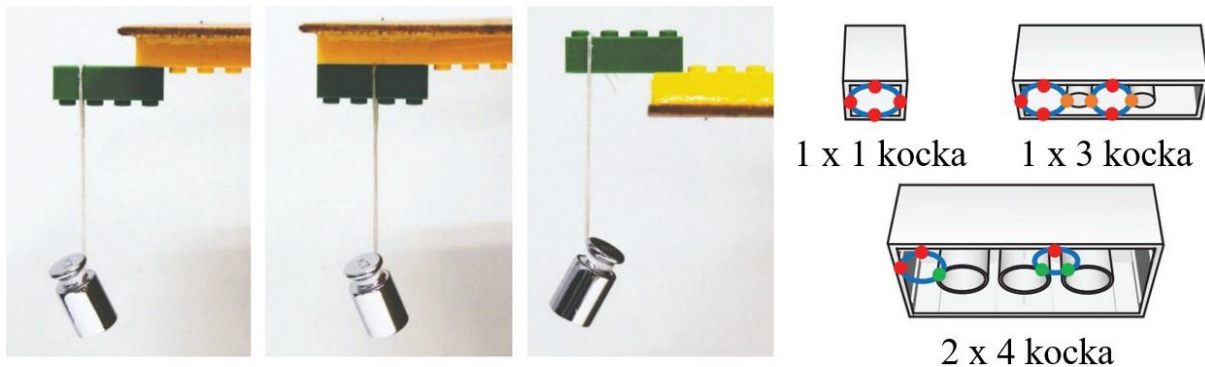
5.1 MAXIMÁLNE TRECIE ZAŤAŽENIE

Spojenie kociek je zabezpečené len pomocou statického trenia medzi kontaktnými plochami. Aby bolo možné kocky rozpojiť, je potrebné vyvinúť ťahovú silu F_t , ktorá prekročí maximálnu treciu silu jedného výbežku $F_{t,limit}$ [32]:

$$F_t \geq k_v \cdot F_{t,limit} \quad (6)$$

kde k_v je počet výbežkov kocky zahrnutých v spojení. Veľkosť maximálnej trecej sily jedného výbežku závisí na tom, či sa jedná o novú alebo používanú LEGO® kocku. Pre nové LEGO® kocky je možné rátať s $F_{t,limit} > 3$ N a pre používané LEGO® kocky je odhadovaná hodnota stanovená na $F_{t,limit} = 2,8$ N [33].

Veľkosť maximálnej trecej sily jedného výbežku je možné stanoviť aj experimentálnymi meraniami, ktoré boli vykonané skupinou vedcov Luo et al. [34]. Tí vytvorili tri prípady rozpojenia LEGO® kociek. Ako je vidieť na obr. 30 vľavo, jedna kocka bola prilepená na podložku a na druhú kocku bolo pripevnené závažie.



Obr. 30 Experimentálne meranie (vľavo), kontaktné body spojených kociek (vpravo) [34]

Tieto typy rozpojenia boli testované pre LEGO® kocky typu 1×3 , 1×4 , 1×6 , 1×8 , 2×3 , 2×4 , 2×6 a 2×8 . Celkovo bolo vykonaných 70 variácií testov s rôznymi vzdialenosťami umiestnenia závažia od spojeného vonkajšieho výbežku. Ich cieľom bolo nájsť závažie s maximálnou hmotnosťou, pri ktorej LEGO® kocky ešte ostali spojené. Analýzou obdržaných výsledkov dosiahli $F_{t,limit} = 4 \cdot 71,658 \text{ g} \cdot 9,8 \text{ ms}^{-1} = 2,8$ N, s predpokladom, že vonkajší výbežok je v kontakte s dutinou v štyroch bodoch (viz obr. 30 vpravo, typ LEGO® kocky 1×1 a 1×3). [32, 34]

5.2 KONTAKT TIEBREAK

Modelovanie kontaktov v programe LS-DYNA je založené na definovaní podradených uzlov voči nadradenému segmentu, čím sa zabráni ich penetrácii. Kontakt môže byť definovaný buď pomocou celých komponentov alebo ich častí na základe vymedzenia skupiny uzlov alebo elementov siete. [35]

Spojenie uzla a najbližšieho segmentu je reprezentované lineárnou pružinou a jej tuhosť následne určuje silu, ktorou sú podradený uzol a nadradený segment zviazané. V prípade typu kontaktu TIEBREAK, ktorý je založený na prístupe penalizácie (v karte kontaktu reprezentované možnosťou $\text{SOFT} = 0$), sa na určenie tuhosti pružiny používa veľkosť kontaktného segmentu a jeho materiálové vlastnosti. Výpočet tuhosti pružiny segmentu sa odvíja od toho, či je spojenie podradeného uzla a nadradeného segmentu realizované na sieti z objemových (rovnica (7)) alebo škrupinových prvkov (rovnica (8)) [35]:

$$k = \frac{f_s \cdot S \cdot K}{V}, \quad (7)$$

$$k = \frac{f_s \cdot S \cdot K}{\text{maximálna diagonála}}, \quad (8)$$

kde S je plocha kontaktného segmentu, K je objemový modul pružnosti segmentu, V je objem kontaktného segmentu a hodnota f_s je vyjadrená vzťahom [35]:

$$f_s = SLSFAC \cdot SFS, \quad (9)$$

alebo

$$f_s = SLSFAC \cdot SFM, \quad (10)$$

kde $SLSFAC$ (prednastavená hodnota 0,1) je pomer penalizácie, SFS a SFM (prednastavená hodnota 1) je pomer predvolenej penalizačnej tuhosti podradeného uzlu resp. nadradeného segmentu.

Pre dosiahnutie správneho zviazania podradeného uzla a nadradeného segmentu je potrebné splniť nasledujúce kritériá [36]:

- podradený uzol musí byť normálovou projekciou nadradeného segmentu,
- vzdialenosť medzi podradeným uzlom a nadradeným segmentom v normálovom smere nesmie prekročiť určitú toleranciu, ktorá môže byť zmenená pomocou negatívnej hodnoty hrúbky kontaktu.

V prípade kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY sú podradené uzly zviazané s nadradeným segmentom do okamžiku dosiahnutia kritéria zlyhania. To je možné definovať pomocou normálových a šmykových síl zlyhania [37]:

$$\left(\frac{|f_n|}{NFLF} \right)^{NEN} + \left(\frac{|f_s|}{SFLF} \right)^{MES} \geq 1, \quad (11)$$

kde f_n a f_s je normálová resp. šmyková sila rozhrania, NEN a MES je exponent pre normálovú resp. šmykovú silu a $NFLF$ a $SFLF$ je normálová resp. šmyková sila zlyhania. Následne k rozpadu dôjde, ak je ľavá strana rovnice (11) väčšia alebo rovná 1. Hodnoty týchto parametrov boli stanovené na základe simulačných modelov (podrobnejšie podkapitola 5.3).

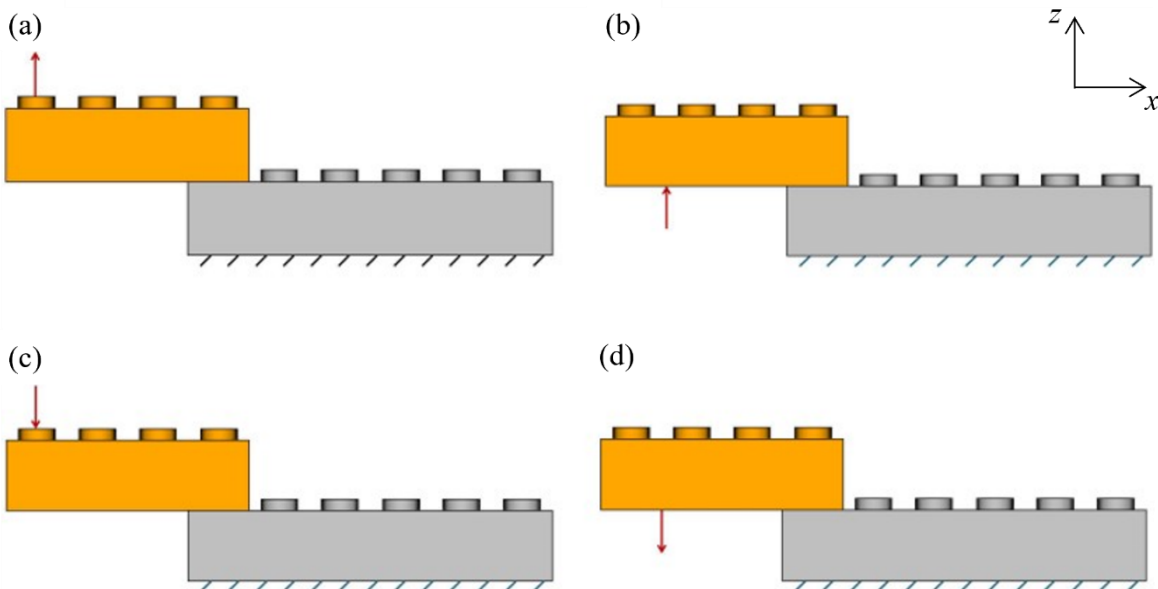
Ďalší parameter nastavený v karte *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, bol prevzatý zo simulácii nárazov v LEGO® Challenge (podkapitola 2.2.3, obr. 15). Jedná sa o parameter viskózneho tlmenia kontaktu (VDC), ktorého prednastavená hodnota je 0. VDC parameter je výhodné použiť v prípadoch simulácii nárazov, nakoľko viskózne tlmenie znižuje vysokofrekvenčné oscilácie kontaktných síl. Zvolená hodnota $VDC = 20\%$ následne zodpovedá 20 % kritického tlmenia. [35]

5.3 URČENIE PARAMETROV *NFLF* A *SFLF*

Aby bola zabezpečená správna funkcia kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, bolo potrebné zistiť hodnoty parametrov *NFLF* a *SFLF*, ktoré zaisťujú rozpojenie LEGO® kociek v modeli počas nárazu. Cieľom bolo zistiť hodnoty parametrov, pri ktorých bude maximálna trecia sila jedného výbežku $F_{t,limit} = 2,8$ N, prípadne $F_t = 11,2$ N pre spojenie kociek pomocou štyroch vonkajších výbežkov a na základe získaných výsledkov určiť optimálne hodnoty, ktoré budú použité pre celý model.

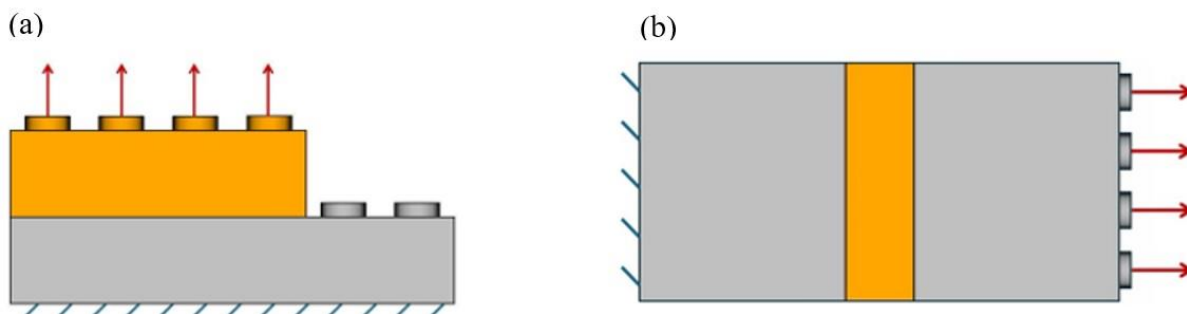
5.3.1 MODEL Y GEOMETRIE

Pre nastavenie parametrov *NFLF* a *SFLF* v karte *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY boli vytvorené štyri typy simulácie pre dvojice kociek, kde bol vonkajší výbežok jednej kocky v kontakte s druhou kockou v štyroch bodoch. Tri typy boli prevzaté zo štúdie Luo et al. [34] (viz obr. 30), kde v dvoch prípadoch boli kocky spojené pomocou jedného výbežku a zaťažovacia sila bola aplikovaná na kraj vrchnej kocky. Nakoľko bol fyzický experiment vykonaný pomocou závažia, ktoré viselo na šnúrke medzi dvoma výbežkami kocky, pre simuláciu bol každý variant rozdelený na dva prípady, kde sila pôsobila buď na vonkajší alebo na vnútorný výbežok kocky. Vďaka tomuto prístupu bolo obdržané väčšie množstvo výsledných hodnôt, ktoré mohli byť medzi sebou porovnané, nakoľko veľkosť ramena, na ktorom zaťažovacia sila pôsobí, bola v každom prípade odlišná. Obr. 31 (a) a (b) reprezentuje prvý variant modelov, kde je znázornená zaťažujúca sila F_z , ktorá pôsobí v kladnom smere osi z na vonkajší (viz obr. 31 (a)) a vnútorný výbežok (viz obr. 31 (b)) vrchnej kocky. Druhý variant modelov je znázornený na obr. 31 (c) a (d), kde zaťažujúca sila pôsobí v zápornom smere osi z tiež na vonkajší (viz obr. 31 (c)) a vnútorný (viz obr. 31 (d)) výbežok vrchnej kocky.



Obr. 31 Simulačné modely pre LEGO® kocky spojené pomocou jedného vonkajšieho výbežku: (a) a (b) prvý variant; (c) a (d) druhý variant

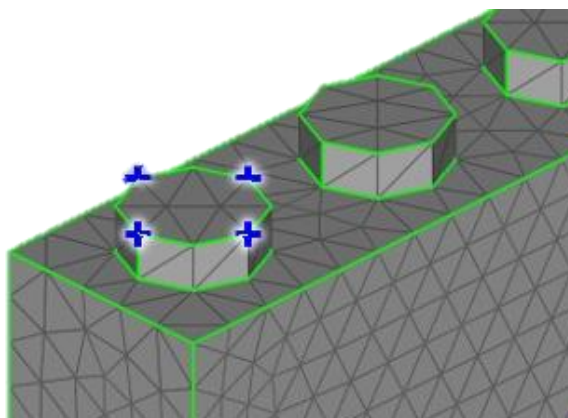
V treťom prípade boli kocky spojené pomocou štyroch výbežkov a rozpojenie bolo realizované aplikovaním zaťažujúcej sily na všetky štyri výbežky vrchnej kocky (viz obr. 32 (a)). Aby bolo možné porovnať výsledky simulácie pre spojenie kociek štyrmi výbežkami, bol vytvorený ešte jeden simulačný model, ktorého reálne prevedenie bolo následne použité pre experimentálne overenie veľkosti sily, ktorá je potrebná na rozpojenia kociek (viz obr. 32 (b)).



Obr. 32 Simulačné modely pre LEGO® kocky spojené pomocou štyroch vonkajších výbežkov: (a) tretí a (b) štvrtý variant

5.3.2 NASTAVENIE MODELOV

Správna funkcia simulačných modelov bola zabezpečená pomocou nastavenia niekoľkých parametrov v programe ANSA. Pre kontakt *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY boli definované časti modelu, medzi ktorými bude kontakt pôsobiť. Pre podradený segment bola nastavená skupina uzlov na výbežku, ktorá je do kontaktu s plochami dutiny druhej kocky. Vo všetkých štyroch simulačných modeloch bol kontakt realizovaný štyrmi uzlami (viz obr. 33). Nadradený segment bol definovaný ako skupina všetkých prvkov druhej kocky.



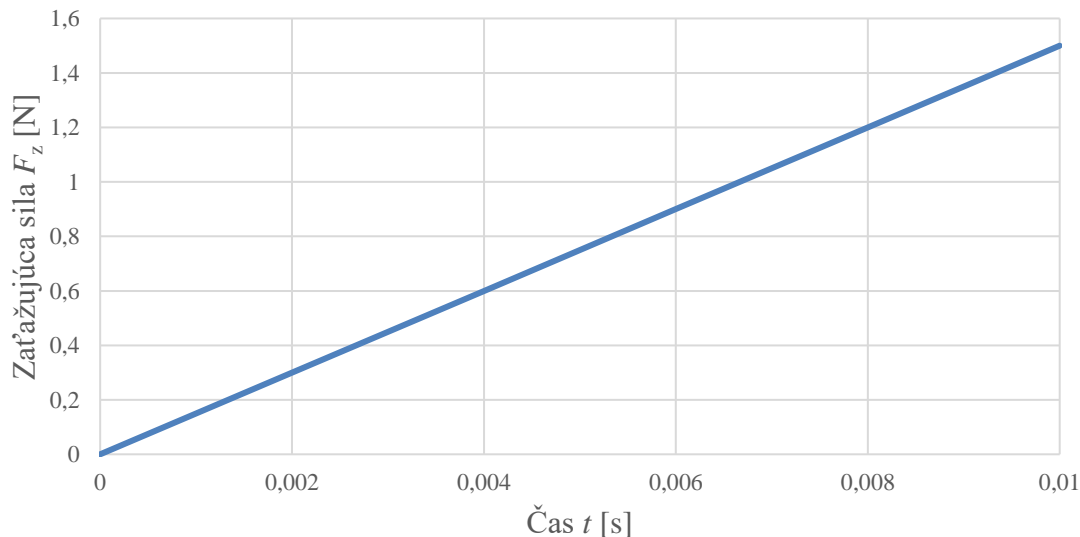
Obr. 33 Kontaktné uzly jedného vonkajšieho výbežku

Pri prvom a druhom variante modelov bol aplikovaný kontakt *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, ktorý zabráňoval penetrácii kociek počas simulácie. Ten bol nastavený medzi dvoma kockami na základe definovania podradeného (SSID) a nadradeného (MSID) segmentu pomocou ich identifikačného čísla v karte kontaktu.

Simulovanie votknutia spodnej kocky bolo docielené aplikovaním okrajovej podmienky *BOUNDARY_SPC_SET na súbor uzlov, nachádzajúcich sa na dolnej časti kocky. V karte okrajovej podmienky bolo následne zabránené pohybu kocky vo všetkých troch translačných smeroch.

Zaťažujúca sila bola aplikovaná na skupinu uzlov nachádzajúcich sa na výbežku. V karte *LOAD bola v časti DOF nastavená os, v ktorej sila pôsobila (vo všetkých prípadoch os z) a časť SF(G) určoval jej smer. Pre hodnotu SF(G) = 1 zaťažujúca sila pôsobila v kladnom smere osi z a SF(G) = -1 určovala pôsobenie sily v zápornom smere osi z . Rovnomerné rozloženie zaťažujúcej sily na všetky uzly bolo dosiahnuté nastavením časti DISTRIBUTED = YES.

Lineárna zaťažujúca krivka bola namodelovaná v závislosti na tom, či boli kocky spojené len pomocou jedného výbežku alebo všetkých štyroch. Pre spojenie jedným výbežkom bola maximálna sila zaťaženia určená na hodnotu 1,5 N v čase 10 ms (viz obr. 34) a pre kocky spojené štyrmi výbežkami bola hodnota zaťažujúcej sily v rovnakom čase 15 N.



Obr. 34 Priebeh zaťažujúcej sily v závislosti na čase pre modely kociek spojené jedným vonkajším výbežkom

Pre všetky prípady spojenia bol v karte LS-DYNA_CONTROL nastavený koncový čas simulácie na 10 ms. V karte DATABASE bol určený parameter D3PLOT, ktorý zabezpečuje výslednú animáciu simulácie a tiež požadované sily, ktoré boli v simulácii skúmané:

- *NODFOR* – kontaktné sily pôsobiace v skupine uzlov na výbežku kocky, ktoré sú v kontakte s druhou kockou,
- *RCFORC* – výsledné sily kontaktného rozhrania,
- *SPCFORC* – sila pôsobiaca vo votknutí kocky.

Veľkosť časového kroku týchto parametrov bola určená na hodnotu $9,9 \cdot 10^{-7}$ s na základe rovnice [38]:

$$\Delta t_e = \frac{L}{c}, \quad (12)$$

kde L je dĺžka prvku a c je rýchlosť zvuku [38]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (13)$$

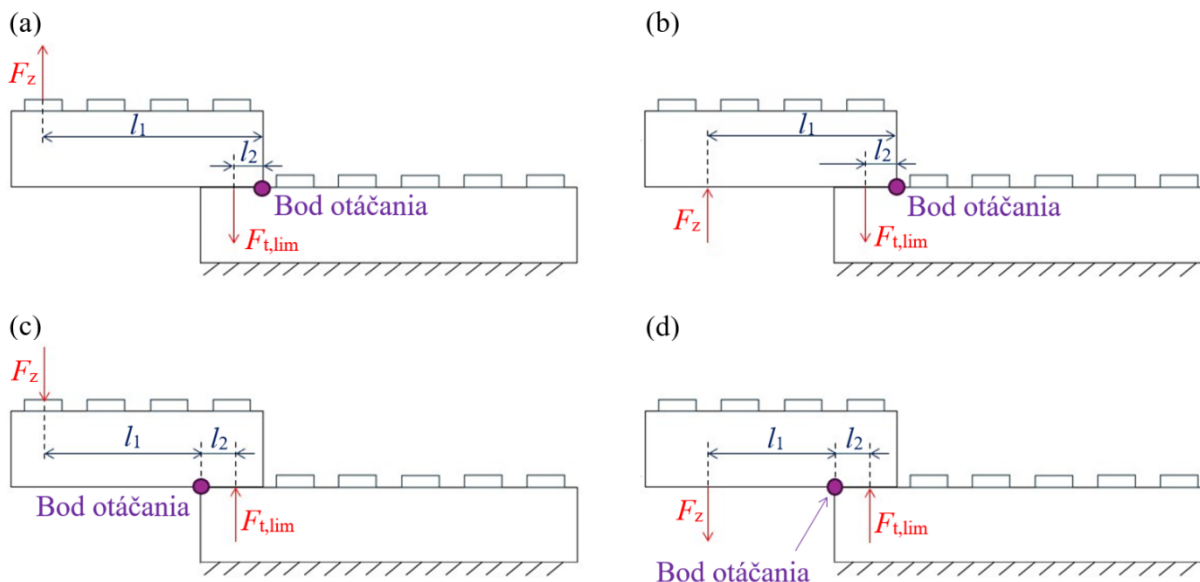
5.3.3 PARAMETRE NFLFA SFLF

Prvotne boli simulácie jednotlivých modelov realizované s prevzatými hodnotami parametrov z LEGO® Challenge (viz kapitola 2.2.3, obr. 15), s ktorými ale nebola dosiahnutá potrebná veľkosť maximálnej trecej sily jedného výbežku. Z tohto dôvodu bol parameter *NFLF*, reprezentujúci normálovú silu rozpadu, upravený na hodnotu 1,45 N, ktorá bola následne použitá aj vo výslednej karte kontaktu a parameter *SFLF*, reprezentujúci šmykovú silu rozpadu, bol zistený postupnými simuláciami jednotlivých modelov.

Pre prvý a druhý variant modelov (viz obr. 31) bolo potrebné parameter *SFLF* naladiť na takú hodnotu, aby maximálna sila jedného výbežku dosahovala $F_{t,limit} = 2,8$ N. Nakoľko zaťažujúca sila F_z a trecia sila jedného výbežku $F_{t,limit}$ pôsobili na určitom ramene voči bodu otáčania (jednotlivé prípady sú znázornené na obr. 35), bolo potrebné určiť momentovú rovnováhu týchto síl:

$$F_z \cdot l_1 = F_{t,limit} \cdot l_2, \quad (14)$$

kde l_1 je vzdialenosť zaťažujúcej sily od bodu otáčania a l_2 je vzdialenosť maximálnej trecej sily na jednom výbežku od bodu otáčania.



Obr. 35 Momentové rovnováhy zaťažujúcej sily F_z a maximálnej trecej sily jedného výbežku $F_{t,limit}$ pri spojení dvoch kociek pomocou jedného výbežku: (a) a (b) prvý variant; (c) a (d) druhý variant

Z rovnice (14) bola následne vyjadrená závislosť maximálnej trecej sily jedného výbežku na zaťažujúcej sile:

$$F_{t,limit} = F_z \cdot \frac{l_1}{l_2}, \quad (15)$$

Hodnota vzdialenosti zaťažujúcej sily od bodu otáčania l_1 bola pre každý prípad simulácie rozdielna a jej hodnoty sú uvedené v *tab. 2*. Vzdialenosť maximálnej trecej sily jedného výbežku od bodu otáčania mala vo všetkých simulačných modeloch konštantnú hodnotu $l_2 = 0,4$ mm. Na základe veľkostí jednotlivých ramien l_1 a l_2 bol z rovnice (15) vyjadrený pomer medzi pôsobiacimi silami F_z a $F_{t,limit}$, ktorý je pre jednotlivé prípady uvedený v *tab. 2*.

Tab. 2 Vzdialenosť zaťažujúcej sily od bodu otáčania a výsledná závislosť maximálnej trecej sily jedného výbežku $F_{t,limit}$ na zaťažujúcej sile F_z

Simulačný model		Vzdialenosť zaťažujúcej sily od bodu otáčania	Maximálna trecia sila jedného výbežku
		l_1 [mm]	
Prvý variant	Vonkajší výbežok	28	$F_{t,limit} = 7 \cdot F_z$
	Vnútorý výbežok	24	$F_{t,limit} = 6 \cdot F_z$
Druhý variant	Vonkajší výbežok	20	$F_{t,limit} = 5 \cdot F_z$
	Vnútorý výbežok	16	$F_{t,limit} = 4 \cdot F_z$

Pre jednotlivé prípady rozpojenia kociek bola veľkosť zaťažujúcej sily F_z určená z výsledkov simulácie, pomocou priebehu výslednej sily *RCFORC* v smere osi z pre kontakt *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY. Z tohto priebehu bol zistený čas rozpojenia dvojice kociek a ten bol následne vyneseny do preddefinovaného grafu lineárnej závislosti zaťažujúcej sily na čase (viz *obr. 34*). Z neho bola určená hodnota zaťažujúcej sily F_z , pri ktorej dochádzalo ku rozpojeniu kociek. Po dosadení hodnôt zaťažujúcej sily F_z do rovníc v *tab. 2* boli získané výsledné veľkosti maximálnych trecích síl na jednom výbežku pre jednotlivé prípady rozpojenia.

Cieľom tohto iteračného procesu bolo získať také hodnoty parametru *SFLF*, ktorý ovplyvňuje čas rozpojenia dvojice kociek, aby veľkosť výslednej maximálnej trecej sily rozpojenia jedného výbežku mala hodnotu $F_{t,limit} = 2,8$ N. Výsledné hodnoty parametru *SFLF* pre všetky typy zaťaženia dvojice kociek spojených pomocou jedného výbežku sú zobrazené v *tab. 3*.

Na základe rovnice (6) bolo potrebné pre tretí a štvrtý variant modelov (viz *obr. 32*), kde bolo spojenie kociek zabezpečené pomocou štyroch výbežkov, nájsť také hodnoty parametrov *SFLF*, aby výsledná ťahová sila dosiahla hodnoty $F_t = 11,2$ N. Výslednú ťahovú silu bolo možné určiť z priebehu výslednej sily *RCFORC* v smere osi z pre kontakt *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY. *Tab. 4* zobrazuje hodnoty parametru *SFLF* pre dvojice kociek spojených štyrmi výbežkami.

Tab. 3 Hodnota parametru šmykovej sily zlyhania $SFLF$ pre $F_{t,limit} = 2,8$ N

Simulačný model			Parameter šmykovej sily zlyhania pre $F_{t,limit} = 2,8$ N
			$SFLF$ [N]
Prvý variant	Vonkajší výbežok	Obr. 31 (a)	0,897
	Vnútorový výbežok	Obr. 31 (b)	0,967
Druhý variant	Vonkajší výbežok	Obr. 31 (c)	1,025
	Vnútorový výbežok	Obr. 31 (d)	0,996

Tab. 4 Hodnota parametru šmykovej sily zlyhania $SFLF$ pre $F_t = 11,2$ N

Simulačný model		Parameter šmykovej sily zlyhania pre $F_t = 11,2$ N
		$SFLF$ [N]
Tretí variant	Obr. 32 (a)	0,845
Štvrtý variant	Obr. 32 (b)	0,942

Z výsledných šiestich hodnôt parametrov šmykovej sily zlyhania $SFLF$, pre jednotlivé spôsoby spojenia dvojice kociek, buď pomocou jedného alebo štyroch výbežkov, bola vypočítaná priemerná hodnota parametru $SFLF = 0,9453$ N. S touto hodnotou boli na záver simulované všetky modely spojenia, aby bola overená odchýlka veľkosti maximálnej trecej sily jedného výbežku $F_{t,limit}$, resp. ťahovej sily F_t , od ideálnej hodnoty $F_{t,limit} = 2,8$ N, resp. $F_t = 11,2$ N.

Pri prvom a druhom variante spojenia kociek (viz obr. 31) je interval maximálnej trecej sily na jednom výbežku odhadovaný na $F_{t,limit} = (2,5; 3)$ N [33]. Ako je znázornené v tab. 5, prvé tri modely rozpojenia kociek spadajú do tejto oblasti. Pri poslednom modeli, kde je zaťažovacia sila aplikovaná na vnútorový výbežok v zápornom smere osi z je hodnota $F_{t,limit}$ menšia, ale nakoľko zaťažujúca sila F_z pôsobí na najmenšom ramene zo všetkých štyroch konfigurácii a hodnoty intervalu sú len približne odhadnuté, je možné túto hodnotu považovať za dostačujúcu.

Na základe rovnice (6) je možné upraviť interval maximálnej trecej sily jedného výbežku tak, aby zodpovedal intervalu ťahovej sily $F_t > (10; 12)$ N, ktorú je potrebné prekonať pri rozpojení kociek, pri treťom a štvrtom variante (viz obr. 32) spojenia kociek pomocou štyroch výbežkov. Ako je možné vidieť v tab. 6 štvrtý variant, kde sú spojené kocky s rovnakým počtom vonkajších výbežkov, sa veľkosť ťahovej sily neodchyľuje od ideálnej hodnoty $F_t = 11,2$ N. Pri treťom variante je táto hodnota vyššia, to ale môže byť spôsobené tým, že spodná kocka má väčší počet vonkajších výbežkov ako vrchná a kocky nie sú spojené v osi symetrie.

Tab. 5 Maximálna trecia sila jedného výbežku s parametrami kontaktu $NFLF = 1,45 \text{ N}$ a $SFLF = 0,9453 \text{ N}$ (cieľ 2,8 N)

Simulačný model		Maximálna trecia sila jedného výbežku
		$F_{t,limit} \text{ [N]}$
Prvý variant	Vonkajší výbežok	2,87
	Vnútorň výbežok	2,73
Druhý variant	Vonkajší výbežok	2,69
	Vnútorň výbežok	2,42

Tab. 6 Ťahová sila s parametrami kontaktu $NFLF = 1,45 \text{ N}$ a $SFLF = 0,9453 \text{ N}$ (cieľ 11,2 N)

Simulačný model	Ťahová sila
	$F_t \text{ [N]}$
Tretí variant	12,50
Štvrtý variant	11,20

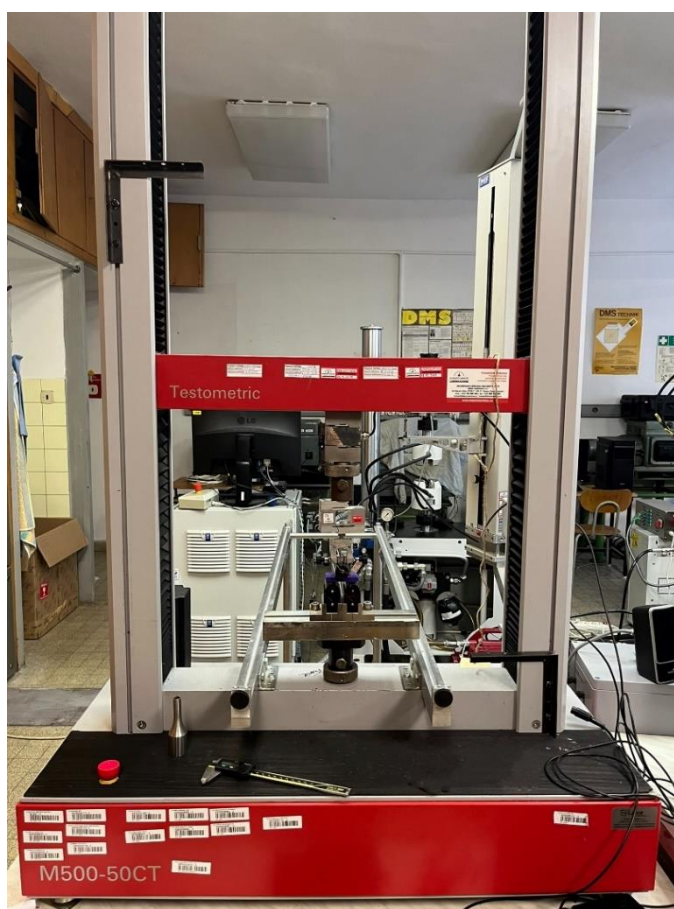
Na základe všetkých uvedených poznatkov bola na záver vytvorená výsledná karta *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY (viz obr. 36), ktorá bola následne použitá pre spojenie všetkých kociek v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione.

ID	TYPE							
1	TIEBREAK_NODES_ONLY							
SSID	MSID	SSTYP	MSTYP		MBOXID	SPR	MPR	
16	3	4: Node set	2: Part set			0	0	
FD_TYPE	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
					20.	0		
SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF	
NFLF	SFLF	NEN	MES					
1.45	0.9453							
OPTIONAL CARDS A,B,C,D,E								
NONE								
_MPP								
_THERMAL								

Obr. 36 Ukážka výslednej karty *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY

5.4 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE SILY ROZPOJENIA

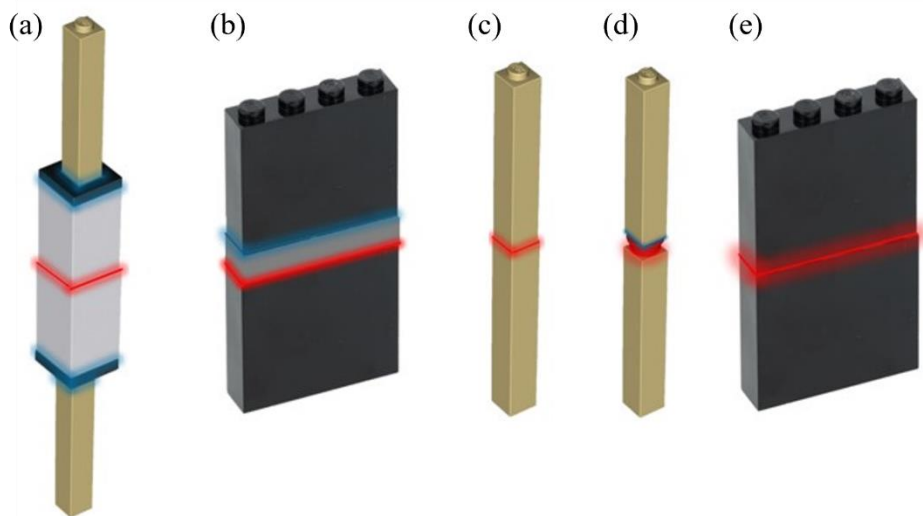
Experimentálne overenie sily rozpojenia bolo realizované v Technickej univerzite v Ostrave v spolupráci s pánom doc. Ing. Martinom Fuskom, Ph.D. Jednotlivé kocky, ktoré sa nachádzajú v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione, boli roztriedené do kategórie v závislosti na tom, v koľkých bodoch je vonkajší výbežok jednej kocky v kontakte so stenou a vnútorným výbežkom druhej kocky. Následne bolo vybraných päť najčastejšie používaných typov kontaktov (viz obr. 29), ktoré boli testované na namáhanie jednoosím ťahom a trojbodovým ohybom. Meranie prebiehalo na univerzálnom testovacom stroji Testometric M500 – 50 CT a bol použitý 100 N snímač zaťaženia (viz obr. 37).



Obr. 37 Univerzálny testovací stroj Testometric M500 – 50 CT

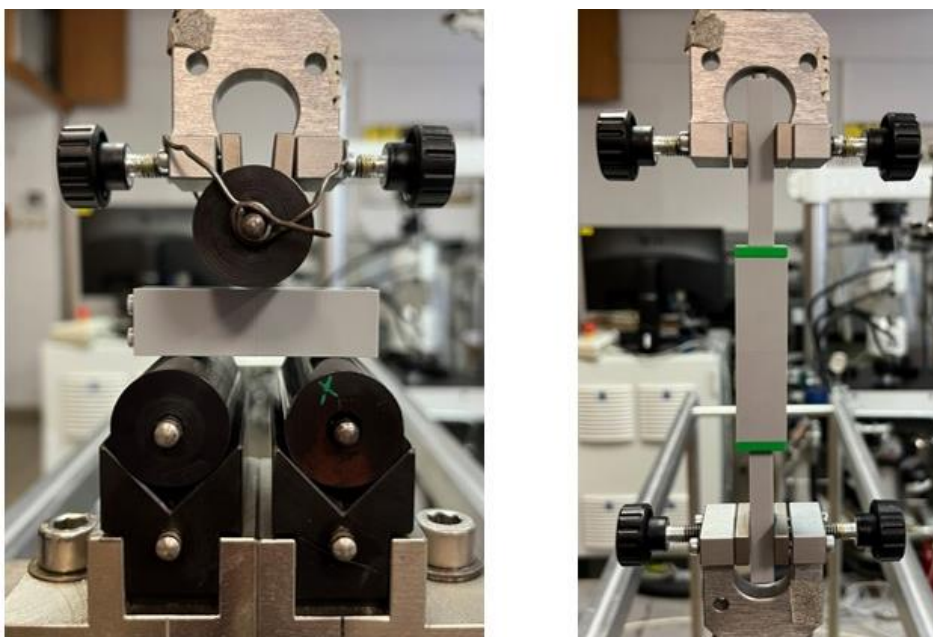
5.4.1 PRÍPRAVA A PRIEBEH TESTOVANIA

Pre správne uchytenie jednotlivých kociek v testovacom stroji bolo potrebné zvoliť taký typ LEGO® kociek, ktorý výškovo zodpovedal trom klasickým kockám. Pre niektoré prípady spojenia nie je dostupný tento typ väčších kociek, z toho dôvodu bola na malé kocky napojená ďalšia pomocná kocka. Aby dochádzalo k rozpojeniu kociek len v skúmanom mieste, boli pomocné kocky prilepené lepidlom na vonkajší výbežok testovanej kocky. Na obr. 38 sú znázornené testovacie vzorky pre jednotlivé prípady spojení. Modro zvýraznené miesta znázorňujú lepený spoj a v červeno zvýraznených miestach dochádzalo k rozpojeniu kociek.



Obr. 38 Testovacie vzorky: modrá – lepený spoj, červená – meraný spoj: (a) $2 \times 2 \times 3$, (b) $1 \times 4 \times 1$, (c) $1 \times 1 \times 3$, (d) okrúhla 1×1 , (e) $1 \times 4 \times 3$

Variety spojenia kociek, ktoré mali na šírku jeden vonkajší výbežok, boli použité pre namáhanie jednoosím ťahom aj trojbodovým ohybom. Pri testovaní LEGO[®] kociek $2 \times 2 \times 3$ jednoosím ťahom bolo potrebné na jednotlivé kocky napojiť kocku o šírke jedného výbežku, nakoľko bolo možné do testovacieho stroja uchytiť kostičky s maximálnou šírkou 8 mm, čo tento typ kociek nespĺňoval. Pre napojenie LEGO[®] kocky $1 \times 1 \times 3$ v osi symetrie na LEGO[®] kocky $2 \times 2 \times 3$ bol použitý špeciálny typ plochej LEGO[®] kocky 2×2 s jedným vonkajším výbežkom (viz obr. 39 vpravo). Táto úprava ale nebola nutná pri testovaní rozpojenia kociek pomocou trojbodového ohybu, kde bolo možné použiť len dve LEGO[®] kocky typu $2 \times 2 \times 3$ (viz obr. 39 vľavo).



Obr. 39 Ukážka testovania LEGO[®] kocky $2 \times 2 \times 3$: rozpojenie trojbodovým ohybom (vľavo) a jednoosím ťahom (vpravo)

Pre testovanie boli vytvorené tri testovacie sady vzoriek pre každý variant spojenia a pre každý typ namáhania, celkovo sa jednalo o 30 použitých vzoriek. Pri ťahovom namáhaní boli vzorky uchytené kolmo voči upínacím čel'ustiam a rýchlosť rozpojenia bola nastavená na $v_r = 10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pri testovaní rozpojenia kociek pomocou trojbodového ohybu bola pre pohyb tlačného hrotu použitá rovnaká rýchlosť, ktorý kolmo tlačil na dvojicu kociek v mieste spojenia. Vzďialenosť stredov podperných valcov bola nastavená na hodnotu 36,6 mm.

5.4.2 VÝSLEDKY TESTOVANIA

Z jednotlivých meraní boli obdržané závislosti zaťažujúcej sily na posuve, z ktorých boli určené maximálne zaťažujúce sily, pri ktorých sa dvojice kociek rozpájali. Pre jednotlivé typy spojenia a namáhania boli následne vypočítané priemerné hodnoty maximálnych zaťažujúcich síl $\overline{F_{z,\max}}$:

$$\overline{F_{z,\max}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F_{z,i,\max}, \quad (16)$$

kde n je počet meraní a $F_{z,i,\max}$ sú jednotlivé maximálne zaťažujúce sily, pri ktorých sa dvojice LEGO® kociek rozpájali. Chyba merania pre jednotlivé prípady bola určená výpočtom strednej kvadratickej chyby aritmetického priemeru $\bar{\delta}$ [39]:

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (17)$$

kde Δ_i^2 je druhá mocnina odchýlky i -tého merania a je ju možné určiť ako:

$$\Delta_i = \overline{F_{z,\max}} - F_{z,i,\max}. \quad (18)$$

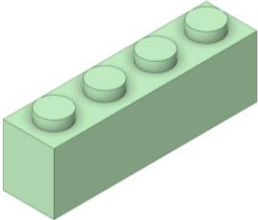
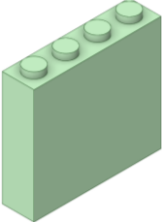
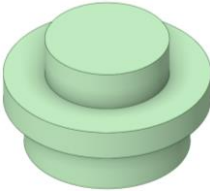
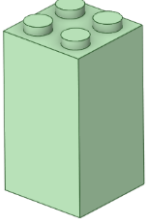

Ako je vidieť v *tab. 7* výsledné maximálne zaťažujúce sily, ktoré boli obdržané pri testovaní rozpojenia pomocou trojbodového ohybu, nadobúdali očakávané hodnoty s malým rozptylom pri každej testovanej trojici vzoriek. Na druhú stranu výsledky zaťažujúcich síl, ktoré boli potrebné na rozpojenie dvojice kociek pri ťahovom namáhaní, boli väčšie ako sa v jednotlivých prípadoch očakávalo a zároveň mali hodnoty sily pre trojicu rovnakých kociek značný rozptyl hodnôt.

Zistenie, že výsledné zaťažujúce sily sú pri namáhaní jednoosím ťahom väčšie, potvrdzuje fakt, že pri ručnom rozpájaní LEGO® kociek, užívateľ kocky neťahá, ale vždy sa ich snaží čo najskôr od seba odlomiť, nakoľko je v tomto prípade potrebná menšia sila rozpojenia.

LEGO® kocky sú vyrábané s veľkou presnosťou, avšak jednotlivé kocky stále podliehajú určitým výrobným toleranciam, ktoré mohli spôsobiť rozptyly výsledných zaťažujúcich síl pri jednotlivých prípadoch spojenia. Výrobné tolerancie spôsobujú, že veľkosť spojovacej sily, ktorá je generovaná v spojení vonkajšieho výbežku jednej kocky a dutiny druhej kocky, je v niektorých prípadoch väčšia a v iných menšia. Výsledné zaťažujúce sily majú menší rozptyl pri testovaní kociek, ktoré sú spojené štyrmi výbežkami, nakoľko v ich prípade

je tolerančná chyba rozdelená do viacerých výbežkov. Z toho dôvodu nemá až taký dopad na výslednú zaťažujúcu silu ako pri dvojici kociek spojených len pomocou jedného vonkajšieho výbežku. Spojovacia sila taktiež závisí aj na sile, ktorou boli jednotlivé testovacie kocky spojené, prípadne aj na tom, či je kocka nová alebo použitá.

Tab. 7 Maximálna zaťažujúca sila, pri ktorej bola dvojica LEGO® kociek rozpojená a aritmetický priemer jednotlivých hodnôt \pm stredná kvadratická chyba aritmetického priemeru

Typ LEGO® kocky	Jednoosí ťah		Trojbodový ohyb	
	Maximálna zaťažujúca sila	Aritmetický priemer \pm chyba	Maximálna zaťažujúca sila	Aritmetický priemer \pm chyba
	$F_{z,max}$ [N]	$\overline{F_{z,max}} \pm \text{chyba}$ [N]	$F_{z,max}$ [N]	$\overline{F_{z,max}} \pm \text{chyba}$ [N]
	27,27	22,13 \pm 3,33	10,79	11,36 \pm 0,29
	15,89		11,58	
	23,22		11,71	
	35,79	32,89 \pm 1,46	14,84	15,54 \pm 1,06
	31,20		14,15	
	31,68		17,62	
	4,89	8,22 \pm 1,99	1,48	1,78 \pm 0,20
	8,00		1,72	
	11,77		2,15	
	26,30	21,89 \pm 2,66	11,29	11,58 \pm 0,18
	17,12		11,92	
	22,25		11,54	
	3,75	8,1 \pm 2,42	2,68	2,64 \pm 0,40
	8,45		3,31	
	12,10		1,93	

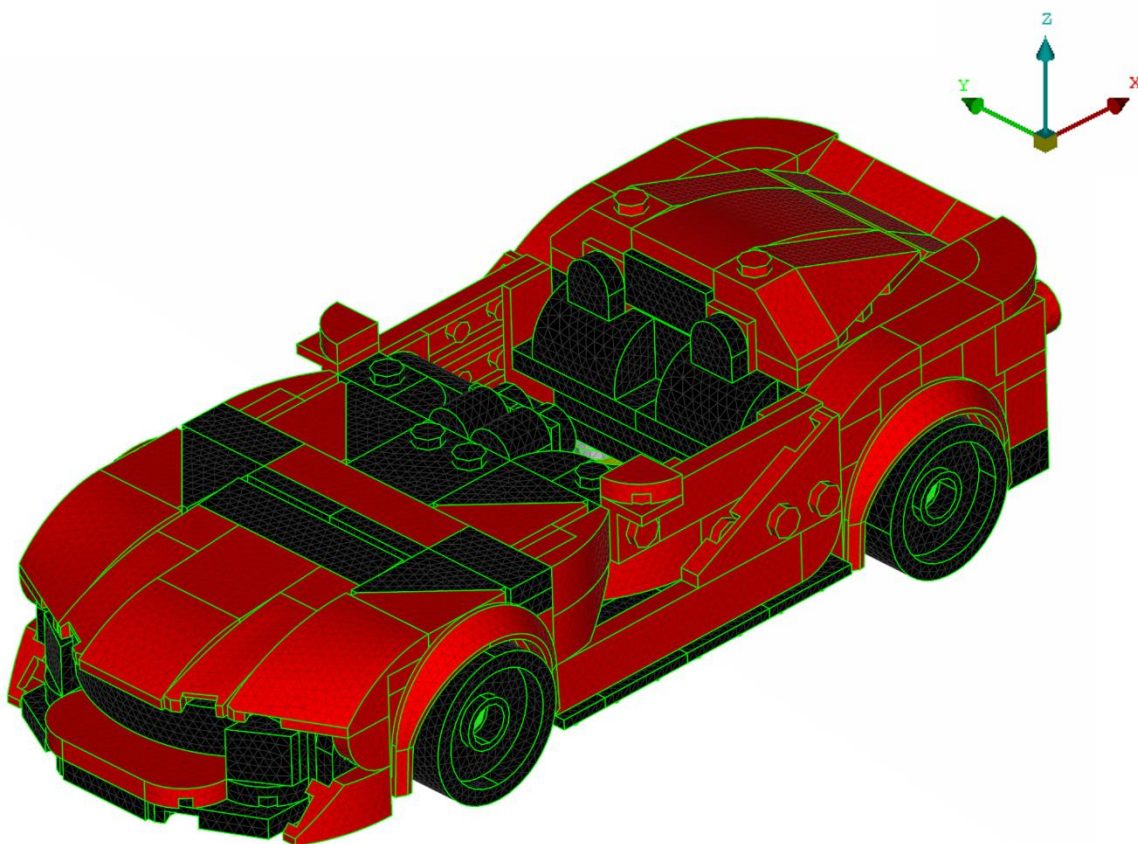
Ďalším dôvodom, ktorý spôsobil takto veľký rozptyl zaťažujúcich síl pre jednotlivé prípady spojenia, môže byť ich uchytenie v testovacom stroji. Nakoľko boli vzorky uchytávané

v upínacích čeľustiach ručne, bola sila upnutia pre každý prípad rozdielna, čo spôsobilo rozdielnu deformáciu LEGO[®] kociek aj keď bola snaha mať kocky upnuté čo najďalej od miesta rozpojenia. Tento poznatok pravdepodobne nemal až taký vplyv na výsledné hodnoty zaťažujúcich síl, nakoľko v prípade spojenia LEGO[®] kociek $2 \times 2 \times 3$ bola vzorka uchytaná pomocou napojených kociek a rozptyl všetkých troch opakovaní bol podobný ako v ostatných prípadoch.

Na základe zistenia všetkých faktorov, ktoré ovplyvňovali experimentálne meranie sily rozpojenia, by bolo pre získanie presnejších výsledkov potrebné experiment zopakovať. Rozdielne výrobné tolerancie kociek by sa ošetrili tým, že by boli rozmery jednotlivých vonkajších výbežkov a dutín kociek zmerané pod elektrónovým mikroskopom. Na základe výsledných rozmerov by boli vytvorené dvojice kociek s najviac zodpovedajúcimi rozmermi spojovaných častí. Zároveň by bolo potrebné zmerať silu, ktorou by boli jednotlivé kocky spojené, aby bola pre všetky opakovania jedného typu spojenia rovnaká. Pre ošetrovanie premennej deformácie LEGO[®] kociek v mieste upnutia, by bolo potrebné rozšíriť vzorky o ďalšie pomocné kocky. V neposlednom rade by bolo vhodné viackrát zmerať jednu dvojicu kociek pre overenie zmeny veľkosti maximálnej zaťažujúcej sily, ktorá je potrebná pre rozpojenie.

6 TVORBA MODELU PRE MKP ANALÝZU NÁRAZOVEJ SKÚŠKY

Vytvorenie simulačného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione (viz obr. 40) bolo realizované v programe ANSA. CAD modely LEGO kociek boli jednotlivo importované a umiestnené na určené miesto na základe LEGO® manuálu tak, ako v reálnom modeli. Následne boli kocky zdiskretizované objemovými lineárnymi štvorstenmi s dĺžkou hrany 1,6 mm. Celkovo model obsahoval 303 212 objemových prvkov. Materiálové vlastnosti pre jednotlivé CAD modely LEGO® kociek boli definované na základe hodnôt v tab. 1 (viz kapitola 4). Gumová oblasť reálnych kolies LEGO® modelu (reprezentujúca pneumatiky) bola pri tvorbe MKP modelu zanedbaná. V modeli bolo aplikovaných niekoľko typov kontaktov a ďalších parametrov, ktoré zabezpečovali správne simulovanie nárazu.



Obr. 40 Výsledný diskretizovaný model geometrie LEGO® Ferrari 812 Competizione

6.1 KONTAKTY

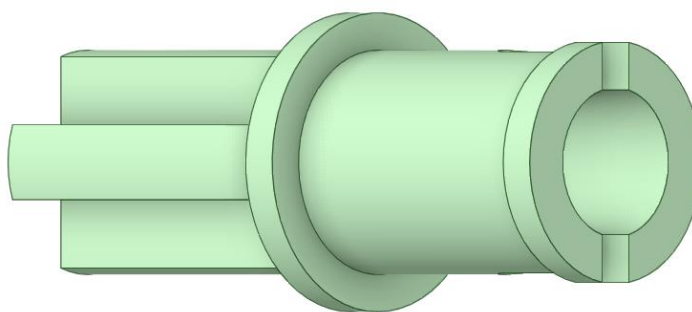
Spojenie jednotlivých kociek bolo v simulačnom modeli docielené použitím kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, v miestach spojenia vonkajšieho výbežku jednej kocky so stenou (resp. vnútorným výbežkom) druhej kocky. Pre zabezpečenie správnej funkcie tohto typu kontaktu bolo potrebné upraviť sieť tak, aby boli uzly dvojice kociek v miestach dotyku totožné a dochádzalo k rozpojeniu kociek pri náraze.

Nadradený segment (MSID) v karte kontaktu bol nastavený ako skupina prvkov vrchnej kocky a podradený segment (SSID) bol definovaný pomocou skupiny uzlov výbežkov spodnej kocky, ktorými bola dvojica kociek spojená. Do skupiny uzlov boli zahrnuté tie uzly, ktoré prichádzali do kontaktu so stenou (resp. vnútorným výbežkom) nadradenej kocky a ich počet sa líšil na základe toho, o aké typy kociek sa jednalo (napr. boli zvolené tri alebo štyri uzly jedného výbežku). Tab. 8 následne uvádza ďalšie definované parametre v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY a ich hodnoty, ktoré boli konštantné pre všetky kocky spojené pomocou tohto typu kontaktu.

Tab. 8 Hodnoty parametrov v karte *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY

Typ parametru	Hodnota
Viskózne tlmenie kontaktu <i>VDC</i>	20 %
Normálová sila zlyhania <i>NFLF</i>	1,45 N
Šmyková sila zlyhania <i>SFLF</i>	0,9453 N

Model LEGO® Ferrari 812 Competizione obsahoval Technic prvky, reprezentujúce čapy (označenie: 4666579), ktoré spájali kolesá so zvyšným modelom (viz obr. 41). Spojovacia sila týchto prvkov bola značne väčšia ako v prípade klasických LEGO® kociek a pri náraze nedochádzalo k ich rozpojeniu. Z tohto dôvodu bol v mieste spojenia aplikovaný kontakt *TIED_NODES_TO_SURFACE, ktorý funguje na rovnakom princípe ako kontakt *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, avšak v karte kontaktu nie je potrebné definovať parametre zlyhania (*NFLF*, *SFLF*), nakoľko zvolené uzly a prvky jednotlivých kociek sú spojené počas trvania celej simulácie. Nadradený segment kontaktu (MSID) bol nastavený ako skupina prvkov kocky, do ktorej bol zasunutý Technic prvok a pre podradený segment (SSID) bola zvolená skupina uzlov po obvode Technic prvku. Parameter viskózneho tlmenia kontaktu *VDC* v karte kontaktu bol nastavený na rovnakú hodnotu ako v prípade kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY (viz tab. 8).



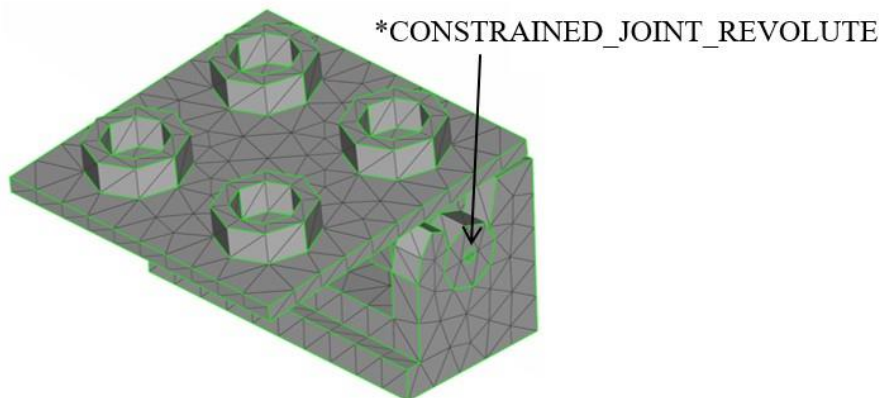
Obr. 41 LEGO® Technic prvok 4666579

Aby nedochádzalo k penetrácii jednotlivých kociek pri simulovaní nárazu, bol pre celý model použitý kontakt *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, kde bolo potrebné zadefinovať všetky prvky obsiahnuté v modeli ako podradené segmenty, na ktoré bol kontakt aplikovaný. To bolo docieľené nastavením parametru *SSTYP* = 6 a vymedzením ohraničenia, v ktorom sa nachádzali všetky prvky modelu.

6.2 ROTAČNÉ PRVKY

Model LEGO® Ferrari 812 Competizione obsahuje aj typy kociek, ktorých princíp spojenia je odlišný od klasických LEGO® kociek. Jedná sa o špeciálnu dvojicu LEGO® kociek, ktoré po spojení fungujú na princípe rotačnej väzby a v modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione boli použité pre nastavenie správnej polohy kociek kapoty a kufra vozidla. Horná kocka má po bokoch valcové výbežky, ktoré sú zasunuté do vybrania spodnej kocky, čo umožňuje rotáciu týchto kociek o určitý uhol. Pre simulovanie tohto správania bola použitá väzba rotačného kĺbu *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE.

Pred aplikovaním tejto väzby bolo potrebné pre dvojicu kociek vytvoriť štyri doplnkové uzly definujúce os rotácie (na každej strane dva totožné), v strede vonkajšieho výbežku hornej kocky a vybrania spodnej kocky. Aby bolo možné priradiť jednotlivé uzly k príslušnej kocke, boli na povrchu spojenia dvojice kociek vytvorené tuhé škrupinové prvky s hrúbkou 0,001 mm. Následne boli dva doplnkové uzly priradené tuhým škrupinovým prvkom spodnej kocky a dva tuhým škrupinovým prvkom vrchnej kocky, pomocou väzby *CONSTRAINED_EXTRA_NODES. Na základe pozície doplnkových uzlov bola väzbou *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE, vygenerovaná os rotácie pre tieto špecifické dvojice LEGO® kociek. Na obr. 42 je zobrazený CAD model jednej z dvojíc LEGO® kociek so špeciálnym spojením, s počiatkom osi rotácie, ktorá následne prechádza celou šírkou spojených kociek.



Obr. 42 Špeciálny typ spojenia LEGO® kociek s väzbou *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE

Ďalšími rotačnými prvkami, ktoré sa v LEGO® modeli nachádzali, boli kolesá vozidla. Ich spojenie s LEGO® Technic prvkami reprezentujúce čapy vozidla (viz obr. 41) bolo zabezpečené rovnakým postupom pomocou *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE.

6.3 PARAMETRE NÁRAZU

Jedným z ďalších parametrov, ktoré bolo potrebné pre simuláciu nárazu nastaviť, bola rýchlosť, pri ktorej model narazil do bariéry. Tá bola definovaná pomocou aplikovania niekoľkých parametrov *INITIAL_VELOCITY_GENERATION. Prvá počiatočná rýchlosť bola nastavená pre súbor všetkých kociek okrem kolies vozidla, kde bol určený smer pôsobenia rýchlosti v zápornom smere osi x . Hodnota rýchlosti, s ktorou narazil model do bariéry, bola určená na základe experimentálneho overenia nárazovej skúšky (podrobnejšie

kapitola 7). Následne bol parameter *INITIAL_VELOCITY_GENERATION definovaný pre každé koleso vozidla zvlášť, kde okrem translačného pohybu bolo potrebné určiť aj jeho uhlovú rýchlosť okolo osi rotácie. Uhlová rýchlosť ω bola určená zo vzťahu:

$$\omega = \frac{v_n}{r}, \quad (19)$$

kde v_n rýchlosť modelu pri náraze a r je polomer kola o veľkosti $r = 11,5$ mm. Rotácia kolies v zápornom smere osi y bola definovaná nastavením parametru smerového kosínu v osi y na hodnotu $NY = 1$. Stred osi rotácie bol určený parametrami XC a ZC (súradnica x a z stredu osi rotácie), ktorých hodnota bola totožná so súradnicami doplnkového uzla v osi x a z , definujúci os rotácie vo väzbe *CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE. Súradnica stredu osi rotácie v smere y bola nastavená na hodnotu $YC = 0$.

Pre simulovanie povrchu, po ktorom sa model pohyboval a bariéry, do ktorej následne narazil, bolo použitých niekoľko rovinných tuhých stien pomocou väzby typu *RIGID_WALL_PLANAR. Pre nárazovú bariéru v rovine YZ , bola v karte väzby zvolená možnosť $NSID = 0$, čím bolo docielené, že všetky prvky modelu nepresiahli túto bariéru, ktorej vzdialenosť od stredu vozidla bola určená na hodnotu 90 mm v zápornom smere osi x .

Ďalšími väzbami *RIGID_WALL_PLANAR boli vytvorené roviny XY pre jednotlivé kolesá vozidla. V časti $NSID$ bola určená skupina prvkov kolesa, čím bola dosiahnutá jeho rotácia okolo preddefinovanej osi, o určenej rýchlosti na povrchu rovinatej tuhej steny. Posledná väzba *RIGID_WALL_PLANAR určovala taktiež rovinu XY , ktorá bola totožná s rovinami jednotlivých kolies, ale bolo ju potrebné nastaviť pre zvyšnú skupinu prvkov v modeli, aby nedochádzalo k prechodu jednotlivých kociek do dráhy, po ktorej sa model pohyboval.

Posledný parameter, ktorý bolo potrebné do simulácie zahrnúť, bolo gravitačné zrýchlenie g . Nakoľko bol ale náraz modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione realizovaný rovnomerne zrýchleným pohybom po rovine so sklonom 70° , bolo potrebné rozdeliť veľkosť gravitačného zrýchlenia do osi x a z . Z tohto dôvodu boli na celkový model pre simuláciu nárazu použité dve funkcie *LOAD_BODY. Pre obe funkcie bola vytvorená konštantná zaťažujúca krivka s hodnotou jedna, ktorá bola definovaná v časti $LCID$. Následne bolo v prvej karte *LOAD_BODY zvolené pôsobenie gravitačného zrýchlenia v osi x a v časti SF bola definovaná jeho sínusová zložka a v druhej karte bola zvolená os z so zadanou kosínusovou zložkou v časti SF .

7 EXPERIMENTÁLNE OVERENIE NÁRAZOVEJ SKÚŠKY

Nárazová skúška modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione bola realizovaná rovnomerným zrýchleným pohybom vozidla po naklonenej rovine, ktorá bola vytvorená pomocou kancelárskeho stola. Na jeho konci bola pripevnená doska pod uhlom 90°, reprezentujúca nárazovú bariéru. Celá konštrukcia bola následne umiestnená tak, aby so zemou zvierala uhol 70°.

Meracia technika, použitá pre zaznamenanie nárazu, bola vysokorýchlostná kamera Olympus iSpeed II, ovládaná pomocou diaľkového ovládača s dotykovou obrazovkou a pre osvetlenie miesta nárazu boli použité dve vnútorné infračervené svetlá Raytec 30BM. Rýchlosť snímania vysokorýchlostnej kamery bola 1000 snímiek za sekundu. Pre zmeranie rýchlosti v okamihu nárazu modelu do bariéry, boli použité bodové meracie značky (point trackery). Dve značky sa umiestnili na hranu bariéry s rozstupom 10 cm a ďalšie dve boli nalepené na bočnú stranu vozidla vo vzdialenosti 12,5 cm. Obr. 43 znázorňuje rozmiestnenie meracej techniky v okolí naklonenej roviny s nárazovou bariérou.



Obr. 43 Rozloženie meracej techniky okolo nárazovej konštrukcie

Pre nárazovú skúšku boli použité dva modely LEGO® Ferrari 812 Competizione, oba s hmotnosťou 152 g. Jeden, opotrebovaný, LEGO® model (obstaný pred rokom) bol využitý na testovanie nastavenia nárazovej konštrukcie a taktiež bol podrobený voľnému pádu z výšky 2 m, pre zistenie ako sa LEGO® model bude pri náraze správať. Druhý model bol nový a pred finálnym experimentálnym overením nebol použitý pre inú nárazovú skúšku. Náraz oboch modelov bol realizovaný kolmo na bariéru, zo vzdialenosti 1,6 m a 1 m, pričom náraz opotrebovaného modelu bol pre každú dĺžku dráhy opakovaný trikrát a nový model

podstúpil len jeden náraz pre každú vzdialenosť. *Tab. 9* zobrazuje rýchlosti v okamihu nárazu dvojice LEGO® modelov do bariéry pre jednotlivé merania experimentu.

Tab. 9 Rýchlosti modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione v okamihu nárazu do bariéry pre jednotlivé merania nárazu

Číslo merania	Stav modelu	Dĺžka dráhy	Rýchlosť
		s [m]	v [m·s ⁻¹]
1.	Opotrebovaný model	1,6	4,98
2.			4,97
3.			4,98
4.		1	3,97
5.			4,01
6.			4,02
7.	Nový model	1,6	4,73
8.		1	3,76

Na základe realizovania nárazovej skúšky modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione v rôznych variáciách, bolo možné analyzovať rozpojenie modelu pri náraze pomocou troch faktorov:

- vplyv opakovateľnosti nárazu (pre opotrebovaný model),
- vplyv dĺžky dráhy,
- vplyv použitého modelu.

7.1 VPLYV OPAKOVATEĽNOSTI NÁRAZU

Prvým faktorom, ktorý bolo možné skúmať u opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione, bol vplyv opakovateľnosti nárazov na rozpojenie modelu. Ako je vidieť v *tab. 9* rýchlosti, ktoré model dosiahol v okamžiku stretu s bariérou boli pre vzdialenosť 1,6 m takmer rovnaké vo všetkých troch prípadoch a pri dĺžke dráhy 1 m sa líšili len o veľmi malú hodnotu.

Obr. 44 zobrazuje rozpojenie opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione po jednotlivých nárazoch pri dĺžke dráhy 1,6 m. Pri prvom náraze zostala spojená celá oblasť zadnej časti vozidla a takmer celá predná časť, až na LEGO® kocky reprezentujúce kapotu vozidla. Tento segment sa rozdelil na dve kocky a zvyšné ostali spojené. Predné kolesá so spojovacou kockou ostali zložené rovnako ako aj v ostatných opakovaní nárazu. LEGO® kocky, ktoré sa nachádzali vo vnútri podvozku, ostali taktiež bez porušenia na svojom mieste.

Pri druhom opakovaní nárazovej skúšky sa oproti prvému pokusu experimentu rozpojilo viacero kociek zo zadnej oblasti (bočné LEGO® kocky a LEGO® kocky reprezentujúce

blatníky). Došlo ku rozpojeniu niekoľkých LEGO® kociek vnútri podvozku, hlavne v zadnej a strednej oblasti. V prednej oblasti sa pri náraze uvoľnilo väčšie množstvo kociek zo spodnej časti vozidla.

Pri treťom poslednom náraze z tejto vzdialenosti, došlo k najväčšiemu rozpojeniu v prednej časti vozidla, kde sa LEGO® kocky reprezentujúce svetlá a blatníky rozpojili nerovnomerne na dve časti spolu s určitým počtom jednotlivých LEGO® kociek, ktoré túto oblasť spojovali. Znametný rozdiel nastal aj pri spojení LEGO® kociek reprezentujúcich kapotu vozidla, nakoľko sa jednalo o jediný náraz opotrebovaného modelu s dĺžkou dráhy 1,6 m, kde ostali spojené všetky kocky tejto oblasti vozidla. Ostatné časti sa rozpojili takmer rovnako ako pri druhom pokuse nárazu vozidla do bariéry.



Obr. 44 Vplyv opakovateľnosti rozpojenia opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m: naľavo prvý, v strede druhý a napravo tretí pokus opakovania

Následne bol opotrebovaný model LEGO® Ferrari 812 Competizione podrobený testovaniu nárazu do bariéry zo vzdialenosti 1 m a rozpojenia modelu pri jednotlivých opakovaníach sú znázornené na obr. 45. Pri prvom pokuse tohto typu nárazu ostala v kope veľká časť LEGO® kociek podvozku a zadnej časti vozidla. Rozsiahlejšie rozpojenie nastalo v prednej oblasti vozidla, ktorá sa rozdelila na LEGO® kocky kapoty, spojovaciu LEGO® kocku prednej nápravy s kolesami, vrchnú časť a niekoľko samostatných, prípadne zopár spojených, LEGO® kociek zo spodnej časti vozidla.

Pri druhom opakovaní nárazu sa ale rozpojilo menej LEGO® kociek ako pri prvom náraze. Jednalo sa o zadnú oblasť vozidla, s odpojeným jedným blatníkom, o takmer celú prednú oblasť, kde sa odpojil segment kapoty od celého vozidla a od neho niekoľko predných LEGO® kociek. Od podvozku vozidla sa taktiež rozpojila predná náprava s pár vnútornými LEGO® kockami. Najväčší rozdiel ale nastal v zadnej časti kapoty, kde sa prvýkrát, zo všetkých pokusov nárazovej skúšky, nerozpojila skupina LEGO® kociek formujúcich dolnú zadnú časť vozidla.

Pri poslednom opakovaní nárazovej skúšky opotrebovaného modelu ostalo v podvozokovej časti spojené najväčšie množstvo LEGO® kociek. Takmer totožná skupina kociek v prednej oblasti vozidla ostala spojená rovnako ako pri druhom pokuse nárazu zo vzdialenosti 1 m. Segment reprezentujúci kapotu modelu zostal ale v jednom celku ako pri prvom opakovaní. Následne sa rozpojilo zopár oblastí a niekoľko samostatných LEGO® kociek.



Obr. 45 Vplyv opakovateľnosti rozpojenia opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m: naľavo prvý pokus, v strede druhý a napravo tretí pokus opakovania

Na základe zhrnutých poznatkov je možné povedať, že sa jednotlivé LEGO® kocky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione vplyvom opakovateľnosti nárazu rozpájali pre každé meranie odlišne, avšak skupiny LEGO® kociek, na ktoré sa LEGO® model rozdelil, boli vo všetkých prípadoch rovnaké. Jednalo sa o oblasti:

- podvozok so zadnými kolesami,
- zadná časť vozidla,
- oblasť prednej časti vozidla,
- LEGO® kocky kapoty,
- LEGO® kocka reprezentujúca prednú nápravu s kolesami.

V prípade nárazu zo vzdialenosti 1,6 m (viz obr. 44) je vidieť, že po prvom pokuse nárazovej skúšky bol opotrebovaný LEGO® model rozpojený zo všetkých troch prípadov najmenej. Táto skutočnosť mohla byť spôsobená tým, že pred realizovaním úplne prvého nárazu, bol LEGO® model určitú dobu zložený a položený na policičke, čím mohlo dôjsť k vyvinutiu väčšej spojovacej sily v mieste kontaktu vonkajších výbežkov a stenou resp. vnútornými výbežkami jednotlivých LEGO® kociek než v ostatných prípadoch, kde bol LEGO® model po náraze zložený a následne hneď použitý pre ďalší. Z tohto dôvodu mohla byť pre druhý a tretí náraz spojovacia sila v mieste kontaktov menšia, čo spôsobilo značný rozdiel v rozpojení modelu pri porovnaní prvého nárazu s ostatnými.

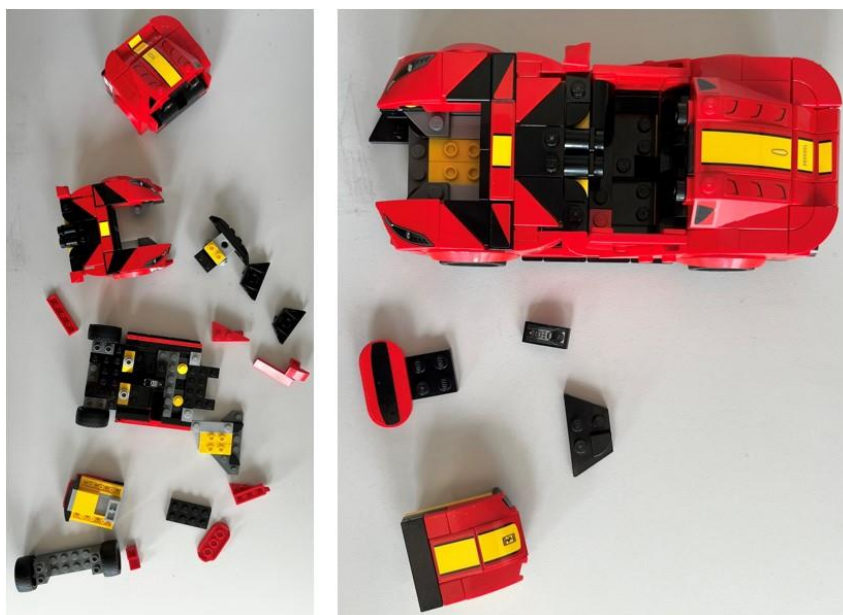
Zaujímavé bolo aj pozorovanie rozpojenia modelu pri opakovaní nárazu pri dĺžke dráhy 1 m (viz obr. 45), nakoľko pri prvom pokuse sa predná časť rozpojila na viacej oblastí ako v ďalších dvoch nárazoch. To mohlo byť spôsobené menším zatlačením vonkajších výbežkov do dutiny druhej kocky, nakoľko sila potrebná na spojenie kociek nebola meraná a z toho dôvodu boli asi niektoré kocky do seba zatlačené viac ako iné.

Druhý, pravdepodobnejší dôvod, mohol byť ten, že sa táto časť modelu rozpojila až po náraze na zem (niektoré kocky sa od bariéry odrazili tak, že nedopadli naspäť na naklonenú rovinu) a nie vplyvom nárazu do bariéry, čo nebolo možné zaznamenať pomocou vysokorýchlostnej kamery, ktorá túto oblasť nesnímala, alebo voľným okom, nakoľko sa jednalo o veľmi rýchly jav. S týmto faktorom je ale potrebné uvažovať pri všetkých meraniach nárazovej skúšky.

7.2 VPLYV DĹŽKY DRÁHY

Druhý faktor, ktorý vplýval na spôsob akým sa opotrebovaný a zároveň aj nový model LEGO® Ferrari 812 Competizione rozpadali pri jednotlivých nárazoch, bola dĺžka dráhy, po ktorej sa model pohyboval. Na obr. 44 je znázornené rozpojenie LEGO® kociek po náraze opotrebovaného modelu pri dĺžke dráhy 1,6 m. V porovnaní s nárazom pri dĺžke dráhy 1 m (viz obr. 45) je vidieť, že sa model rozpadá na rovnaké základe časti ako predná a zadná oblasť, podvozok, odpojila sa aj predná náprava s kolesami a skupina kociek kapoty vozidla. Avšak počet jednotlivých LEGO® kociek resp. menšie skupiny LEGO® kociek, ktoré ostali spojené, je menší v prípade nárazu modelu pri dráhe s dĺžkou 1,6 m, kde rýchlosť v okamžiku stretu s nárazovou bariérou bola väčšia takmer o $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Obr. 46 zobrazuje výsledné rozpojenie nového modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m (naľavo) a 1 m (napravo). Aj keď sa rýchlosť v okamihu stretu s bariérou líšila pre jednotlivé vzdialenosti približne o $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, je vidieť, že v prípade nárazu nového modelu mala dĺžka dráhy veľký vplyv na to, ako sa LEGO® kocky rozpojili.



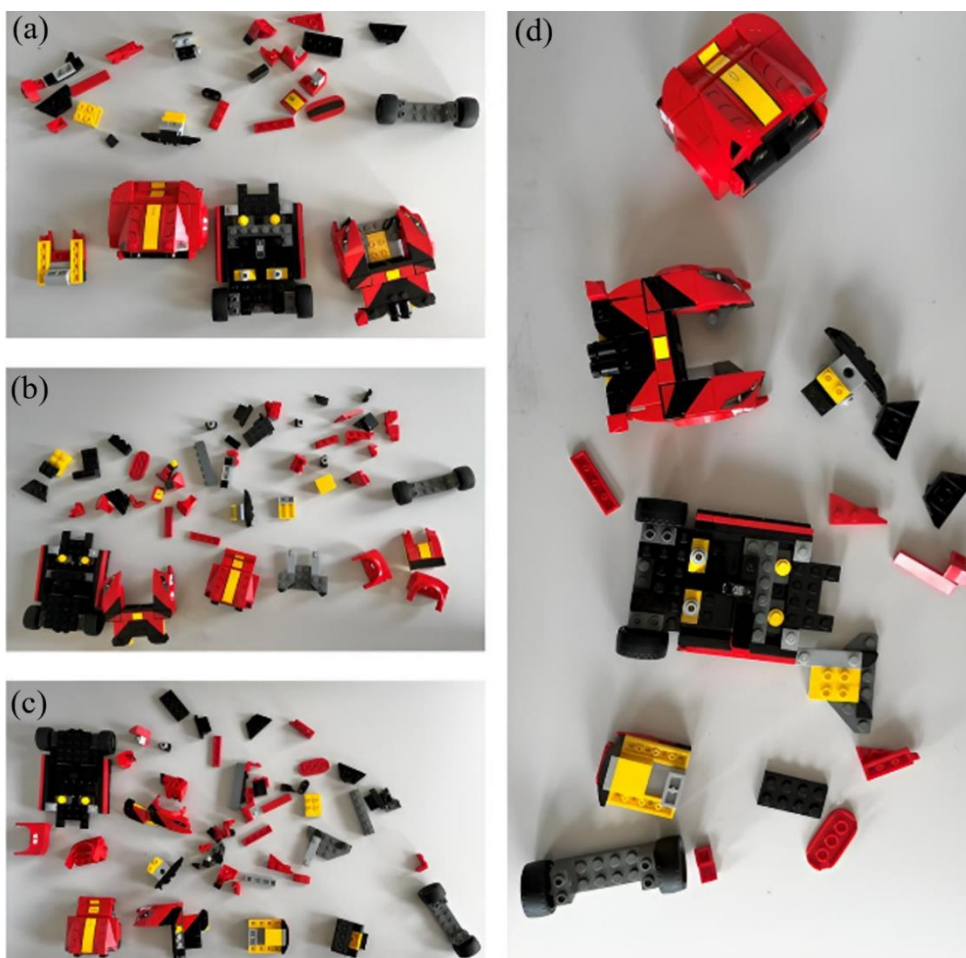
Obr. 46 Vplyv vzdialenosti na rozpojenie nového modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m (naľavo) a 1 m (napravo)

Pri náraze LEGO® modelu po dráhe 1,6 m sa model rozdelil na základné časti (predná, zadná oblasť, podvozok, kapota a predná náprava s kolesami), na menšie skupiny LEGO® kociek zo spodnej strany vozidla v prednej a zadnej oblasti a zopár jednotlivých, prípadne dvojíc, LEGO® kociek. Na druhú stranu pri náraze zo vzdialenosti 1 m sa novší LEGO® model takmer nerozpojil. Pohromade ostalo takmer celé vozidlo okrem kapoty, troch LEGO® kociek z prednej časti vozidla a jedna LEGO® kocka, ktorá reprezentovala stredovú konzolu vozidla.

Pri porovnaní výsledných rozpojení modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione je vidieť, že väčší vplyv mala zmena dĺžky dráhy na nový model. Pri opotrebovanom modeli dochádzalo k zmene počtu a typu LEGO® kociek, ktoré sa odpojili, ale základné časti, na ktoré sa vozidlo pri náraze rozdelilo, boli rovnaké.

7.3 VPLYV POUŽITÉHO MODELU

Posledný faktor, ktorý slúžil na porovnanie rozpojenia jednotlivých nárazov dvojice modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione, bol náraz opotrebovaného modelu voči novému. Na obr. 47 sú znázornené výsledné rozpojenia opotrebovaného modelu ((a), (b) a (c)) a nového modelu ((d)) pri dĺžke dráhy 1,6 m.



Obr. 47 Vplyv použitého modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri náraze s dĺžkou dráhy 1,6 m: (a) opotrebovaný model – prvý pokus, (b) opotrebovaný model – druhý pokus, (c) opotrebovaný model – tretí pokus, (d) nový model

Opotrebovaný aj nový LEGO® model sa rozpojil na základné časti, ale pri nárazoch opotrebovanejšieho modelu je vidieť, že počet jednotlivých LEGO® kociek, ktoré sa odpojili je značne väčší ako v prípade nového modelu. Na druhú stranu, veľký rozdiel v rozpojení opotrebovaného (viz obr. 48 (a), (b) a (c)) a nového modelu (viz obr. 48 (d)) nastal v prípade nárazu s dĺžkou dráhy 1 m. Počas nárazu opotrebovaného modelu sa oddelili základné časti vozidla s niekoľkými malými oblasťami a zopár samostatnými LEGO® kockami. Oproti tomu sa nový model LEGO® Ferrari 812 Competizione, až na zopár LEGO® kociek v prednej časti vozidla, takmer nerozpojil.



Obr. 48 Vplyv použitého modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri náraze s dĺžkou dráhy 1 m:
(a) opotrebovaný model – prvý pokus, (b) opotrebovaný model – druhý pokus, (c) opotrebovaný model – tretí pokus, (d) nový model

Menší počet rozpojených LEGO® kociek v prípade nárazu nového modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione bol spôsobený tým, že pred experimentom model nebol podrobený žiadnemu testovaciemu nárazu. To spôsobilo, že spojovacie sily medzi vonkajšími výbežkami a stenami resp. vnútornými výbežkami jednotlivých LEGO® boli väčšie ako v prípade opotrebovaného modelu.

Druhý faktor, ktorý bolo možné pozorovať je ten, že rýchlosť v okamihu stretu s bariérou bola pri náraze nového modelu nižšia. To mohlo byť spôsobené menšou deformáciou spojovacích

čapov, nakoľko v prípade opotrebovaného modelu boli kolesá s čapmi niekoľkokrát spojené a rozpojené a oproti tomu pri novom modeli sa kolesá nasunuli na čapy len raz. Z tohto dôvodu bola pravdepodobne medzi kontaktnými plochami v prípade opotrebovaného LEGO® modelu väčšia vôľa, čo spôsobilo generovanie menšieho trenia a kolesá mohli rotovať rýchlejšie. Tým opotrebovanejšie vozidlo nabralo väčšiu rýchlosť než v prípade pohybu nového vozidla po naklonenej rovine o rovnakej dĺžke.

8 POROVNANIE VÝSLEDKOV MKP ANALÝZY A EXPERIMENTU NÁRAZOVEJ SKÚŠKY

Na základe výsledkov z experimentálnych nárazových skúšok modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione bolo možné definovať potrebné hodnoty rýchlostí nárazu v karte *INITIAL_VELOCITY_GENERATION pre jednotlivé MKP analýzy nárazovej skúšky. Celkovo boli vykonané štyri varianty simulácií s koncovým časom 100 ms. Dve simulácie zodpovedali nárazovej skúške opotrebovaného LEGO® modelu a dve nárazu nového LEGO® modelu pre dĺžky dráhy 1,6 m a 1 m.

Nakoľko boli pri nárazoch opotrebovaného LEGO® modelu vykonané tri opakovania pre každú dĺžku dráhy, bola v prípade nárazu zo vzdialenosti 1 m určená rýchlosť nárazu ako priemerná hodnota jednotlivých rýchlostí v okamihu stretu s bariérou \bar{v} :

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i. \quad (20)$$

kde n je počet pokusov experimentálneho nárazu a v_i sú jednotlivé rýchlosti v okamihu stretu s bariérou pri náraze opotrebovaného LEGO® modelu s dĺžkou dráhy 1 m. Pri náraze opotrebovaného LEGO® modelu zo vzdialenosti 1,6 m sa jednotlivé rýchlosti v okamihu stretu s bariérou od seba takmer nelíšili, z toho dôvodu bola pre simuláciu použitá najviac zastúpená hodnota.

Simulovanie nárazovej skúšky novšieho LEGO® modelu boli rýchlosti nárazu v karte *INITIAL_VELOCITY_GENERATION zadefinované na základe rýchlostí obdržaných pri experimentálnom overení, nakoľko bolo pre každú vzdialenosť realizované len jedno meranie. Následne boli pomocou rovnice (19) vypočítané uhlové rýchlosti kolies ω , zodpovedajúce jednotlivým rýchlostiam nárazu. Tab. 10 zobrazuje hodnoty nastavené v karte *INITIAL_VELOCITY_GENERATION pre jednotlivé varianty simulácií, ktoré boli následne porovnané s výsledkami nárazových skúšok LEGO® modelov obdržaných pri experimentálnom overení.

Tab. 10 Rýchlosti pri náraze a uhlové rýchlosti kolies nastavené v karte *INITIAL_VELOCITY_GENERATION

Stav modelu	Dĺžka dráhy	Rýchlosť pri náraze	Uhlová rýchlosť kolesa
	s [m]	v_n [m·s ⁻¹]	ω [rad·s ⁻¹]
Opotrebovaný model	1,6	4,98	433,043
	1	4,00	347,826
Nový model	1,6	4,73	411,304
	1	3,76	326,957

Pri analyzovaní výsledkov simulácií voči reálnym zrážkam LEGO® modelov bolo potrebné porovnávať rovnaké časové okamihy. Najdôležitejšie okamihy rozpojenia modelov sa diali

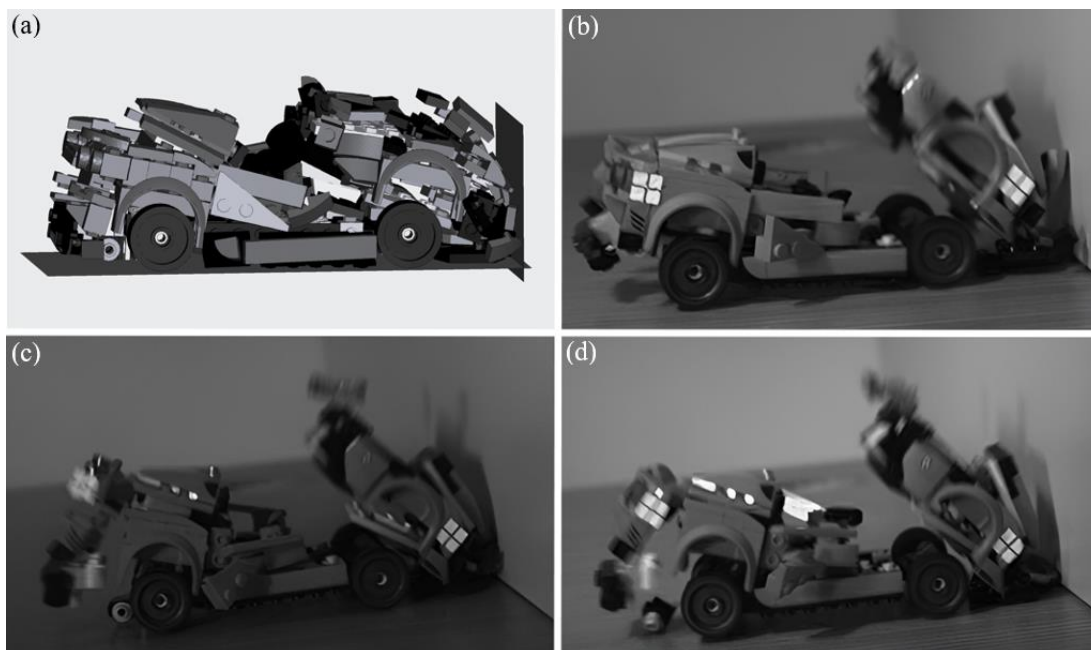
na začiatku zrážky, preto boli vo všetkých prípadoch porovnávané okamihy v simulačnom čase 5 ms, 15 ms a 25 ms.

8.1 OPOTREBOVANÝ MODEL LEGO® FERRARI 812 COMPETIZIONE

Prvý LEGO® model, kde boli porovnané výsledky MKP analýzy voči experimentálnej nárazovej skúške, bol opotrebovaný model LEGO® Ferrari 812 Competizione. Pri realizovaní nárazu po dráhe s dĺžkou 1,6 m dosiahol LEGO® model rýchlosť až $4,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v okamihu stretu s nárazovou bariérou.

Na obr. 49 je znázornený náraz v simulačnom čase 5 ms. V prípade MKP analýzy sa predná časť LEGO® modelu, hneď po narazení do bariéry, rozpojila na jednotlivé LEGO® kocky a v zadnej oblasti už dochádzalo k ich postupnému uvoľňovaniu. Oproti tomu sa reálny LEGO® model pri náraze zo vzdialenosti 1,6 m správal trochu odlišne. Pri všetkých troch opakovaní sa od podvozkovej LEGO® kocky odpojila predná a zadná oblasť vozidla, ale bolo možné pozorovať určité zmeny pri odpojení menších skupín prípadne jednotlivých LEGO® kociek.

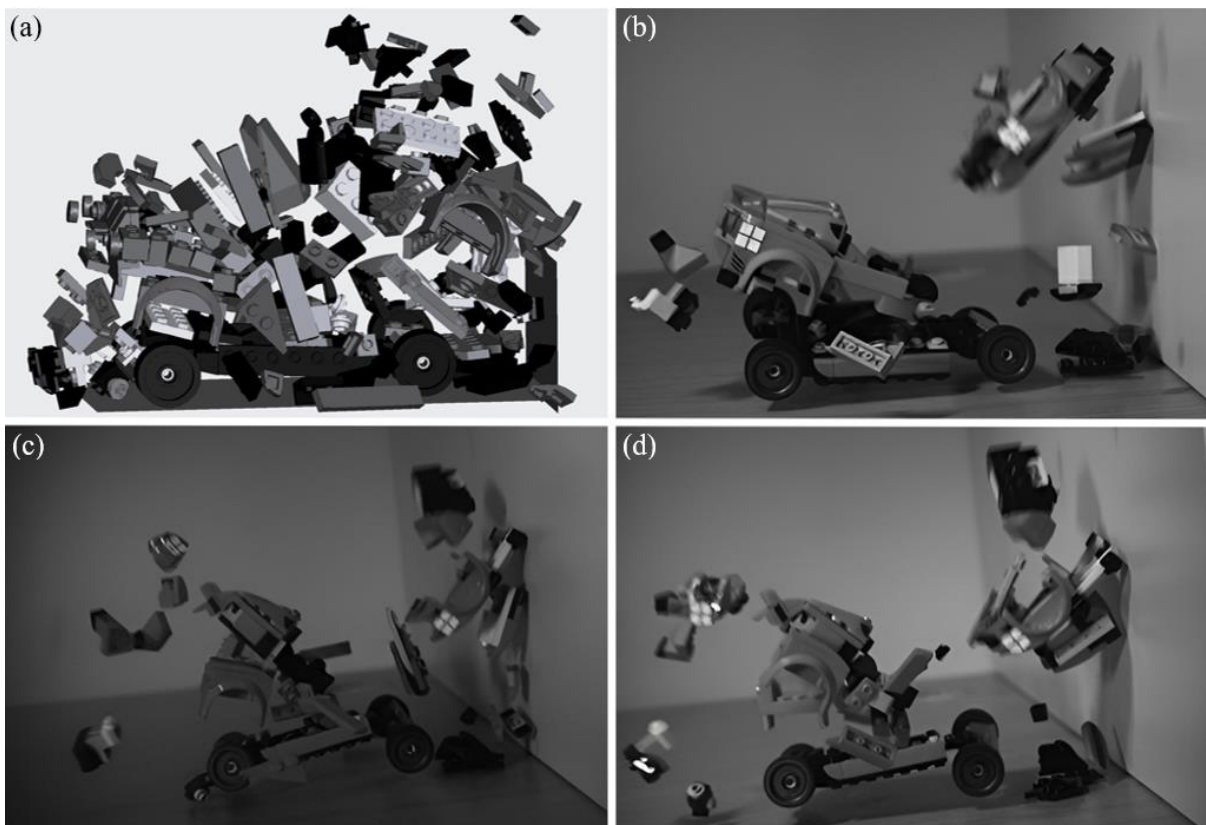
Pri prvom pokuse sa rozpojila samostatná LEGO® kocka od ostatných, stále spojených LEGO® kociek kapoty, na rozdiel od zvyšných prípadov, kde sú všetky LEGO® kocky kapoty stále pohromade. Zároveň sa pri prvom realizovaní nárazu v čase 5 ms, odpojila celá zadná časť vozidla, separátne spodná časť tejto oblasti a na boku v strednej časti vozu došlo o uvoľnení dvojice LEGO® kociek. Pri druhom a treťom náraze zo vzdialenosti 1,6 m bola táto oblasť už značne rozpojená a došlo aj k odpojeniu LEGO® kociek reprezentujúcich zadné svetlá.



Obr. 49 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 5 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu

V simulačnom čase 15 ms bolo pri MKP modeli vidieť značný posun v rozpojení jednotlivých LEGO® kociek (viz obr. 50). Takmer všetky sa rozpojili, až na niektoré prípady vnútri podvozkovvej LEGO® kocky, s ktorou boli stále spojené obe nápravy LEGO® modelu aj s kolesami. Na druhú stranu v realite ostali spojené časti LEGO® modelu, ako predná, zadná oblasť, kapota a určité LEGO® kocky na podvozkovvej LEGO® kocke. Medzi jednotlivými pokusmi nárazu bolo ale možné pozorovať značné rozdiely.

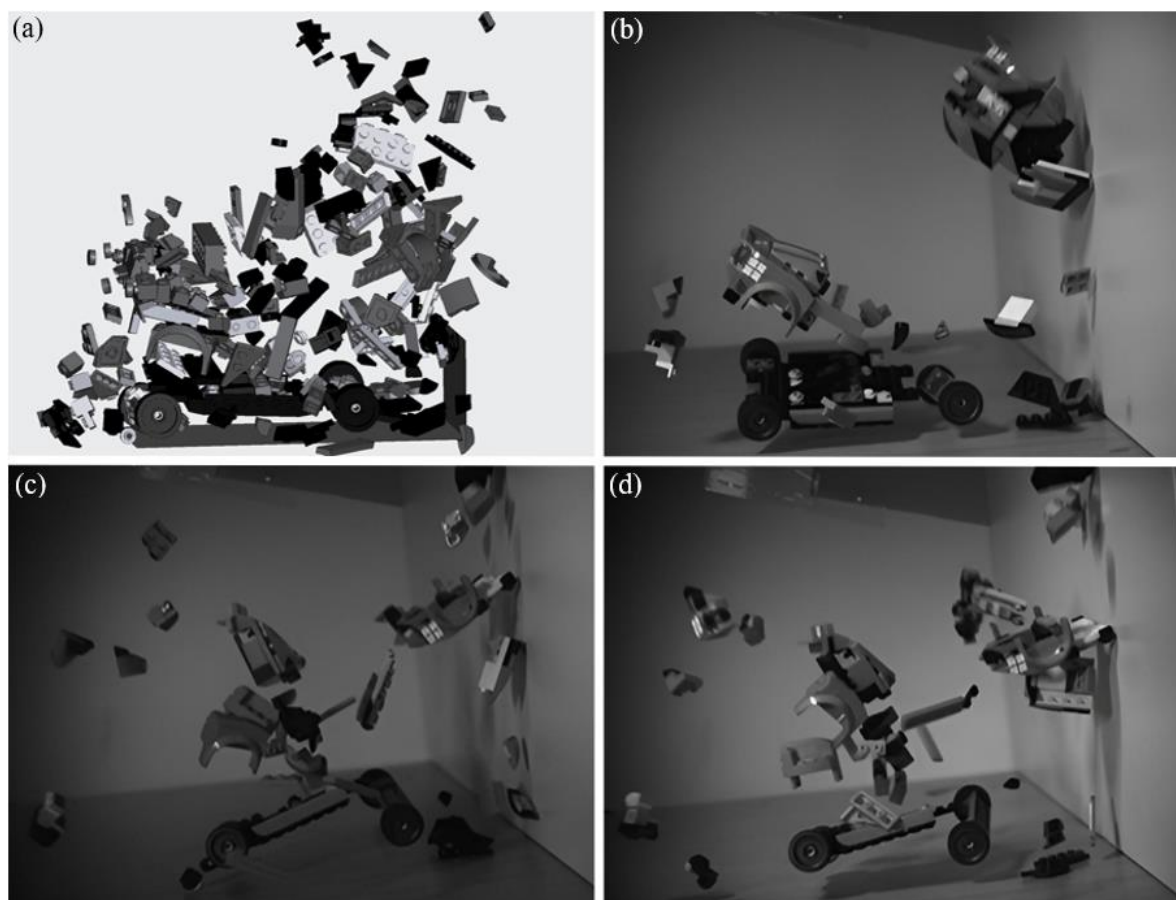
Pri prvom realizovaní experimentu nárazovej skúšky sa LEGO® model rozdelil na prednú, zadnú a podvozkovú oblasť, kapotu vozidla a niekoľko menších častí, prípadne samostatných LEGO® kociek. Oproti tomu pri druhom a treťom pokuse nárazovej skúšky došlo k omnoho väčšiemu rozpojeniu jednotlivých častí. Hlavným rozdielom bolo rozpojenie prednej časti vozidla na dve samostatné skupiny LEGO® kociek v prípade tretieho pokusu realizovania experimentu a zároveň rozpojenia v zadnej oblasti na menšie časti stále spojených LEGO® kociek.



Obr. 50 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 15 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu

Na obr. 51 je zobrazený posledný dôležitý časový krok 25 ms, kde je možné vidieť výsledné rozpojenie LEGO® modelu. Pri MKP analýze bolo možné pozorovať rozpojenie celého LEGO® modelu na jednotlivé LEGO® kocky. To ale nezodpovedalo reálnym výsledkom nárazovej skúšky, kde sa LEGO® model v jednotlivých nárazoch rozdelil na základné časti, ale pre jednotlivé pokusy nebol počet LEGO® kociek rozpojený pri náraze rovnaký. Pri prvom náraze sa rozpojil značne menší počet a ostali pohromade väčšie oblasti vozidla,

na rozdiel od druhého pokusu a pri treťom náraze sa LEGO® model vozidla rozdelil na najväčšie množstvo menších oblastí spojených LEGO® kociek.



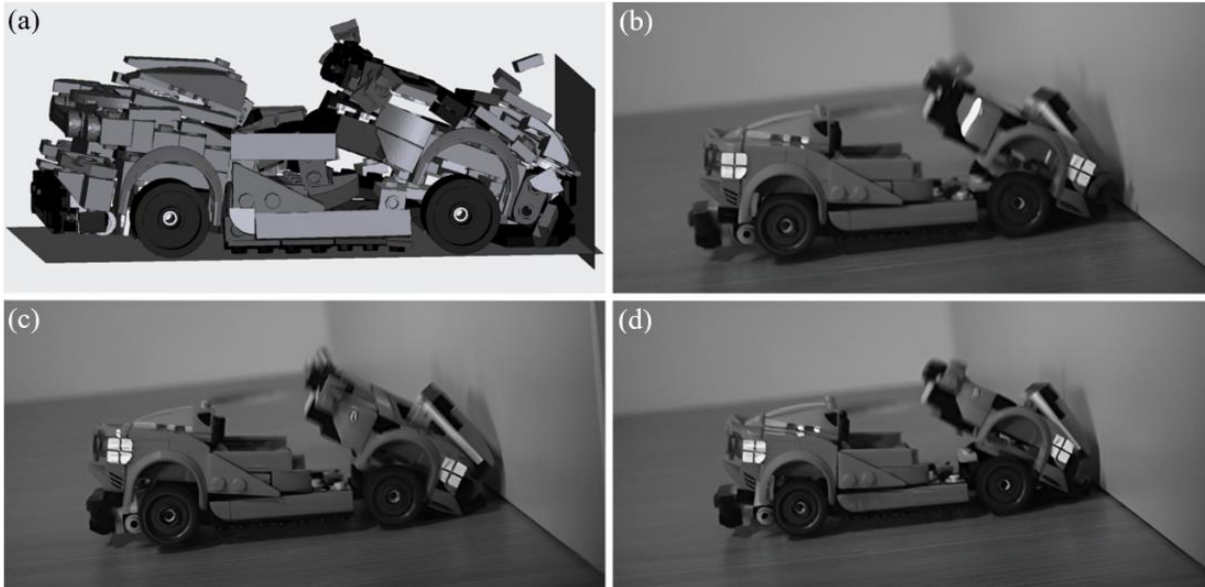
Obr. 51 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 25 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu

Druhý typ MKP analýzy, vytvorený pre porovnanie s výsledkami experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione, bola nárazová skúška LEGO® modelu pri rýchlosti nárazu $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo zodpovedalo experimentálnej skúške vozidla zo vzdialenosti 1 m. Aj keď rýchlosť v okamihu stretu s bariérou bola takmer o $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nižšia ako v prípade nárazu zo vzdialenosti 1,6 m, je na obr. 52 vidieť, že v simulačnom čase 5 ms sa MKP model rozpadá takmer totožne.

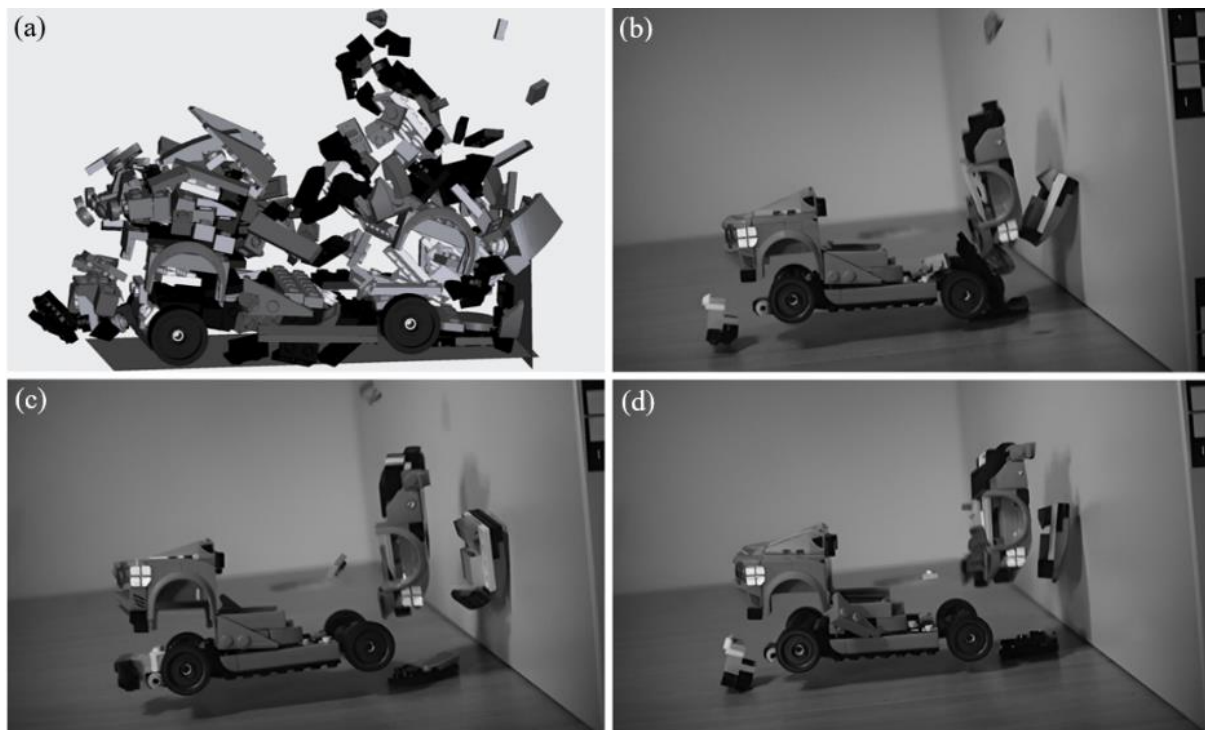
Rovnako aj pri experimentálnom overení pri jednotlivých pokusoch nárazu zo vzdialenosti 1 m sa LEGO® model rozdeľuje na prednú, zadnú a podvozkovú oblasť a súbor spojených LEGO® kociek kapoty. Oproti MKP analýze, kde sa predná časť rozpojila na jednotlivé LEGO® kocky a v zadnej oblasti už dochádza ku uvoľneniu jednotlivých LEGO® kociek, ostávajú tieto časti vozidla v realite pevne spojené a odpájajú sa ako celok od podvozku vozidla.

V simulačnom čase 15 ms (viz obr. 53) sa LEGO® model rozpojil na značne väčší počet jednotlivých LEGO® kociek ako v prípade reálneho nárazu. Jediná časť, ktorá ešte nie je úplne rozpojená, je podvozok vozidla, oproti reálnemu nárazu, kde došlo ku odpojeniu LEGO® kociek v prednej oblasti podvozku LEGO® modelu. V jednotlivých pokusoch reálnej

zrážky následne došlo k úplnému rozpojeniu vozidla na základné časti. Jediný rozdiel je pri druhom pokuse nárazu, kde sa v zadnej časti vozidla neodpojil súbor kociek podvozku ako v prípade zvyšných dvoch nárazov.

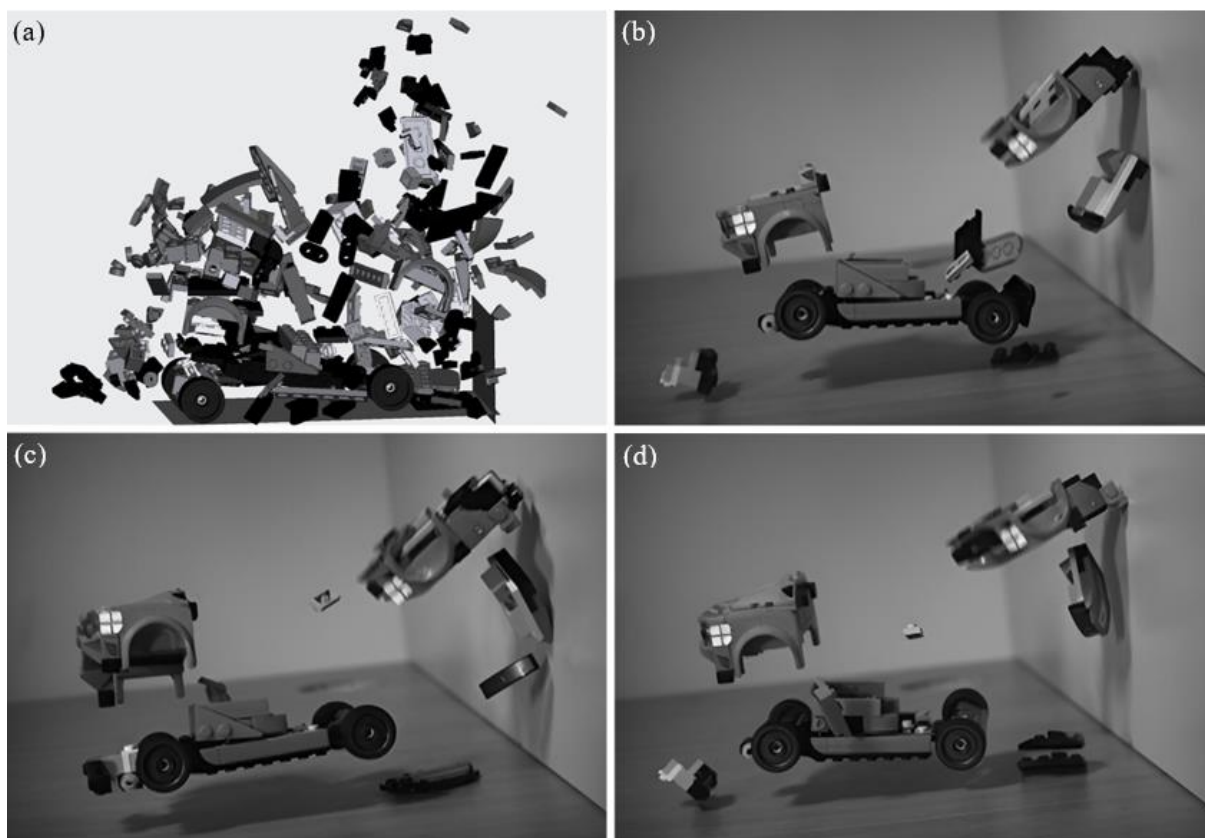


Obr. 52 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 5 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu



Obr. 53 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 15 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu

V simulačnom čase 25 ms (viz obr. 54) je možné pozorovať už finálne rozpojenie opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione zo vzdialenosti 1 m. V MKP analýze došlo k rozpojeniu celkového modelu na jednotlivé LEGO® kocky, čo ale nezodpovedá realite, kde sa model pri všetkých troch pokusoch rozpojil len na základné časti vozidla, ktoré ostali následne pohromade. Rozpojenia opotrebovaného LEGO® modelu pri reálnom náraze boli takmer totožné, je ale možné pozorovať zopár rozdielov. Pri druhom pokuse nárazu ostala s podvozkom spojená zadná časť súboru kociek počas celého priebehu zrážky a zároveň sa súbor LEGO® kociek reprezentujúcich kapotu rozpojil viac ako v ostatných dvoch prípadoch. V strednej časti vozidla došlo k väčšiemu rozpojeniu kociek v treťom prípade.

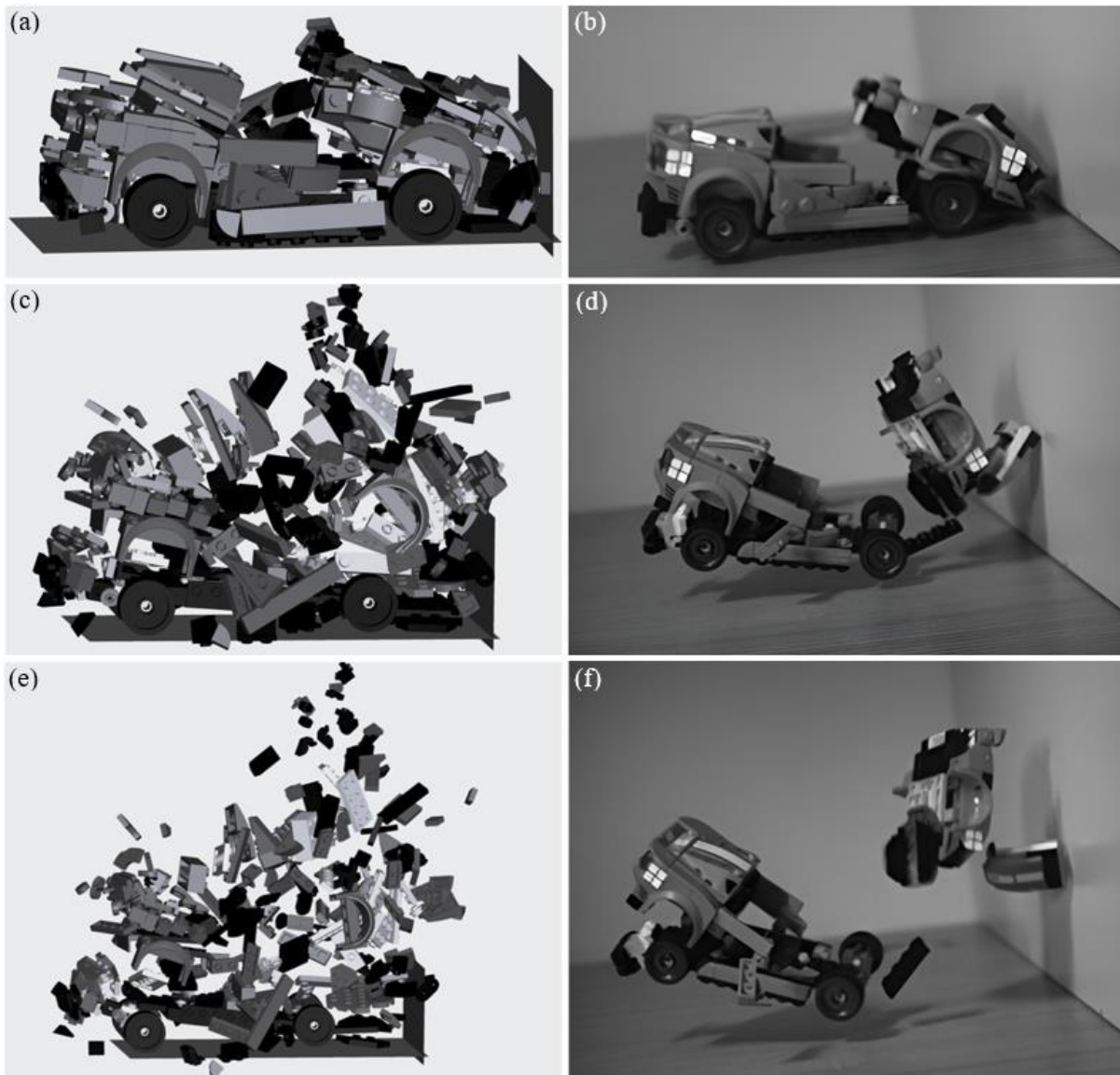


Obr. 54 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 25 ms: (a) MKP model, (b) prvý pokus, (c) druhý pokus, (d) tretí pokus reálneho nárazu

8.2 NOVÝ MODEL LEGO® FERRARI 812 COMPETIZIONE

Druhý LEGO® model, pri ktorom boli porovnávané výsledky MKP analýzy s experimentálnou nárazovou skúškou, bol nový model LEGO® Ferrari 812 Competizione. Nárazová skúška bola realizovaná po dráhe s dĺžkou 1,6 m a následne 1 m rovnako ako v prípade opotrebovaného modelu, avšak pre každú vzdialenosť bol vykonaný len jeden pokus nárazu. Pri nárazovej skúške zo vzdialenosti 1,6 m LEGO® model dosiahol výslednú rýchlosť v okamihu stretu s bariérou $4,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Na obr. 55 (a) a (b) je zobrazené rozpojenie nového modelu v simulačnom čase 5 ms, kde je vidieť, že už na začiatku nárazu sa jednotlivé LEGO® kocky modelu rozpájali viac ako pri náraze reálneho LEGO® modelu. V MKP modeli bola celá predná časť vozidla už takmer rozpojená a zo zadnej časti sa oddeľovali LEGO® kocky zo spodnej strany zadných svetiel a zároveň LEGO® kocky nachádzajúce sa na vrchu zadnej oblasti. Oproti tomu pri reálnom náraze sa v čase 5 ms odpojila predná časť vozidla ako celok a došlo k uvoľneniu dvojice bočných LEGO® kociek.

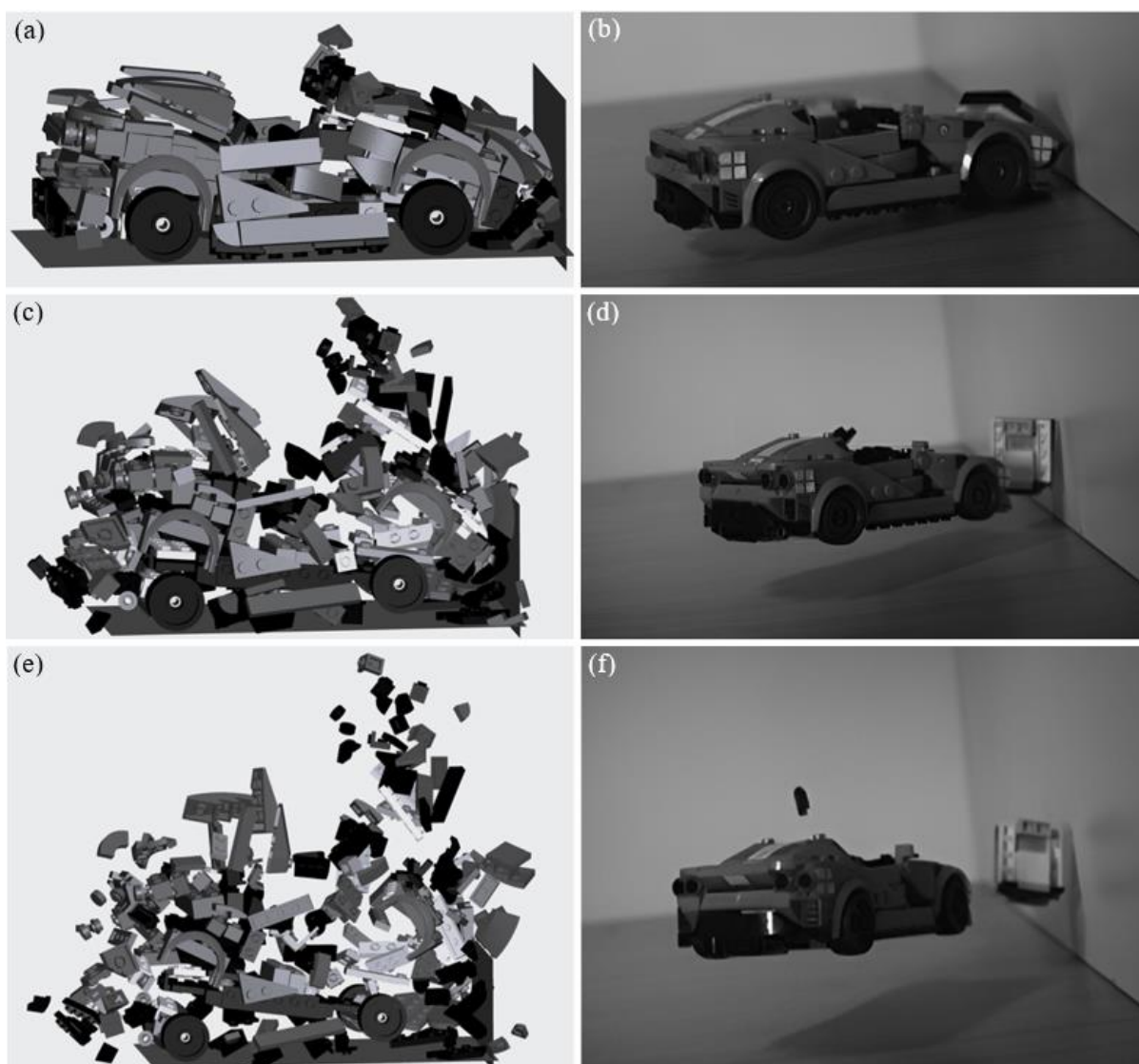


Obr. 55 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky nového modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m: (a) a (b) 5 ms; (c) a (d) 15 ms; (e) a (f) 25 ms

Tým ako rozpojovanie LEGO® modelu pokračovalo, je v čase 15 ms (viz obr. 55 (c) a (d)) vidieť takmer úplné odpojenie jednotlivých LEGO® kociek pri simulácii nárazu. Na druhú stranu sa v realite odpojila okrem prednej časti a kapoty vozidla aj zadná časť a začalo sa odpájať malé množstvo jednotlivých, prípadne dvojíc LEGO® kociek. V poslednom zobrazenom simulačnom čase 25 ms (viz obr. 55 (e) a (f)) sa pri MKP analýze celý LEGO® model rozpojil na jednotlivé LEGO® kocky. Tento jav znova nezodpovedá realite, kde sa

nový LEGO® model rozpojil na prednú, zadnú oblasť, kapotu a podvozok vozidla, z ktorého sa odpojil súbor kociek nachádzajúcich sa v spodnej zadnej časti vozidla.

V prípade nárazovej skúšky nového LEGO® modelu s dĺžkou dráhy 1 m dosiahol model v okamihu nárazu do bariéry rýchlosť $3,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na *obr. 56* je znázornené porovnanie MKP analýzy a reálneho nárazu v jednotlivých časových okamihoch, kde je možné pozorovať najväčší rozdiel rozpojenia LEGO® modelu voči ostatným typom nárazu. Simulačný model sa pri náraze rozpájal podobne ako v prípade nového LEGO® modelu pri dĺžke dráhy 1,6 m. Oproti tomu sa v realite tento LEGO® model takmer nerozpojil. V simulačnom čase 5 ms (viz *obr. 56* (a) a (b)) došlo k rozpojeniu kapoty vozidla a následne sa v simulačnom čase 15 ms (viz *obr. 56* (c) a (d)) a 25 ms (viz *obr. 56* (e) a (f)) odpojila už len jedna dodatočná LEGO® kocka a zvyšok modelu ostal spojený po celú dobu nárazu. Na časovom zázname je vidieť odraz vozidla od prekážky.



Obr. 56 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky nového modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m: (a) a (b) 5 ms; (c) a (d) 15 ms; (e) a (f) 25 ms

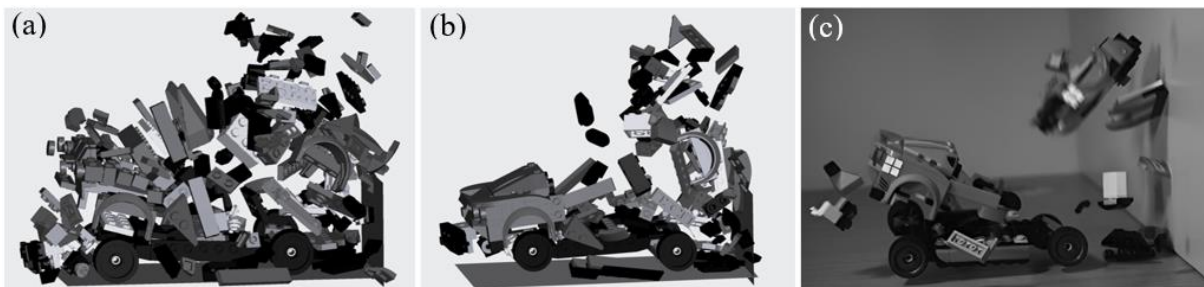
8.3 MODIFIKÁCIA PARAMETROV KONTAKTU *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY

Pri porovnaní výsledkov MKP analýz nárazových skúšok bolo zistené, že hodnoty parametrov normálovej ($NFLF = 1,45$ N) a šmykovej sily zlyhania ($SFLF = 0,9453$ N) v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, nastavené na základe odborných článkov [17, 34], nezabezpečovali rozpájanie modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione tak, ako sa tomu dialo pri reálnych nárazových skúškach. Parametre mali malú hodnotu a spôsobovali, že sa model rozpájal na jednotlivé LEGO® kocky a nie na skupiny LEGO® kociek ako tomu reálne nastávalo.

Z tohto dôvodu bola vykonaná úprava parametrov rozpojenia, vo všetkých kartách kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, ktoré boli v MKP modeli definované. Pre úpravu bolo zvolené nastavenie kariet *INITIAL_VELOCITY_GENERATION zodpovedajúce nárazovej skúške opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione, pri dĺžke dráhy 1,6m, nakoľko bolo z predchádzajúcich simulácií vidieť, že priebeh rozpojenia veľmi neovplyvňovala zmena rýchlostí nárazu.

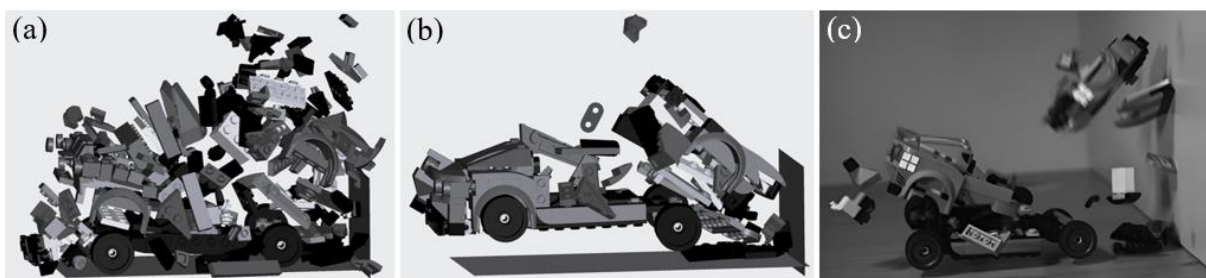
V prvom kroku bol upravený parameter $SFLF$ na vyššie hodnoty a hodnota $NFLF = 1,45$ N ostala nezmenená. To ale nespôsobovalo výrazné zmeny pri simulácii nárazovej skúšky a LEGO® model sa rozpájal takmer totožne ako pri prvotných simuláciách. Preto bola hodnota parametru normálovej sily zlyhania nastavená na $NFLF = 14,5$ N, čo zodpovedalo desaťnásobku predchádzajúcej použitej hodnoty a parameter šmykovej sily zlyhania ostal nezmenený ($SFLF = 0,9453$ N). Toto nastavenie karty kontaktu ale tiež nespôsobovalo žiadne veľké rozdiely v rozpájaní LEGO® kociek po náraze do bariéry.

Zmeny v rozpojení LEGO® kociek počas simulácie nárazovej skúšky boli znateľné, až pri nastavení parametrov zlyhania na hodnotu $NFLF = 14,5$ N a $SFLF > 3$ N. Iteračným procesom bolo zistené, že pri hodnote parametru $SFLF = 7$ N sa zadná časť modelu odpája od podvozkovkej LEGO® kocky približne rovnako ako pri prvom pokuse reálneho nárazu opotrebovaného LEGO® modelu s dĺžkou dráhy 1,6 m. Na obr. 57 je vidieť vplyv rozdielne nastavených hodnôt parametrov zlyhania v karte *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY v simulačnom čase 15 ms. Pri použití pôvodných parametrov sa celý model rozpája na jednotlivé LEGO® kocky, čo nezodpovedá reálnemu nárazu. Po úprave na hodnoty $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 7$ N je vidieť značnú zmenu v priebehu rozpojenia, ktoré už viac podobá tomu reálnemu. Jediný rozdiel je v prednej časti vozidla, kde sa jednotlivé LEGO® kocky rozpájajú viac ako v realite.



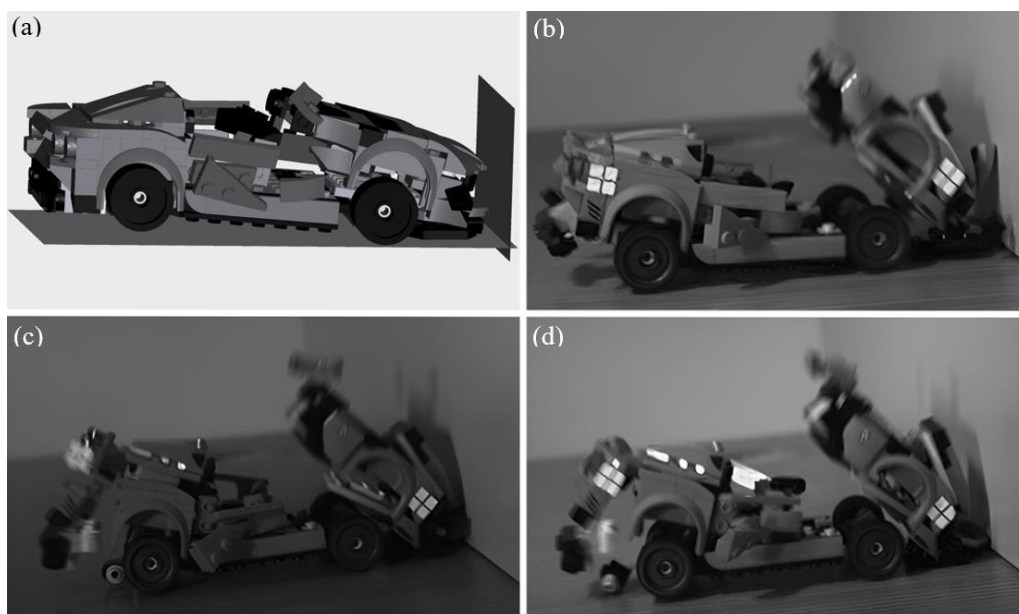
Obr. 57 Porovnanie rozpojenia opotrebovaného modelu LEGO Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m, v čase simulácie 15 ms: (a) $NFLF = 1,45$ N a $SFLF = 0,9453$ N; (b) $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 7$ N; (c) reálny model – prvý pokus

Pri zadefinovaní parametru šmykovej sily zlyhania na hodnotu $SFLF = 8$ N (hodnota normálovej sily zlyhania ostala nezmenená, $NFLF = 14,5$ N) sa rozpojenie LEGO® modelu výrazne zmenilo. Predná časť modelu sa rozpojila približne rovnako ako v prípade reálneho nárazu, avšak zadná časť sa ako celok neodpojila od podvozku vozidla. Jediné čo sa z tejto oblasti odpojilo boli zadné svetlá. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade sa toto rozpojenie MKP modelu omnoho viac podobá reálnemu, než v prípade definovaných pôvodných parametrov (viz obr. 58).



Obr. 58 Porovnanie rozpojenia opotrebovaného modelu LEGO Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m, v čase simulácie 15 ms: (a) $NFLF = 1,45$ N a $SFLF = 0,9453$ N; (b) $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 8$ N; (c) reálny model – prvý pokus

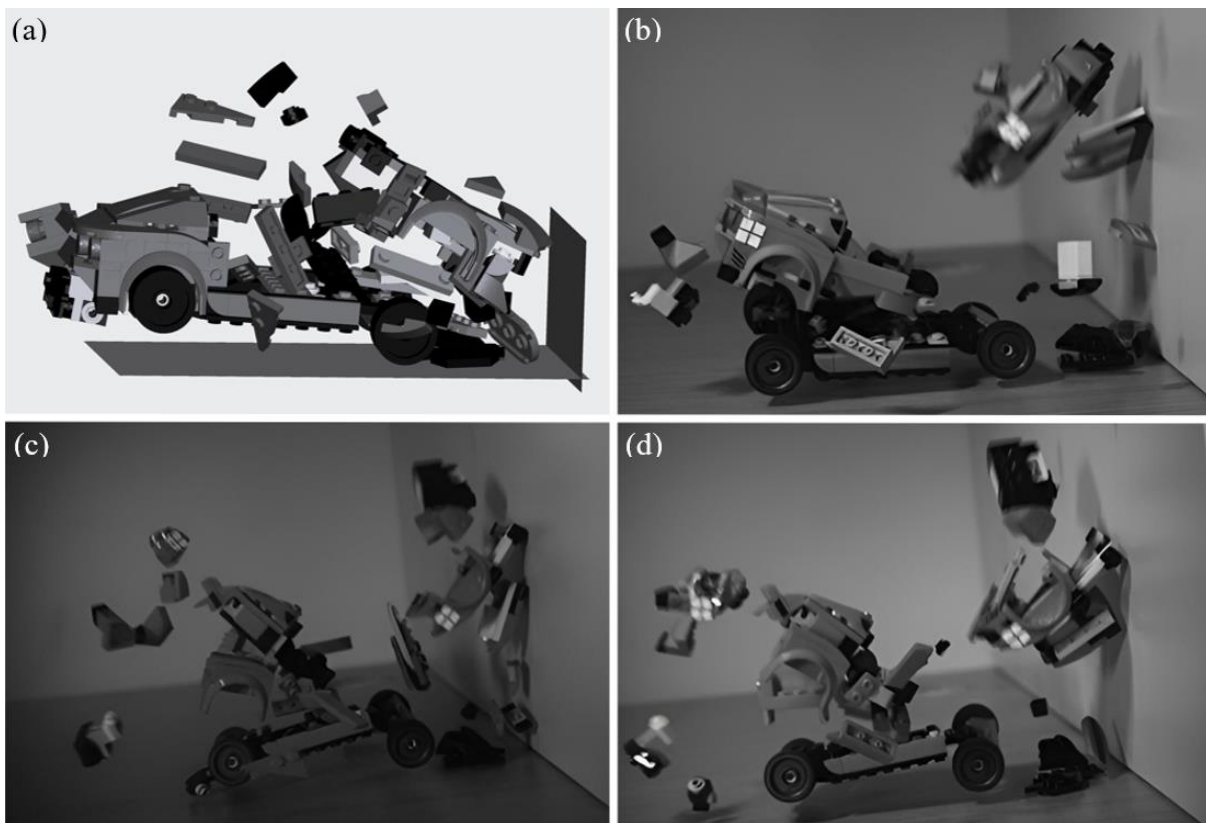
Na základe týchto zistení boli do MKP modelu zadefinované obe hodnoty parametrov, vytvorením dvoch kariet kontaktu *CONTACT_TIERBEAK_NODES_ONLY. Jedna obsahovala parametre zlyhania s hodnotami $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 7$ N, ktorá bola aplikovaná na LEGO® kocky nachádzajúce sa v zadnej časti MKP modelu a druhá s hodnotami parametrov $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 8$ N bola aplikovaná na LEGO® kocky nachádzajúce sa v prednej oblasti. Porovnanie výsledkov simulácie voči reálnemu nárazu bolo realizované v časoch 5 ms (viz obr. 59), 15 ms (viz obr. 60) a 25 ms (viz obr. 61).



Obr. 59 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 5 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5$ N, na prednej časti $SFLF = 8$ N, na zadnej časti $SFLF = 7$ N; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

V čase 5 ms (viz obr. 59) po náraze do bariéry sa pri simulácii od LEGO® modelu oddelila predná časť vozidla a niekoľko bočných jednotlivých resp. dvojíc LEGO® kociek. Na druhú stranu v realite model pri jednotlivých opakovaníach nárazu je v tomto časovom kroku viac rozpojený, ale simulácia sa teraz omnoho viac približovala realite než pri nastavení parametrov zlyhania na hodnoty $NFLF = 1,45$ N a $SFLF = 0,9453$ N. Hlavný rozdiel v rozpojení je v zadnej časti vozidla, ktorá sa v realite rozpojila od podvozku vozidla a v simulácii ostáva táto oblasť spojená.

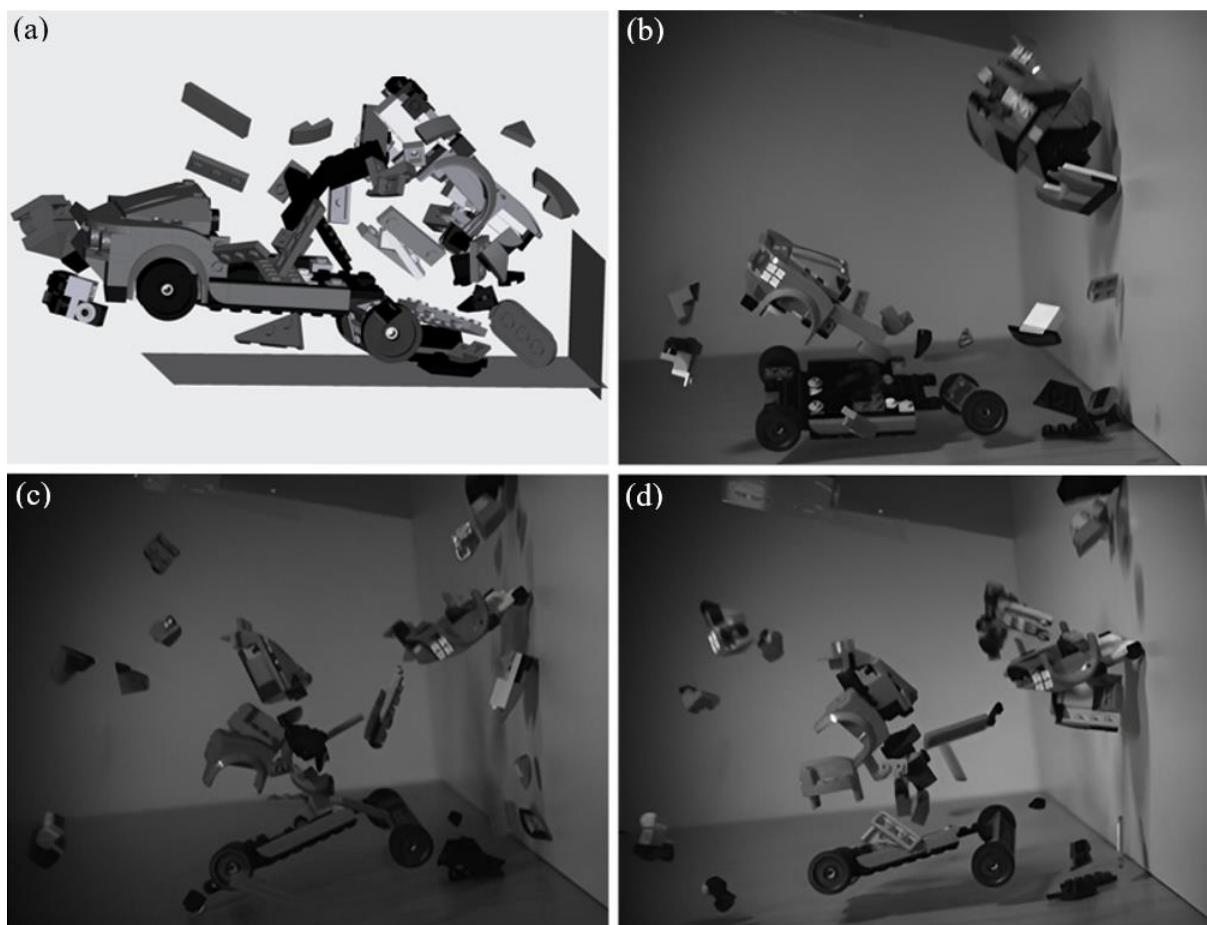
V simulačnom čase 15 ms (viz obr. 60) je vidieť značné zlepšenie v rozpojení MKP modelu, kde sa v zadnej časti vozidla odpája ľavé zadné svetlo a skupina LEGO® kociek v podvozbovej oblasti. Predná časť vozidla je omnoho viac rozpojená na jednotlivé LEGO® kocky ale hlavná oblasť, ktorá prepojuje LEGO® kociek reprezentujúce blatníky, ostáva ako v realite stále spojená. Taktiež došlo ku rozpojeniu prednej nápravy s kolesami vozidla.



Obr. 60 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 15 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5$ N, na prednej časti $SFLF = 8$ N, na zadnej časti $SFLF = 7$ N; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

V poslednom časovom kroku 25 ms (viz obr. 61) je vidieť finálne rozpojenie LEGO® vozidla pri náraze do bariéry zo vzdialenosti 1,6 m. V simulácii ostala zadná oblasť pripojená k podvozku vozidla, aj keď pri simulácii nárazu s parametrom šmykovej sily zlyhania nastavenej na $SFLF = 7$ N pre celkový model, došlo ku jej rozpojeniu. Predná oblasť sa v simulácii odpojila od zvyšku vozidla približne rovnako ako v realite, aj keď sa od celkového modelu dopojilo viacej jednotlivých LEGO® kociek. Vo výsledku je teda možné povedať, že po úprave parametrov zlyhania na hodnoty $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 7$ N sa simulácia nárazu

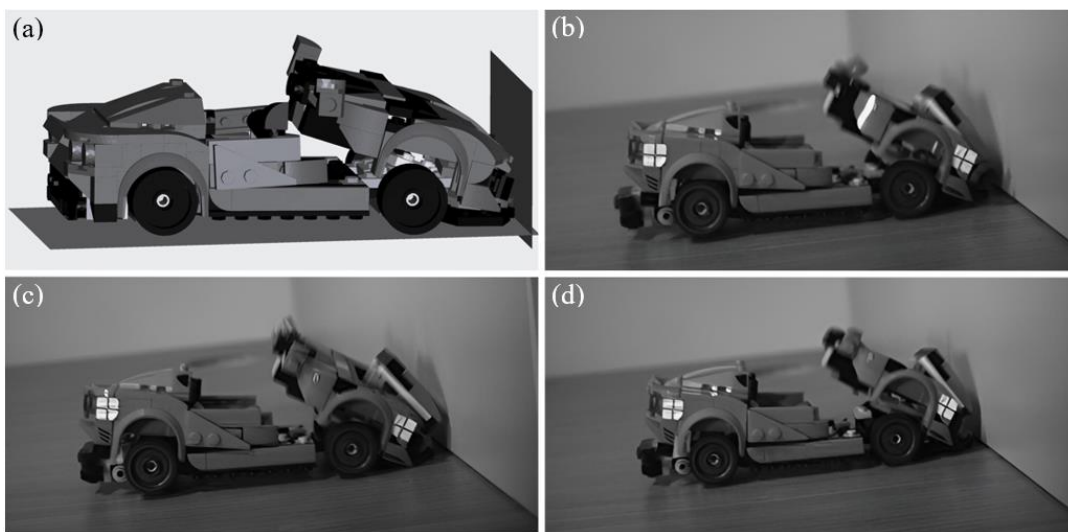
opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m viacej približuje reálnej nárazovej skúške.



Obr. 61 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m v čase 25 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5$ N, na prednej časti $SFLF = 8$ N, na zadnej časti $SFLF = 7$ N; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

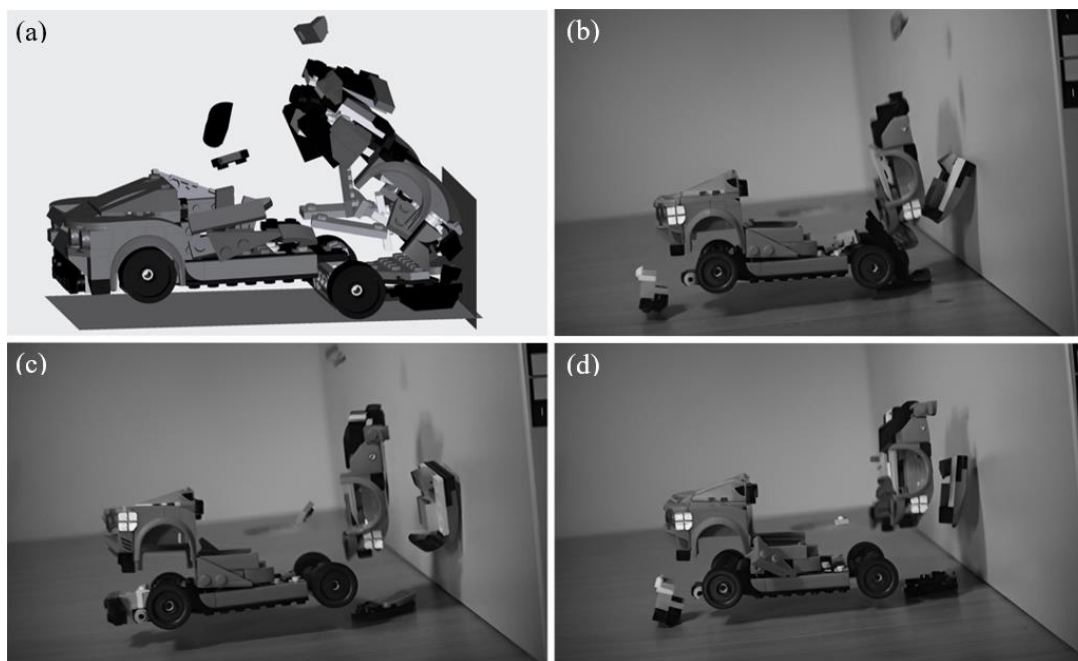
S pôvodne nastavenými parametrami sa simulácie nárazových skúšok modelov LEGO® Ferrari 812 Competizione správala približne rovnako aj pri definovaní rozdielnych hodnôt rýchlostí nárazu. Po vytvorení nových kariet *CONTACT_TIERBEAK_NODES_ONLY, s parametrom normálovej sily zlyhania $NFLF = 14,5$ N a parametrom šmykovej sily zlyhania $SFLF = 8$ N definované pre LEGO kocky v prednej časti modelu a $SFLF = 7$ N pre LEGO® kocky nachádzajúce sa v zadnej časti modelu, bola táto skutočnosť overená pre hodnoty rýchlosti nárazu $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo zodpovedá nárazovej skúške opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m.

V simulačnom čase 5 ms (viz obr. 62) je vidieť podobný začiatok rozpájania prednej časti vozidla ako v prípade simulácie nárazu LEGO® modelu pri dĺžke dráhy 1,6 m, avšak je možné pozorovať určité rozdiely. V tomto prípade sa predná časť vozidla začala rozpájať ako jeden celok bez uvoľnenia jednotlivých LEGO® kociek a LEGO® kocky nachádzajúce sa v strednej časti vozidla sa taktiež príliš neuvolnili, čo zodpovedá reálnemu nárazu LEGO® modelu. Na druhú stranu ani v tomto variante simulácie nedochádza ku rozpojeniu zadnej oblasti od podvozku.



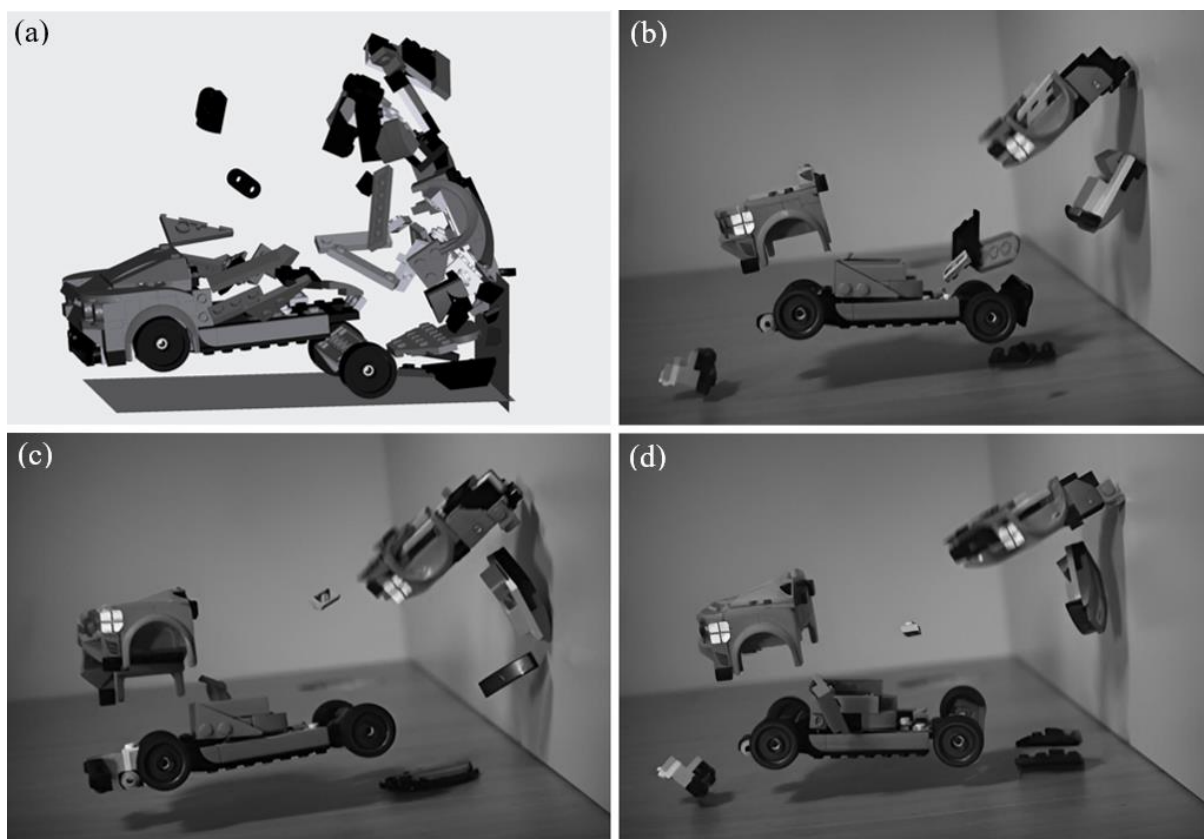
Obr. 62 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 5 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5$ N, na prednej časti $SFLF = 8$ N, na zadnej časti $SFLF = 7$ N; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

V čase 15 ms (viz obr. 63) je vidieť väčšie rozpojenie LEGO® kociek nachádzajúcich sa na bokoch vozidla a zároveň sa odpojila predná náprava s kolesami rovnako aj určitý počet jednotlivých LEGO® kociek z prednej oblasti vozidla. V porovnaní s reálnymi rozpojeniami modelu sa v predná časť rozpadla na menej LEGO® kociek než je tomu v simulácii ale zase dochádza ku rozpojeniu zadnej oblasti vozidla, čo nie je možné vidieť v simulácii nárazu.



Obr. 63 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 15 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5$ N, na prednej časti $SFLF = 8$ N, na zadnej časti $SFLF = 7$ N; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

Posledný porovnávaný časový krok 25 ms je zobrazený na *obr. 64*, kde je možné pozorovať kompletne rozpojenie opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m. Oproti predchádzajúcemu časovému kroku nedošlo k veľkému rozpojeniu zvyšných LEGO® kociek. V porovnaní s realitou je možné povedať, že aplikovanie upravených parametrov zlyhania v karte *CONTACT_TIERBEAK_NODES_ONLY, značne zlepšil chovanie modelu, avšak stále sa tam nachádzajú určité rozdiely. Hlavným je ten, že ani v tomto variante nárazu nedošlo k odpojeniu zadnej časti vozidla od podvozku. Predná časť sa ale od vozidla odpojila, aj keď v simulácii došlo k rozpojeniu na viac jednotlivých LEGO® kociek než v realite. Je ale vidieť, že pri nastavení nových parametrov zlyhania je MKP model rozpojený odlišne a z toho dôvodu by bolo potrebné upraviť tieto hodnoty pre každý variant nárazu zvlášť.



Obr. 64 Porovnanie výsledkov MKP analýzy a experimentu nárazovej skúšky opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m v čase 25 ms: (a) MKP model: $NFLF = 14,5 \text{ N}$, na prednej časti $SFLF = 8 \text{ N}$, na zadnej časti $SFLF = 7 \text{ N}$; (b) prvý pokus; (c) druhý pokus; (d) tretí pokus reálneho nárazu

ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvorenie MKP analýzy nárazovej skúšky modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione. Nakoľko pri tvorbe MKP modelov reálnych vozidiel je potrebné veľké množstvo vstupných parametrov, tento spôsob ponúka jednoduchšie porovnanie výsledkov simulácie a reálnej nárazovej skúšky.

Pre správne simulovanie rozpojenia LEGO® modelu pri náraze bolo potrebné určiť hodnotu sily, pri ktorej dochádza ku rozpojeniu dvojíc LEGO® kociek a následné definovanie parametrov normálovej (*NFLF*) a šmykovej sily zlyhania (*SFLF*) v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY. Z vedeckej štúdie Luo et al. [34] bolo stanovené, že veľkosť, ktorá je potrebná na rozpojenie dvojice LEGO® kociek musí presiahnuť hodnotu $F_{t,lim} = 2,8$ N. Z tohto dôvodu bola vykonaná rada simulácií, pomocou ktorých boli definované parametre zlyhania ($NFLF = 1,45$ N a $SFLF = 0,9453$ N) a použité pre všetky spojenia vo výslednom MKP modeli.

Experimentálne overenie nárazovej skúšky bolo realizované na opotrebovanom a novom modeli LEGO® Ferrari 812 Competizione, rovnomerne zrýchleným pohybom po naklonenej rovine z dvoch vzdialeností 1,6 m a 1 m. Pri analyzovaní výsledkov nárazových skúšok reálnych modelov bolo zistené, že na výsledné rozpojenie LEGO® modelov vplyva:

- stav LEGO® modelu,
- vzdialenosť od nárazovej bariéry,
- opakovateľnosť nárazu LEGO® modelu z jednej vzdialenosti.

Pri porovnaní výsledkov obdržaných na základe simulácií s výsledkami reálneho rozpojenia LEGO® modelov bolo zistené, že nastavenie hodnôt parametrov zlyhania v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, bolo príliš malé a v simuláciách dochádzalo k rozpojeniu celého modelu na jednotlivé LEGO® kocky, nezávisle na tom ako sa menila rýchlosť nárazu, čo ale nezodpovedalo reálnym výsledkom. Táto skutočnosť vychádza z experimentálneho merania veľkosti zaťažujúcej sily, pri namáhaní dvojíc LEGO® kociek na jednoosí ťah a trojbodový ohyb. Veľkosti zaťažujúcich síl obdržané týmito meraniami boli väčšie než udáva vedecká štúdia Luo et al. [34] a zároveň pri rovnakom type spojenia mali hodnoty zaťažujúcich síl veľké rozptyly, ktoré boli pravdepodobne spôsobené vplyvom výrobných tolerancií.

Z tohto dôvodu bola vykonaná modifikácia parametrov zlyhania pre nárazovú skúšku opotrebovaného LEGO® modelu zo vzdialenosti 1,6 m. Parameter normálovej sily zlyhania bol zväčšený na desaťnásobok predchádzajúcej hodnoty ($NFLF = 14,5$ N) a iteratívnym procesom bol určený parameter šmykovej sily zlyhania *SFLF*. Zmenou hodnoty *SFLF* bolo zistené, že nie je možné docieľiť, aby sa rozpadala predná a zadná oblasť modelu zároveň, tak ako sa tomu dialo v realite.

Výsledky simulácií pri nastavení hodnoty $NFLF = 14,5$ N a $SFLF = 8$ N zodpovedali rozpojeniu prednej časti reálneho LEGO® modelu a $NFLF = 14,5$ N, $SFLF = 7$ N zase odpojeniu zadnej. Preto bola hodnota $SFLF = 8$ N aplikovaná na LEGO® kocky v prednej oblasti vozidla a $SFLF = 7$ N na LEGO® kocky v zadnej oblasti, ale ani kombinácia týchto hodnôt nedocielila rozpojenie celej zadnej časti MKP modelu tak, ako sa rozpojila pri reálnom náraze. V tejto oblasti došlo len k odpojeniu skupinu LEGO® kociek reprezentujúcich ľavé zadné svetlo a skupinu LEGO® kociek nachádzajúcich sa na podvozku

vozidla. Na druhú stranu rozpojenie prednej časti MKP modelu bolo takmer rovnaké ako pri experimentálnej nárazovej skúške opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1,6 m.

Kombinácia hodnôt *SFLF* bola následne aplikovaná aj pre simuláciu s rýchlosťou nárazu $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ktorá zodpovedala nárazovej skúške opotrebovaného modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione pri dĺžke dráhy 1 m. Pri tejto hodnote rýchlosti nárazu bolo možné pozorovať rozdielne rozpojenie modelu, než tomu bolo pri rýchlosti nárazu $4,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (dĺžka dráhy 1,6 m). Rozpojenie prednej časti vozidla približne zodpovedalo reálnemu rozpojeniu, ale zadná časť vozidla sa od podvozku neodpojila. Pri zmene hodnoty *SFLF* = 7 N na *SFLF* = 6 N, pre LEGO® kocky nachádzajúce sa v zadnej časti LEGO® modelu sa MKP model začal rozpájať takmer rovnako ako keď boli v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY, nastavené pôvodné hodnoty parametrov zlyhania (*NFLF* = 1,45 N a *SFLF* = 0,9453 N), z toho dôvodu bola úprava hodnôt zlyhania ukončená.

Na základe všetkých získaných poznatkov pri tvorbe MKP analýzy nárazovej skúšky modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione, by bolo potrebné vykonať podrobnejšiu analýzu zaťažujúcich síl potrebných na rozpojenie LEGO® kociek. Pomocou elektrónového mikroskopu by boli zmerané rozmery vonkajších výbežkov a dutín kocky, čím sa vytvorili kombinácie dvojíc kociek s zodpovedajúcimi rozmermi spojovaných častí. Taktiež by bola zmeraná sila, ktorou by sa kocky spájali, aby bola pre všetky prípady dvojíc LEGO® kociek rovnaká. V neposlednom rade by bolo vhodné vytvoriť väčšiu škálu vzoriek rôznych typov kontaktov LEGO® kociek, pre ktoré by bolo experimentálne meranie vykonané. S týmito opatreniami by bolo možné dostať presnejšie výsledky hodnôt zaťažujúcich síl, ktoré by slúžili na podrobnejšie preskúmanie funkcie parametrov zlyhania *NFLF* a *SFLF* v karte kontaktu *CONTACT_TIEBREAK_NODES_ONLY.

Počas realizovania experimentu nárazovej skúšky by sa zaistilo okolie nárazovej konštrukcie nejakým mäkkým materiálom, ktorý by zabránil ďalšiemu rozpojeniu odrazených častí LEGO® modelu, čo by umožnilo lepšiu analýzu experimentu. Pri opakovaní nárazu jedného modelu namiesto spojenia jednotlivých častí naspäť dokopy, by bolo vhodnejšie ich všetky rozobrať na jednotlivé LEGO® kocky, ktoré by sa naspäť spojili, čím bolo zamedzené použitiu LEGO® modelu pre ďalší náraz, s uvoľnenými LEGO® kockami vnútri modelu, ktoré nie je možné pozorovať voľným okom.

Zároveň by bolo zaujímavé podrobnejšie preskúmať ako na rozpojenie LEGO® modelu pri náraze vplýva to, ako dlho je model pred realizovaním nárazu zložený. Mohla by byť vykonaná séria nárazových skúšok s časovým rozstupom napr. niekoľko dní alebo hodín pri zabezpečení totožných podmienok pre každé opakovanie testu. Tým by sa overil jav, ktorý bolo možné pozorovať pri náraze opotrebovaného LEGO® modelu zo vzdialenosti 1,6 m, kde model dosiahol značne menšie rozpojenie pri prvom náraze než pri zvyšných dvoch.

Na záver by s týmito všetkými úpravami bolo žiadúce vykonať aj ťahovú skúšku ABS materiálu, ktorá bola naplánovaná ale z časových dôvodov ju nebolo možné zrealizovať. Tým by sa docielilo overenie a presnejšie definovanie materiálových vlastností pri tvorbe MKP modelu. Kombináciou navrhnutých opatrení by sa dalo docieľiť zlepšenie MKP analýzy nárazovej skúšky modelu LEGO® Ferrari 812 Competizione, ktorá by sa lepšie približovala reálnemu rozpojeniu modelu.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] *The LEGO® group history*. Online. LEGO®. Dostupné z: <https://www.lego.com/cs-cz/aboutus/lego-group/the-lego-group-history>. [cit. 2024-02-19].
- [2] *About us*. Online. LEGO® EDUCATION. Dostupné z: <https://education.lego.com/en-gb/about-us/>. [cit. 2024-02-19].
- [3] *LEGO® MINDSTORMS EV3 User guide*. Online. s. 1-69. Dostupné z: https://www.lego.com/cdn/cs/set/assets/bltbef4d6ce0f40363c/LMSUser_Guide_LEGO_MINDSTORMS_EV3_11_Tablet_ENUS.pdf. [cit. 2024-02-19].
- [4] DONELAN, Peter. *Kinematic Singularities of Robot Manipulators*. Online. s. 1-14. Dostupné z: <https://homepages.ecs.vuw.ac.nz/foswiki/pub/Users/Donelan/WebHome/ksrm.pdf>. [cit. 2024-02-19].
- [5] GONÇALVES, Rogério Sales. *Application of LEGO® Mindstorms Kits for Teaching Mechatronics Engineering*. online. Uberlândia, Brazil: Federal University of Uberlândia, 2017. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349133979_Application_of_LEGO_Mindstorms_Kits_for_Teaching_Mechatronics_Engineering. [cit. 2024-02-19].
- [6] LEGO® MINDSTORMS EV3. online. In: *LEGO®*. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-us/product/lego-mindstorms-ev3-31313>. [cit. 2024-02-19].
- [7] *LEGO® Education WeDo 2.0 Core Set*. Online. LEGO® EDUCATION. Dostupné z: <https://education.lego.com/en-us/products/lego-education-wedo-2-0-core-set/45300/>. [cit. 2024-02-22].
- [8] THE LEGO® GROUP, *Introduction to WeDo 2.0*. Online. roč. 2016, s. 1-8. Dostupné z: <https://assets.education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/blt11bb0be09b7ce4fb/5ebe86587c56c17cfc07c361/wedo-introduction.pdf?locale=en-us>. [cit. 2024-02-22].
- [9] *LEGO® Education inspires learning you can build on*. Online. In: LEGO® EDUCATION. Dostupné z: <https://education.lego.com/en-us/>. [cit. 2024-02-22].
- [10] ALIYU, Hassan a TALIB, Corrienna. *Intimating the value of LEGO® Education programs as a resources for effective robotic education in elementary and secondary schools*. Online. roč. 2022, s. 150-162. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/365838275_Intimating_the_Value_of_LEGO_Education_Programs_as_a_Resources_for_Effective_Robotic_Education_in_Elementary_and_secondary_Schools. [cit. 2024-02-19].
- [11] *LEGO® Education BricQ Motion*. Online. LEGO® EDUCATION. Dostupné z: <https://education.lego.com/en-us/products/bricq-motion/>. [cit. 2024-02-22].

- [12] *LEGO® SERIOUS PLAY®*. Online. LEGO®. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-gb/themes/serious-play>. [cit. 2024-02-23].
- [13] *LEGO® SERIOUS PLAY® background*. Online. LEGO®. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-gb/themes/serious-play/background>. [cit. 2024-02-23]
- [14] LÓPEZ-FERNÁNDEZ, Daniel; GORDILLO, Aldo; ORTEGA, Fernando; YAGUE, Agustín a TOVAR, Edmundo. *LEGO® Serious Play in Software Engineering Education*. Online. roč. 2016, s. 1-12. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/353113372_LEGOR_Serious_Play_in_Software_Engineering_Education. [cit. 2024-02-23].
- [15] PATTNI, Vijay. *Behold: the full-size Lego Bugatti Chiron!*. Online. TopGear. 2018. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/supercars/behold-full-size-lego-bugatti-chiron>. [cit. 2024-02-22].
- [16] *The inside story of our 1:1 LEGO® Bugatti Chiron*. Online. LEGO®. 2018. Dostupné z: <https://www.lego.com/en-us/categories/adults-welcome/article/story-behind-the-lego-buguatti-chiron>. [cit. 2024-02-22].
- [17] GERLINGER, Thorsten; KOCH, David; HAUFE, Andre; KARAJAN, Nils; WECKESSER, Thomas et al. *Simulation data management from CAD to results with LoCo and CAViT for large scale LS-DYNA® LEGO® crash models*. Online. s. 1-30. Dostupné z: <https://www.dynalook.com/conferences/16th-international-ls-dyna-conference/simulation-t9-2/t9-2-b-simulation-200.pdf>. [cit. 2024-03-15].
- [18] THIELE, Marko. *Investigation of the crash behavior of LEGO® car*. Online. s. 1-8. Dostupné z: https://www.scale.eu/wpcontent/uploads/2022/04/Investigations_into_crash_behavior_of_LEGO_cars.pdf. [cit. 2024-03-15].
- [19] *Ferrari 812 Competizione*. Online. LEGO®. 2024. Dostupné z: <https://www.lego.com/cs-cz/product/ferrari-812-competizione-76914>. [cit. 2024-04-17].
- [20] *Comparing LEGO® bricks, plates and DUPLO® bricks*. Online. LEGO®. 2024. Dostupné z: https://www.lego.com/en-gb/service/help/brick_facts/brick_facts/comparing-lego-bricks-plates-and-duplo-bricks-kA009000001dbm5CAA. [cit. 2024-04-17].
- [21] *THE ANATOMY OF A LEGO® BRICK*. Online. Bricks4Kidz. 2020. Dostupné z: <https://www.bricks4kidz.com/blog/the-anatomy-of-a-lego-brick/>. [cit. 2024-04-17].
- [22] *LDraw All-In-One-Installer*. Online. LDraw. c2003-2024. Dostupné z: <https://www.ldraw.org/article/104.html>. [cit. 2024-04-17].
- [23] CORDON, Dallin a MATTSON, Chris. *The LEGO® brick*. Online. Design review. Dostupné z: <https://www.designreview.byu.edu/collections/the-lego-brick>. [cit. 2024-04-17].

- [24] ROBERTS, Chris. *LDU and You: The Oldest New LEGO® Measurement Unit*. Online. BrickNerd. c2013-2024. Dostupné z: <https://bricknerd.com/home/ldu-and-you-the-oldest-new-lego-measurement-unit-2-9-23>. [cit. 2024-04-17].
- [25] *Bricklink Catalog*. Online. Bricklink. 2024. Dostupné z: <https://www.bricklink.com/v2/main.page>. [cit. 2024-04-19].
- [26] *How are LEGO® toys made?*. Online. LEGO®. 2024. Dostupné z: <https://www.lego.com/ms-my/service/help/fun-for-fans/behind-the-scenes/brick-facts/how-are-lego-toys-made-blt0cb8fe682c26474e>. [cit. 2024-04-26].
- [27] *Materials in LEGO® elements*. Online. LEGO®. 2024. Dostupné z: <https://www.lego.com/ms-my/sustainability/product-safety/materials>. [cit. 2024-04-26].
- [28] *ABS material - Properties and common applications*. Online. Europlast. 2024. Dostupné z: <https://europlas.com.vn/en-US/abs-material-properties-and-common-applications>. [cit. 2024-04-26].
- [29] *ABS - Product data sheet*. Online. Plastim. 2015. Dostupné z: <https://plastim.co.uk/wp-content/uploads/2019/07/ABS-Technical-Data-Sheet.pdf>. [cit. 2024-04-26].
- [30] *ABS 3D Printer Filament*. Online. Terrafilum. 2024. Dostupné z: <https://www.terrafilum.com/products/abs/>. [cit. 2024-04-26].
- [31] HALAMA, Radim et al. *Pružnost a pevnost - interaktivní studijní materiál*. Online. 2012, s. 132-143. Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_pevnost_obraz.pdf. [cit. 2024-04-26].
- [32] KOLLSKER, Torkil. *Mathematical Models and Algorithms for Optimisation of the LEGO® Construction Problem*. Online, PhD thesis. Technical University of Denmark, 2020. Dostupné z: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/236623063/PhD_Thesis_Torkil_Kollsker.pdf. [cit. 2024-03-17].
- [33] WABMANN, Martin a WEICKER, Karsten. *Maximum Flow Networks for Stability Analysis of LEGO® Structures*. Online. Algorithms - ESA 2012. 20th Annual European Symposium. Springer, 2012, s. 813-824. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33090-2_70. [cit. 2024-03-17].
- [34] LUO, Sheng-Jie; YUE, Yonghao; HUANG, Chun-Kai; CHUNG, Yu-Huan; IMAI, Sei et al. *Legolization: Optimizing LEGO® Designs*. Online. s. 1-12. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283432969_Legolization_optimizing_LEGO_designs. [cit. 2024-03-17].
- [35] *Contact modeling in LS-DYNA*. Online. LS-DYNA Support. Dostupné z: <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/contact-modeling-in-ls-dyna>. [cit. 2024-04-17].

- [36] *Tied, Tied Offset, and Tiebreak Contacts*. Online. LS-DYNA Support. Dostupné z: <https://www.dynasupport.com/howtos/contact/tied-tied-offset-and-tiebreak-contacts>. [cit. 2024-04-17].
- [37] *LS-DYNA® Keyword user's manual: Volume 1*. Online. LS-DYNA R13. Livermore Software Technology, AN ANSYS COMPANY, 2021. [cit. 2024-04-17].
- [38] *Time step size*. Online. LS-DYNA Support. Dostupné z: <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-step-size>. [cit. 2024-04-17].
- [39] VAJDA, Drahoslav. *Vyhodnocovanie chyby merania*. Online. s. 12-16. Dostupné z: <https://fyzika.uniza.sk/praktika/Ulohy/Uvod/chyby.pdf>. [cit. 2024-04-28].

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

ABS		Akrylonitril butadién styrén
CAD		Počítačom podporovaný design (Computer aided Design)
D3PLOT		Trojrozmerná vizualizácia post-processingu (Three-dimensional visualization of post-processing)
DOF		Stupne voľnosti (Degrees of freedom)
FEA		Finite element analysis
LCID		Identifikačné číslo zaťažujúcej krivky (Load curve identification number)
LDU		LDraw jednotka (LDraw unit)
LU		LEGO [®] jednotka (LEGO unit)
MKP		Metóda konečných prvkov
MSID		Identifikačné číslo nadradeného segmentu (Master segment set identification number)
NSID		Identifikačné číslo skupiny podradených uzlov (Nodal set identification number containing slave nodes)
SF(G)		Mierka zaťažujúcej krivky (Load curve scale factor)
SOFT		Možnosť obmedzenia kontaktu (Soft constraint option)
SPDM		Proces simulácie a dátového manažmentu (Simulation Process and Data Management)
SSID		Identifikačné číslo podradeného segmentu (Slave segment set identification number)
SSTYP		Podradený segment, súbor uzlov (Slave segment or node set type)
A	[%]	Ťažnosť
c	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť zvuku
E	[MPa]	Youngov modul pružnosti
F	[N]	Zaťažovacia sila vzorku
$F_{z,i,max}$	[N]	Jednotlivé maximálne zaťažujúce sily
F_{max}	[N]	Sila potrebná na pretrhnutie vzorku
f_n	[N]	Normálová sila rozhrania (Normal interface force)
f_s	[N]	Šmyková sila rozhrania (Shear interface force)
f_s	[-]	Súčin pomerov penalizácie a predvolenej penalizačnej tuhosti podradeného uzlu resp. nadradeného segmentu
F_t	[N]	Ťahová sila
$F_{t,limit}$	[N]	Maximálna trecia sila jedného výbežku
F_z	[N]	Zaťažujúca sila
$\overline{F_{z,max}}$	[N]	Priemerná hodnota maximálnych zaťažujúcich síl

k	[N·mm ⁻¹]	Tuhosť pružiny segmentu
K	[MPa]	Objemový modul pružnosti segmentu
k_v	[-]	Počet výbežkov LEGO® kocky zahrnutých v spojení
l	[mm]	Dĺžka vzorku po pretrhnutí
L	[m]	Dĺžka hrany prvku
l_0	[mm]	Počiatočná dĺžka skúšobnej časti vzorku
l_1	[mm]	Vzdialenosť zaťažujúcej sily od bodu otáčania
l_2	[mm]	Vzdialenosť maximálnej trecej sily jedného výbežku od bodu otáčania
MES	[-]	Exponent šmykovej sily v kritériu zlyhania (Exponent for shear force in the failure criterion)
n	[-]	Počet meraní, počet pokusov experimentálneho nárazu
NEN	[-]	Exponent normálovej sily v kritériu zlyhania (Exponent for normal force in the failure criterion)
$NFLF$	[N]	Normálová sila zlyhania (Normal failure force)
$NODFORC$	[N]	Kontaktná sila v uzloch (Nodal contact force)
NY	[-]	y-ový smerový kosínus (y-direction cosine)
r	[mm]	Polomer kolesa
$RCFORC$	[N]	Výsledné sily kontaktného rozhrania (Resultant contact interface forces)
R_e	[MPa]	Medza klzu
R_m	[MPa]	Medza pevnosti v ťahu
s	[m]	Dĺžka dráhy
S	[mm ²]	Prierez vzorku po pretrhnutí, plocha kontaktného prierezu
S_0	[mm ²]	Počiatočná plocha prierezu
$SFLF$	[N]	Šmyková sila zlyhania (Shear failure force)
SFM	[-]	Pomer predvolenej penalizačnej tuhosti nadradeného segmentu (Scale factor on default master penalty stiffness)
SFS	[-]	Pomer predvolenej penalizačnej tuhosti podradeného segmentu (Scale factor on default slave penalty stiffness)
$SLSFAC$	[-]	Pomer penalizácie (Penalty scale factor)
$SPCFORC$	[N]	Reakčné sily jednobodového obmedzenia (Single point constraint reaction forces)
t	[s]	Čas
v	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť LEGO® modelu v okamihu nárazu do bariéry
V	[mm ³]	Objem kontaktného segmentu
\bar{v}	[m·s ⁻¹]	Priemerná rýchlosť v okamihu stretu s bariérou pri náraze opotrebovaného LEGO® modelu s dĺžkou dráhy 1 m

VDC	[%]	Koeficient viskózne tlmenie kontaktu (Viscous damping coefficient)
v_i	[m·s ⁻¹]	Jednotlivé rýchlosti v okamihu stretu s bariérou pri náraze opotrebovaného LEGO® modelu s dĺžkou dráhy 1 m
v_n	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť LEGO® modelu pri náraze
v_r	[mm·min ⁻¹]	Rýchlosť rozpojenia
XC	[m]	x -ová súradnica stredu osi rotácie (x -coordinate on rotational axis)
YC	[m]	y -ová súradnica stredu osi rotácie (y -coordinate on rotational axis)
Z	[%]	Kontrakcia
ZC	[m]	z -ová súradnica stredu osi rotácie (z -coordinate on rotational axis)
$\bar{\delta}$	[-]	Stredná kvadratická chyba aritmetického priemeru
Δ_i	[N]	Odchýlka i -tého merania
Δl	[mm]	Predĺženie skúšobnej časti vzorku
Δt_e	[ms]	Časový krok
ε	[-]	Pomerné pozdĺžne predĺženie
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
σ	[MPa]	Napätie
ω	[rad·s ⁻¹]	Uhlová rýchlosť kolesa