

Počítačová simulace zranění chlapce na zadním sedadle osobního vozidla

Computer Simulation of Injuries to a Boy in the Back Seat of a Passenger Vehicle

Petr Pavlata*

Vision Consulting Automotive s.r.o., Praha 2

Abstrakt

Príspevok se zabývá využitím moderních simulačních technik s pomocí sw VPS (Virtual Performance System) a škálovatelným biomechanickým modelem lidského těla Virthuman při řešení silniční nehody s těžkým zraněním chlapce sedícího na dětské sedačce na zadním sedadle. Závěry analýzy naznačují, že chlapec v rozporu s předchozím tvrzením nebyl připoután. Použitý postup rovněž umožnil zpřesnit střetovou rychlost vozidla. Článek byl publikován v rámci sborníku příspěvků XXXI. mezinárodní vědecké konference Soudního inženýrství, Expert Forensic Science (ExFoS), 26.–27. ledna 2023 v Mikulově.

Klíčová slova: dopravní nehody, zranění, metoda konečných prvků, Virthuman, biomechanický model člověka.

Abstract

The paper deals with the use of modern simulation techniques with the help of sw VPS (Virtual Performance System) and the scalable biomechanical model of the human body Virthuman in solving a road accident with a serious injury of a boy sitting in a child seat on the back seat. The conclusions of the analysis indicate that the boy, contrary to the previous statement, was not restrained. The procedure used also made it possible to refine the impact speed of the vehicle.

Keyword: traffic accidents, injury, finite element method, Virthuman, biomechanical models of human body.

1. ÚVOD

Zásadní informací pro řešení předmětné úlohy je, že v závěrečné fázi nehodového děje vyjelo vozidlo Mazda 626 (dále i mazda) v relativně ostrém oblouku vlevo mimo vozovku, kde šikmo narazilo do nízké betonové zídky plakátové stěny. V této fázi děje 10letý chlapec, sedící na podsedáku na zadním sedadle, utrpěl vážné poranění obličeje. Úkolem znalce bylo posoudit, zda byl chlapec cestující ve vozidle připoután či nikoliv.

Na obr. 1 je znázorněno vozidlo mazda v postřetové pozici; technické údaje vozidla jsou uvedeny v tab. 1. Rozměrové schéma předmětného vozidla je na obr. 2.

Nejprve bylo třeba stanovit poloměr oblouku a rychlost, kterou se vozidlo mazda mohlo pohybovat bezprostředně před střetem.

2. PŘÍPRAVA MODELU – VSTUPNÍ PARAMETRY

2.1 Stanovení poloměru oblouku a okamžité rychlosti vozidla v okamžiku střetu

S využitím plánu policie, orthofotomap Google a několika předchozích znaleckých posudků, byl určen poloměr oblouku předpokládaného předstřetového pohybu vozidla mazda na obr. 3 jako $r = 20$ m. Z obr. 3 je zároveň zřejmé, že vozidlo mazda mohlo narazit do betonové zídky přibližně pod úhlem 70° , též obr. 4.

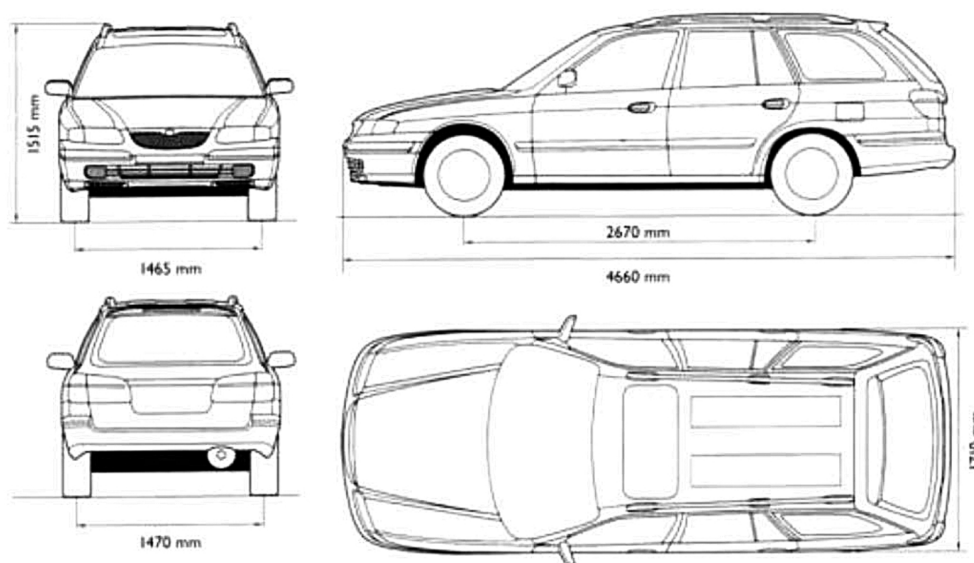
Pravděpodobný rozsah střetových rychlostí 36–40 km/h odvozený v předchozích znaleckých posudcích se jeví jako technicky přijatelný. Předpokládané odstředivé zrychlení vozidla v okamžiku střetu uvádí tab. 2.



Obr. 1 Vozidlo Mazda 626, r.v. 1997–2002, v postřetové pozici.
Fig. 1 Mazda 626 vehicle, year 1997–2002, in post-collision position.

Tab. 1 Technické parametry vozidel Mazda 626, r.v. 1997–2002.
Tab. 1 Technical data of Mazda 626, year 1997–2002.

Tovární značka a typ vozidla:	Mazda 626
Druh vozidla:	osobní
VIN nebo výrobní číslo karoserie / rok výroby:	– / 1998–2002
Druh karoserie:	kombi
Obsah, druh, výkon motoru:	–
Druh a rozměr pneu prvomontáže:	195/60R15H / 195/60R15V / 205/50R16V
Datum prvního uvedení do provozu:	–
Pohotovostní hmotnost	1295 kg
Délka	4660 mm
Šířka	1710 mm
Výška	1515 mm
Rozvor	2670 mm



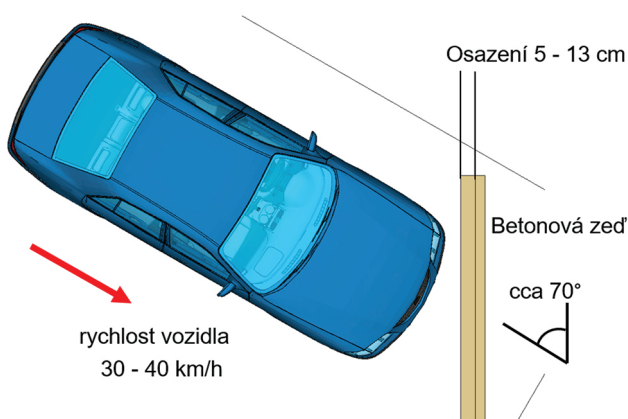
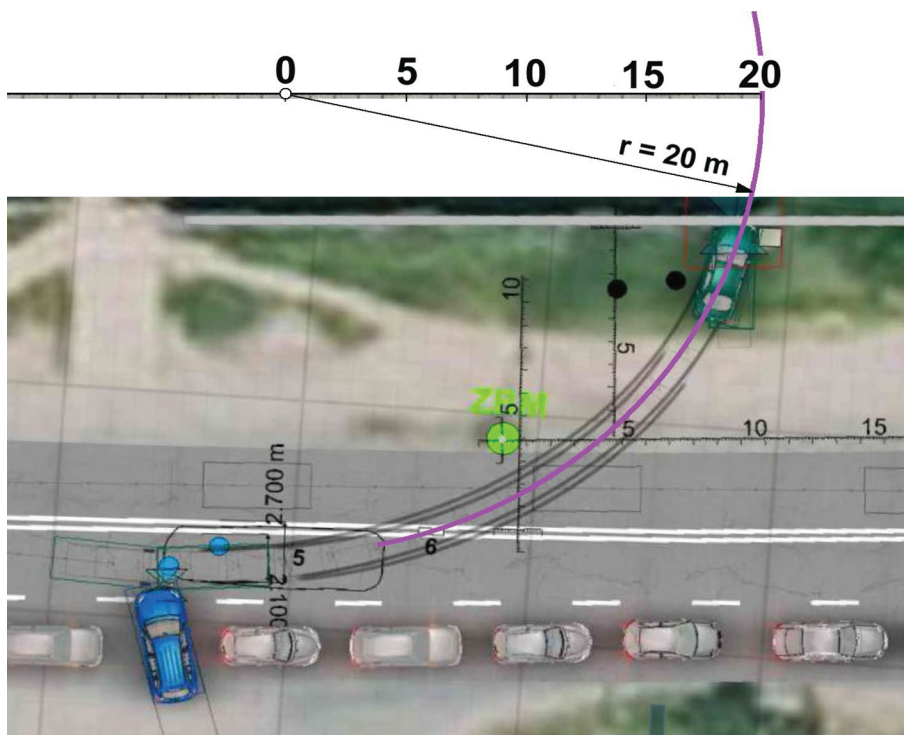
Obr. 2 Rozměrové schéma vozidla Mazda 626, r.v. 1998–2002.
Fig. 2 Dimensions of the Mazda 626 vehicle, year 1998–2002.

Tab. 2 Odštědivé zrychlení při jízdě vozidla v oblouku o poloměru 20 m.
Tab. 2 Centrifugal acceleration when driving a vehicle in an arc with a radius of 20 m.

Rychlost (km/h)	Odštědivé zrychlení (m/s ²)	Kinetická energie (kJ)		
24,1	3,3	31,8	45%	100%
30	3,5	49,3	69%	155%
35	4,7	67,1	95%	211%
36	5,0	71,0	100%	222%
40	6,2	87,7	123%	276%

Obr. 3 Radius oblouku vozidla Mazda v okamžiku střetu.

Fig. 3 The arc radius of the Mazda vehicle at the moment of impact.



Obr. 4 Předstřetová poloha vozidla mazda.
Fig. 4 Pre-collision position of the Mazda.

Zlomenina mediální stěny očníce (orbitální střední stěny)

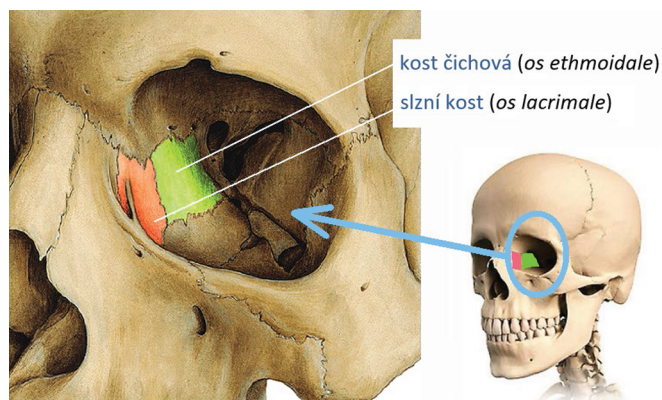
Z lékařských zpráv vyplývá, že chlapec utrpěl při střetu zranění levé části obličeje, včetně zranění oční bulvy. Zranění lebky chlapce bylo definováno jako porušení kontinuity (zlomenina) mediální mediobazální stěny levé orbity (viz obr. 5).

Ač tato kapitola nepatří přímo do odbornosti znalce v oboru analýz silničních dopravních nehod, je nezbytná pro pochopení mechanismu poranění hlavy chlapce cestujícího vozidlem Mazda.



Obr. 5 Zranění levé části obličeje chlapce.
Fig. 5 Injury to the left side of the boy's face.

Zlomenina mediální stěny očníce je nejčastěji výsledkem tupého poranění periorbitální oblasti. Stav může být důsledkem dopravních nehod, sportovních aktivit, násilí nebo pádů.



Obr. 6 Mediální stěna očníce.
Fig. 6 Medial wall of the orbit.



Obr. 7 Pohled do zadní části vozidla po nehodě, dětský podsedač Babideal.
Fig. 7 View of the rear of the vehicle after the accident, Babideal child booster seat.

Mediální stěna očníce je se svojí tloušťkou pouhých 0,2–0,4 mm nejtenčí ze 4 orbitálních stěn, a proto je náchylnější ke zlomeninám. Sestává zejména ze *slzní kosti (os lacrimale)* a *kosti čichové (os ethmoidale)*, viz obr. 6.

Zlomenina mediální stěny očníce je již podle definice čistá vnitřní zlomenina, omezená na stěnu očníce bez postižení jejího okraje. Byly navrženy dvě teorie, které vysvětlují, jak k těmto zlomeninám dochází. Jsou to hydraulické nebo vzpěrné mechanismy, přičemž se s největší pravděpodobností jedná ve většině případů o kombinaci těchto dvou mechanismů.

Hydraulická hypotéza uvádí, že orbitální dno (spodinu) a/nebo mediální orbitální stěna prasknou, pokud dojde ke zvýšení orbitálního tlaku s vnějším dopadem, který vede ke zvýšenému orbitálnímu tlaku vedoucímu ke zlomenině. Boční stěna a strop jsou obvykle dostatečně silné, aby vydržely takové trauma.

Teorie vybočení (vzpěrné mechanismy) uvádí, že síla působící na orbitální okraj přenesla sílu na slabší orbitální dno nebo mediální stěnu, což způsobí zlomeninu.

2.2 Dětský podsedač (booster)

Dle výpovědi řidiče vozidla mazda byl chlapec v době nehody usazen v zadní části vozidla mazda usazen na dětském podsedačku značky Babideal, čínské výroby, konstruované pro hmotnost dítěte 15 až 36 kg, obr. 7. Detailní pohled na podsedač je na obr. 8.

2.3 Kritérium poranění hlavy (HIC)

Kritérium poranění hlavy (HIC – Head Injury Criterion) je mírou pravděpodobnosti poranění hlavy v důsledku nárazu. HIC lze použít k posouzení bezpečnosti týkající se vozidel, osobních ochranných pomůček a sportovního vybavení. Obvykle se proměnná odvozuje z měření akcelerometru namontovaného v těžišti hlavy figuríny pro nárazové zkoušky, když je figurína při laboratorních nárazových zkouškách vystavena silám nárazu. Jako doplněk mechanického



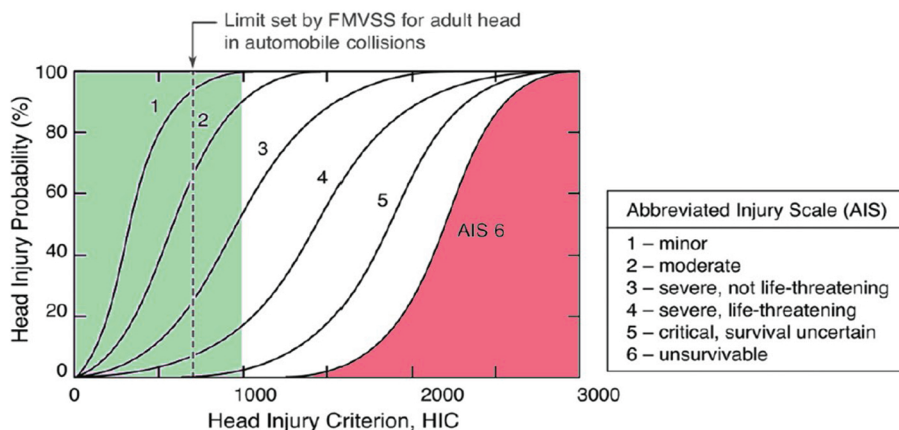
Obr. 8 Dětský podsedač Babideal, foto z internetu.
Fig. 8 Babideal children's booster seat, photo from the Internet.

Tab. 3 Limitní hodnoty HIC dle revidovaného standardu FMVSS 208.
Tab. 3 HIC limit values according to the revised FMVSS 208 standard.

Typ figuríny	95% HIII*	50% HIII	5% HIII	Dítě 6 let	Dítě 3 roky	Batole 1 rok
Limit HIC ₁₅	700	700	700	700	570	390

* 95% HIII není zahrnut v konečné verzi, avšak limitní hodnota je zde uvedena z informačních důvodů.

Obr. 9 Závislost pravděpodobnosti poranění hlavy dle HIC a AIS, Schmitt.
Fig. 9 Graph of the probability of head injury according to HIC and AIS, Schmitt.



testování je využívána již téměř 40 let rovněž virtuální analýza s podporou matematických počítačových modelů, která zejména v posledních dvou dekádách nabývá na značném významu a ve fázi vývoje nových vozů se stává téměř dominantním nástrojem. Jedním z takových nástrojů používaných k simulaci dynamického pohybu cestujících jsou modely ARB (Articulated Rigid Body – mechanické systémy tuhých těles s klouby), umožňující výpočetně určit kritérium poranění hlavy (HIC) a další biomechanické veličiny, viz např. škálovatelný biomechanický model člověka Virthuman (obr. 10).

ARB tak poskytuje užitečný nástroj, který pomáhá porozumět reakcím cestujících v různých prostředích (dopravní prostředky – kromě silničních vozidel jsou využívána rovněž pro tramvaje, železniční vozidla a letadla).

ARB jsou aktuálně využívány nejen ve výzkumu a vývoji prvků pasivní bezpečnosti vozidel jako nástroj napomáhající pochopení kinematiky cestujících, ale rovněž ve forenzní technice a při rekonstrukci dopravních nehod.

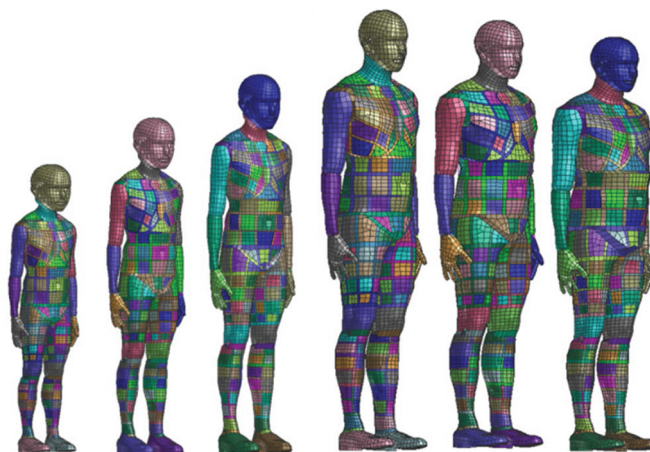
HIC je definován jako:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\} \max, \quad (1)$$

kde t_1 a t_2 jsou počáteční a konečné časy (v sekundách) zvolené pro maximalizaci HIC a zrychlení $a(t)$ se měří v g (standardní tíhové zrychlení).

Doba trvání $t_2 - t_1$ je omezena maximální hodnotou 36 ms, či obvyklejší 15 ms. To znamená, že HIC zahrnuje účinky zrychlení hlavy a dobu trvání zrychlení. Vysoké hodnoty zrychlení mohou být tolerovány po velmi krátkou dobu.

Z grafu na obr. 9 je zobrazena závislost pravděpodobnosti poranění hlavy pro HIC a AIS (Abbreviated Injury Scale – stupnice závažnosti zranění používaná v medicíně od roku 1969 pro souhrnný popis poranění jednotlivých částí těla na stupnici 0–6, kde 0 je bez zranění a 6 je zranění fatální), publikovaná např. v pracích Schmitta [26].



Obr. 10 Příklad vygenerovaných jedinců Virthuman s různými tělesnými parametry.

Fig. 10 Example of generated Virthuman individuals with different body parameters.

Při HIC 1000 je pro průměrného dospělého 18 % pravděpodobnost těžkého poranění hlavy, 55% pravděpodobnost vážného poranění a 90% pravděpodobnost středně těžkého poranění hlavy.

HIC se používá ke stanovení hvězdičkového hodnocení bezpečnosti automobilů podle metodiky amerického Národního úřadu pro bezpečnost silničního provozu (NHTSA) a ke stanovení hodnocení, které uděluje Insurance Institute for Highway Safety (IIHS).

Některé automobilové předpisy (např. FMVSS 208) a s nimi související odborné studie doporučují jako limitní hodnotu pro úspěšný výsledek testu HIC 700, u malých dětí pak HIC 390–570, viz tab. 3.

Obecně lze tvrdit, že poranění hlavy při nehodě může nastat, pokud se hlava dostane do kontaktu s některou z různých struktur vozidla, mezi něž patří zejména místa na sedadle, jako je opěradlo sedadla, loketní opěrka, stolek nebo jakékoli vybavení namontované na sedadle. Hlava se také může dotknout blízkých struktur jako je

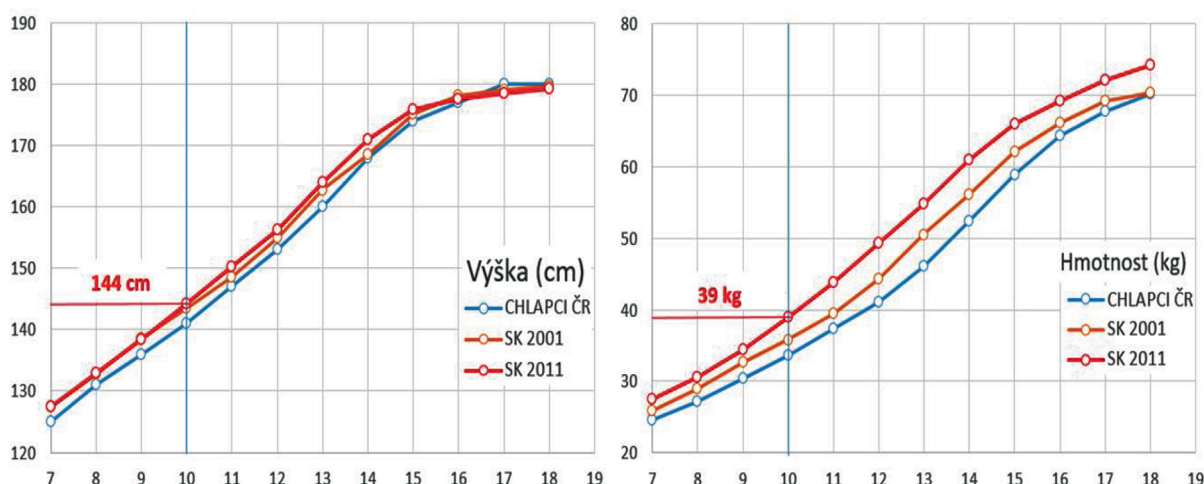
přepážka, přístrojová deska, sluneční clona a pod. Kontakt s tvrdým povrchem může způsobit zlomeniny lebky a různé typy poranění mozku. Poranění mozku je také možné i bez kontaktu s hlavou, pokud jsou setrvačné síly dostatečně vysoké. Zatímco vážné poranění hlavy je bezprostřední hrozbou pro život. Kritérium poranění hlavy (HIC) se používá k hodnocení rizika poranění hlavy a vypočítává se podle rovnice (1).

Je rovněž třeba si uvědomit, že při dopravních nehodách dochází obecně ke třem po sobě jdoucím kontaktům:

1. „První kontakt“ je ten, kdy např. vozidlo narazí do jiného vozidla nebo předmětu, následkem čehož je vozidlo rychle zpomaleno a/nebo natočeno.
2. „Druhý kontakt“, způsobený vlivem setrvačného pohybu cestujícího ve vozidle vozidla a jeho následný kontakt s některou z částí interiéru vozidla.
3. „Třetí kontakt“ je vyvolaný vlivem setrvačných účinků vnitřních orgánů cestující, tedy např. pohyb mozku uvnitř lebeční dutiny a jeho náraz na tuhou část skeletu lebky (otřes mozku).

2.4 Virthuman

Virthuman je škálovatelný biomechanický model lidského těla hybridního typu (ARB s řadou deformovatelných elementů), který na statistickém základě umožňuje vygenerovat model člověka s tělesnými parametry v rozsahu výšek 105 – 195 cm, hmotností 10 až 150 kg, obr. 10. Model dokáže dále zohlednit např. i pohlaví jedince a věk 6 až 75 let. Virthuman byl vyvinut v roce 2014 společností ESI Group ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni a je k dispozici v prostředí Virtual Environment od verze. VE 10.5. Model je plně validován pomocí celosvětově uznávaných metodik (např. hlava a HIC je validována podle metodiky Yoganandana, kdy kulový impaktor hmotnosti 1.213 kg narazí na hlavu rychlostí 7.1 m/s, přičemž je sledována odezva kontaktní síla vs. deflektce hlavy; validace byla podrobně popsána např. v článku časopisu SAE Technical Paper autory Janem Vychytillem a kol. – „Scalable Multi-Purpose Virtual Human Model for Future Safety Assessment“ pod č. 2014-01-0534) a je používán zejména v automobilovém průmyslu. Model je bez výhrad recenzován a uznáván světovými experty na virtuální biomechaniku.



Obr. 12 Statisticky určená výška a hmotnost 10letého chlapce.
Fig. 12 Statistically determined height and weight of a 10-year-old boy.

	Good	dobry
	Acceptable	prijatelný
	Marginal	limitní
	Poor	nadlimitní

Obr. 11 Barevná stupnice biomechanického zatížení částí těla Virthuman.

Fig. 11 Color scale of biomechanical load of Virthuman body parts.

Po vzoru komerčního hodnocení bezpečnosti vozidel pomocí hvězdiček a barevné škály možných poranění při standardizovaných testech, viz např. <https://www.euroncap.com>, umožňuje Virthuman podobným způsobem ohodnotit celou škálu výsledků biomechanické zátěže, dosažených v jednotlivých částech těla sledované osoby, viz stupnice na obr. 11, kdy limitní hodnota (např. pro hlavu HIC=1000) je znázorněna oranžovou barvou; nadlimitní hodnoty (HIC>1000) jsou pak již v barvě červené:

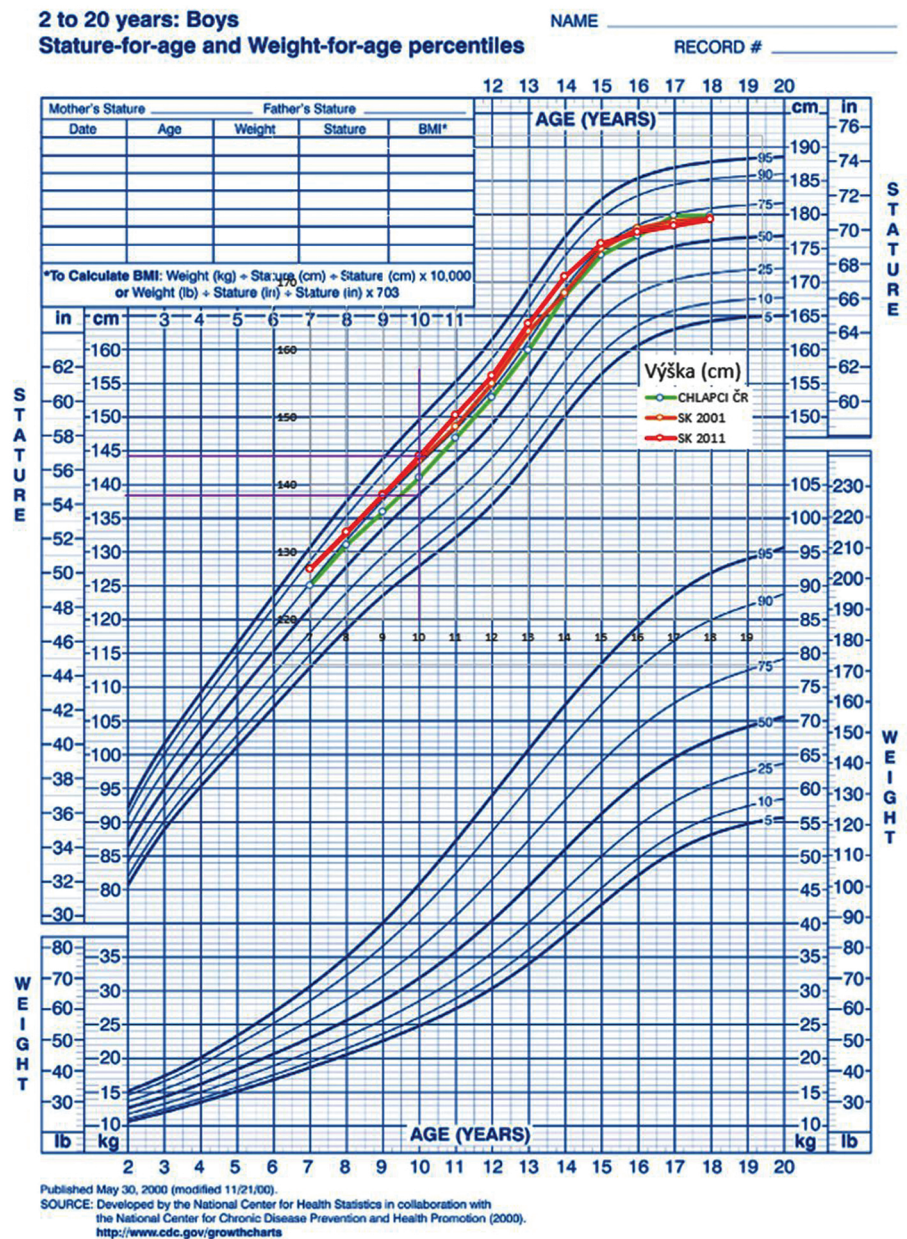
2.5 Vymezení výšky a váhy chlapce

Chlapec dovršil v době DN právě 10 let. Vzhledem k nedostatku jiných údajů byla výška a hmotnost chlapce použita jako vstupní hodnota k počítačové simulaci stanovena jako průměrná hodnota z referenčních údajů Státního zdravotního ústavu ČR a dalších obdobných podkladů ze SR. Výška chlapce byla takto stanovena jako 144 cm, hmotnost 39 kg, viz obr. 12 a obr. 13.

2.6 Výpočetní modely

Zjištění technicky možného průběhu nehodového děje v okamžiku střetu vozidla mazda s betonovou zídou a určení technicky možné biomechanické zátěže chlapce sedícím na zadním sedadle vozidla bylo výpočtově realizováno s podporou software VPS (Virtual Performance Sytem) společnosti ESI Group. S podporou tohoto výpočtově – simulačního softwaru je možno danou problematiku řešit s využitím nelineárního explicitního numerického řešiče nelineární dynamiky PAM Crash metodou konečných prvků (FE = Finite Elements), s elasticko-plastickými materiálovými modely. Tento

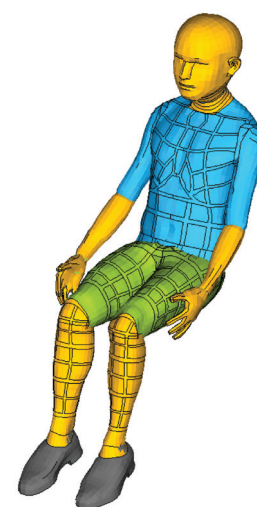
Obr. 13 Růstový graf chlapců
2 až 20 let, WHO.
Fig. 13 Growth chart of boys
2 to 20 years old, WHO.



software pracující s deformovatelnými modely analyzovaných subjektů je využíván ve většině světových automobilek při vývoji nových vozidel, s cílem jednak splnit legislativní požadavky v oblasti pasivní bezpečnosti vozidla podle metodik nejrozumnějších standardů (např. EHK či EuroNCAP) a jednak tyto požadavky dále překročit a zvýšit tak bezpečnost účastníků silničního provozu v případě dopravní nehody. Použité modely jsou pro tyto účely plně validovány.

Jako model 10letého chlapce byl použit škálovatelný antropomorfní model člověka typu Virthuman MBS v2.1work6, o výšce 144 cm a hmotnosti 39 kg, obr. 14.

Havarované vozidlo Mazda 626 bylo typu kombi, přičemž hybridní FE model vozidla Mazda 626 byl vytvořen na bázi dostupného CAD modelu vozidla Mazda 626 GF sedan, obr. 15, r.v. 1997–2002 s deformovatelnou přední částí vozidla (přední nárazník, spoiler, kapota, PP blatník, PP světlomet) a hlavovou opěrkou řidiče. Zde je třeba poznamenat, že obě varianty vozidla Mazda 626 mají konstrukčně shodnou jak přední částí vozu, tak i interiér, a liší se pouze tvarem zadní části a rozdílnou hmotností.



¶ Obr. 14 Model chlapce, 10 let.
Fig. 14 Average 10-years-old boy model.

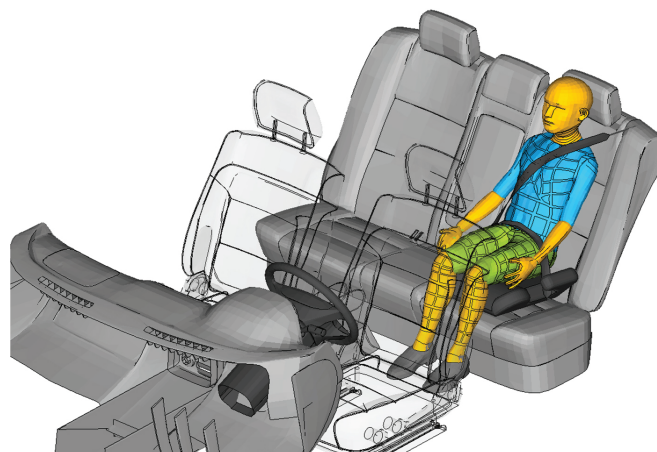


Obr. 15 Model vozidla Mazda 626 GF (1997–2002).
Fig. 15 Mazda 626 GF year 1997–2002 vehicle model.

Použitý model vozidla varianty sedan byl proto pro simulaci dovážen na pohotovostní hmotnost odpovídající variantě kombi, viz obr. 2, plus hmotnost řidiče asi 80 kg a chlapce v oblečení 40 kg, tedy na 1420 kg.

Tab. 4 Parametry modelu 10letého chlapce.
Tab. 4 Model parameters of a 10-year-old boy.

Model figuríny	Virhuman MBS v1.2work6
věk	10
pohlaví	muž
výška	144
hmotnost	39
percentil	56
počet prvků	9 534
počet uzlů	10 043



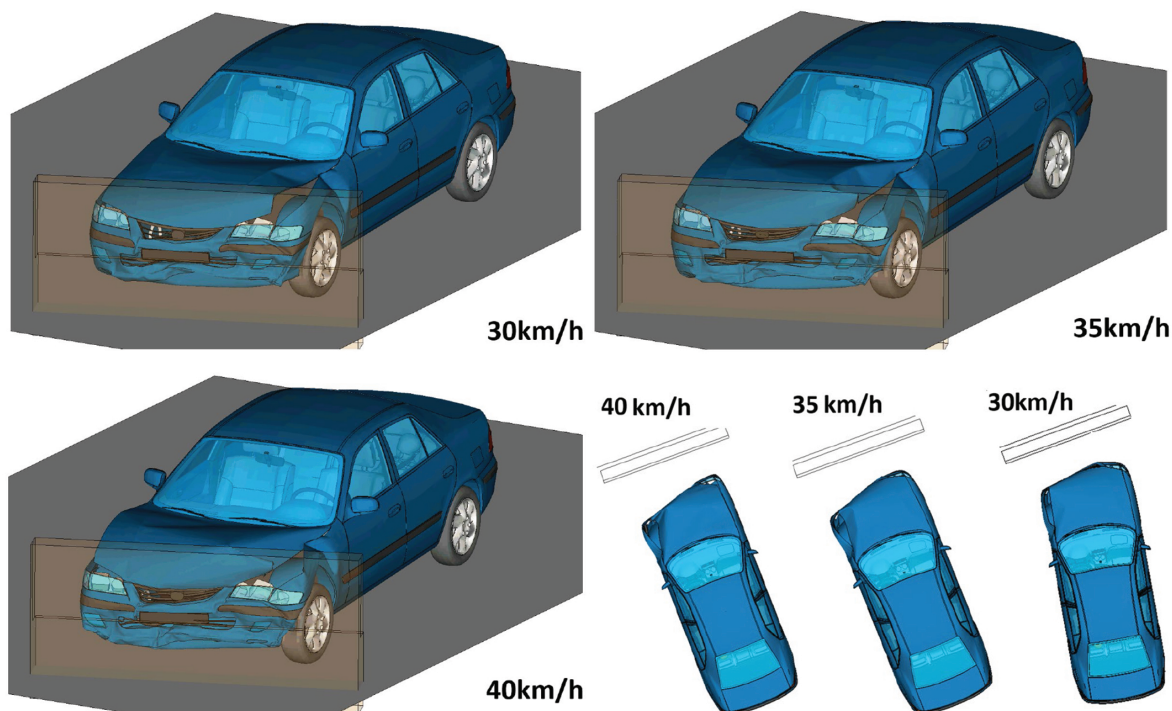
Obr. 16 Interiér vozidla Mazda 626 (1997–2002) s modelem chlapce na podsedáku.

Fig. 16 Interior of a Mazda 626, year 1997–2002, with a model of boy on the booster.

Na obr. 16 je pohled do interiéru vozidla s modelem 10letého chlapce usazeným na dětském podsedáku, jehož model byl pro účely simulace rovněž vytvořen.

Tab. 5 Parametry modelu vozidla Mazda 626 GF.
Tab. 5 Model parameters of Mazda 626 GF.

Model vozidla	Mazda 626
Počet prvků	526 738
Počet uzlů	453 671
Materiálový model	Krupkowsky elasticko-plastický
Rozměry a hmotnosti	viz kap. 3.5



Obr. 17 Deformace modelu a natočení vozidla mazda při rychlostech 30–35–40 km/h.
Fig. 17 Deformation of the model and rotation of the Mazda at speeds of 30–35–40 kph.

2.7 Použitý výpočetní software

K prováděným výpočtům byl použit následující software:

- preprocessor ANSA a postprocessor META od společnosti BETA CAE Systems S.A.,
- explicitní numerický řešič PAM-Crash společnosti ESI Group, verze 2019.

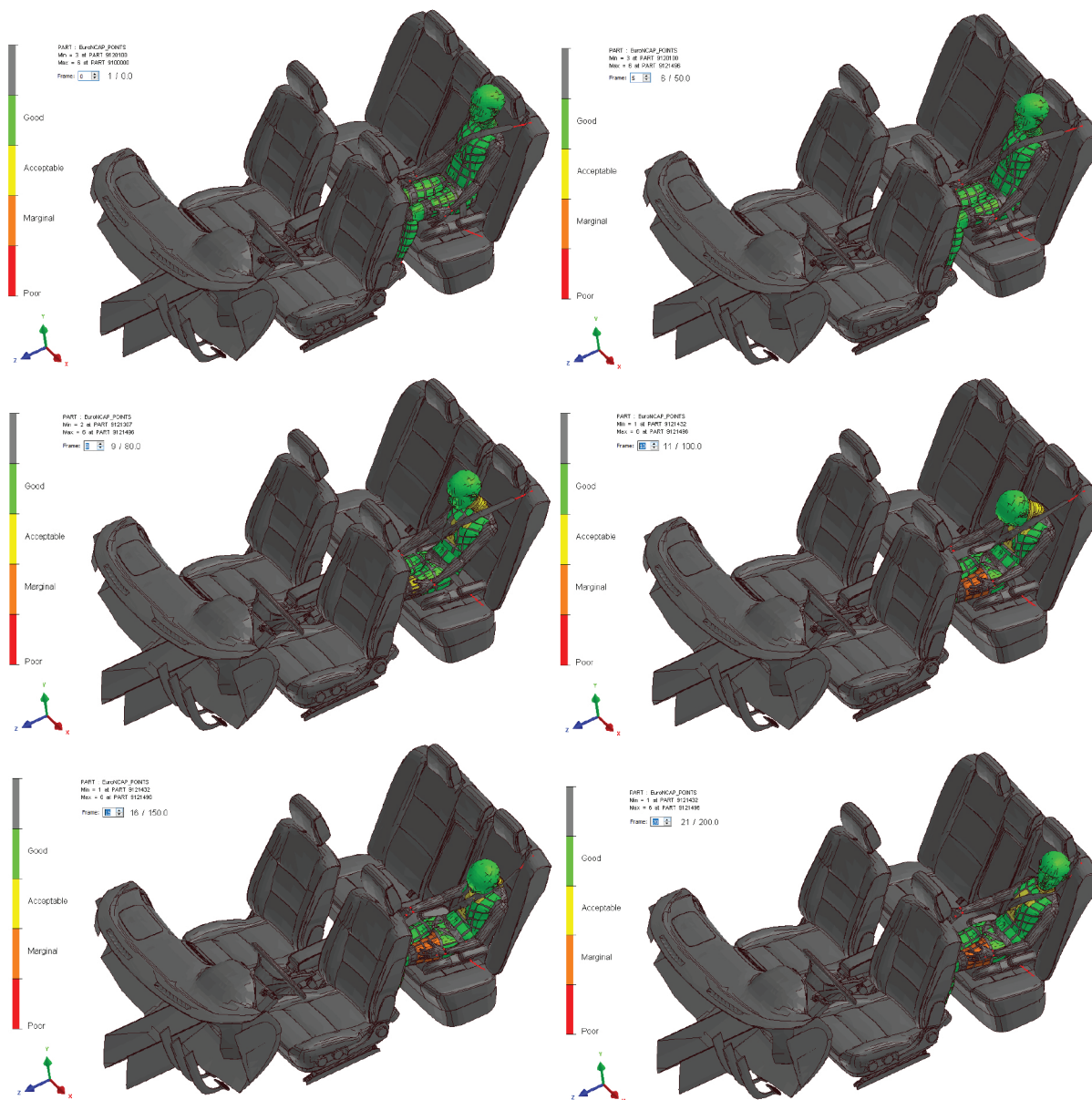
Tento software je validován a certifikován pro vývojové práce v automobilovém průmyslu.

3. SIMULACE POHYBU CHLAPCE V INTERIÉRU VOZIDLA

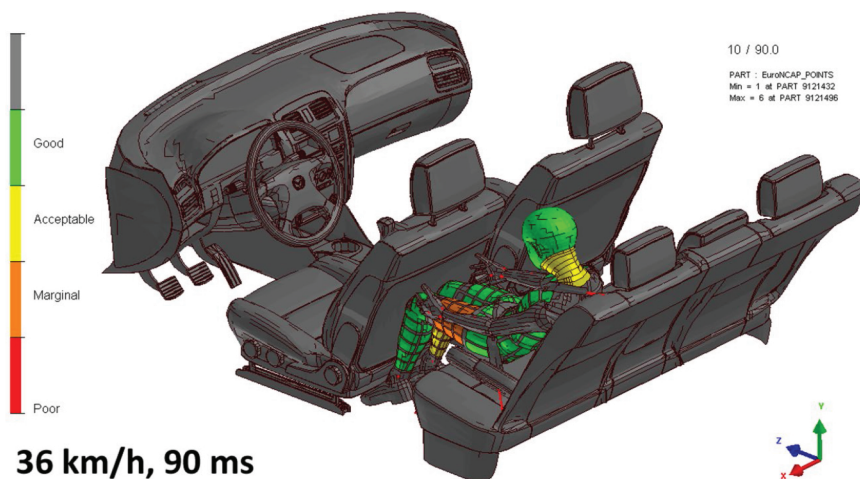
Na obr. 4 je znázorněna předpokládaná předstřetová poloha vozidla mazda, která vychází z analýz provedených v předchozích posudcích. Poloměr levotočivého oblouku, ve kterém se vozidlo mazda pohybovalo, byl dle obr. 3 odhadnut na úrovni 20 m. V této kapitole jsou prezentovány provedené počítačové simulace

v rozsahu střetových rychlostí 30 až 40 km/h, který se pro dané poškození vozidla jeví jako technicky přijatelný. Odstředivé zrychlení ($3.5\text{--}6.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) vozidla mazda při jízdě v oblouku o radiusu 20 m je patrně z tab. 2, stejně jako kinetická energie v okamžiku předpokládaného nárazu cca 50–90 kJ.

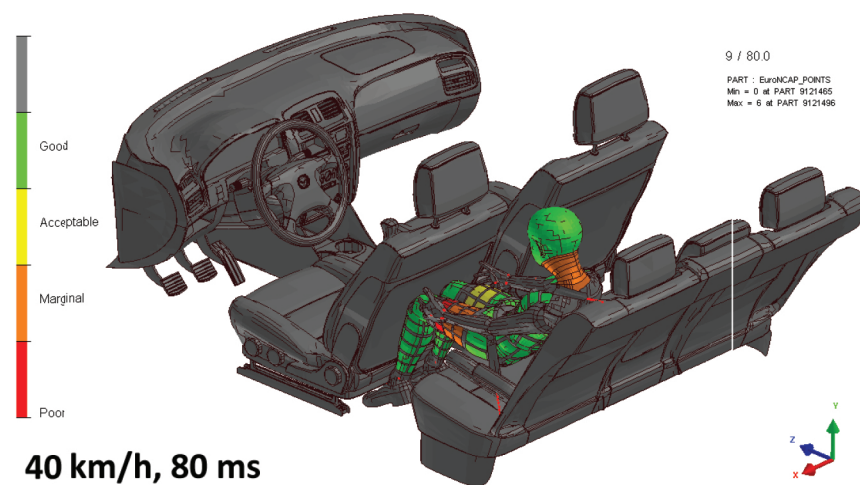
Je zřejmé, že vezmeme-li jako 100% kinetickou energii při střetové rychlosti 36 km/h (10 m/s), potom je kinetická energie při nárazové rychlosti 30 km/h přibližně o třetinu nižší a při rychlosti 40 km/h pak o přibližně o čtvrtinu vyšší, rovněž viz tab. 2. Vzhledem k faktu, že při šikmém nárazu vozidla pod úhlem cca 70° „zafungovaly“ zejména deformační zóny (absorbéry čelního nárazu) na levé straně vozidla, lze předpokládat, že levá přední část vozidla byla deformována až k prostoru motoru. Je proto zřejmé, že při střetové rychlosti 40 km/h by bylo třeba absorbovat téměř dvojnásobek energie oproti střetu při rychlosti 30 km/h. Rovněž zpomalení vozidla, setrvačné účinky a biomechanická zátěž osob cestujících ve vozidle by proto byly významně vyšší.



Obr. 18 Sekvence pohybu chlapce při střetové rychlosti 36 km/h, varianta 1A.
Fig. 18 Sequence of the boy movement at a collision speed of 36 kph, variant 1A.

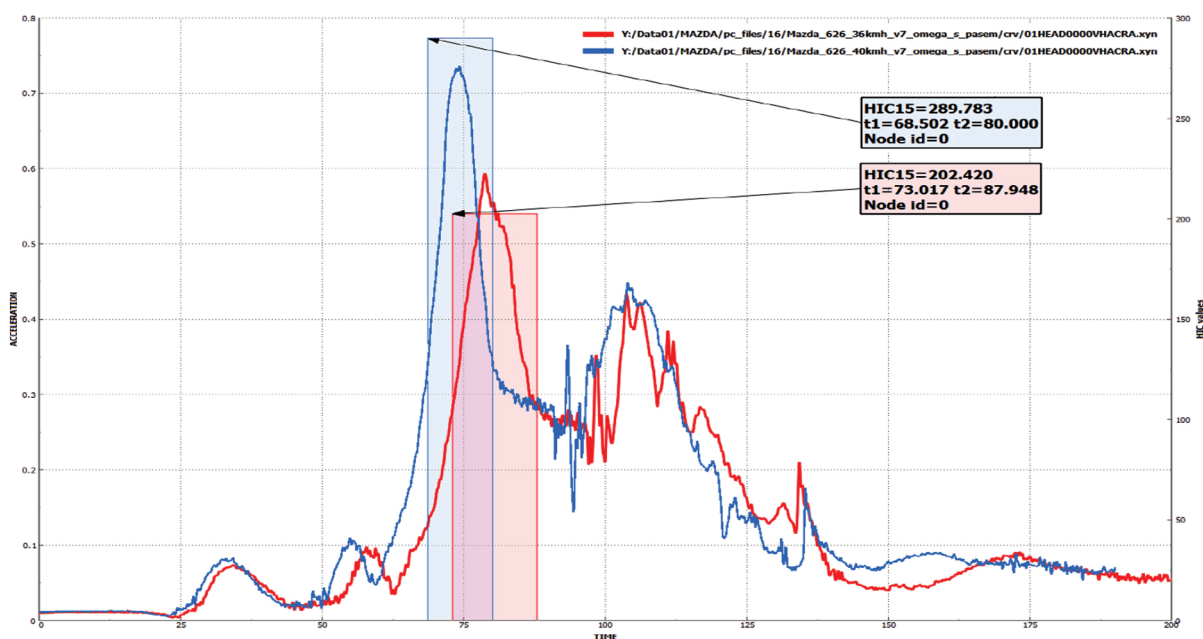


36 km/h, 90 ms



40 km/h, 80 ms

Obr. 19 Porovnání polohy připoutaného chlapce při rychlosti 36 km/h a 40 km/h, varianta 1A.
Fig. 19 Comparison of the position of the restrained boy at a speed of 36 and 40 kph, variant 1A.



Obr. 20 Porovnání zpomalení hlavy chlapce a HIC při 36 km/h a 40 km/h, varianta 1A a 1B.
Fig. 20 Comparison of boy's head deceleration and HIC at 36 and 40 kph, variant 1A, 1B.

Přestože znalci nebyly pro řešení této úlohy k dispozici detailní fotografie poškození čelní části vozidla mazda (zejména po odstrojení předního nárazníku a pohledu do otevřeného motorového prostoru), z fotodokumentace policie, viz obr. 1, je rozsah poškození vozidla mazda po střetu s betonovou zídou rozpoznatelný v technicky přiměřeném rozsahu. Vzájemným porovnáním obr. 1 a obr. 17 lze konstatovat dobrou shodu deformace přední části vozidla zejména pro vyšší rychlosti, tedy 35 až 40 km/h. Deformace při rychlosti 30 km/h se jeví jako významně nižšího rozsahu.

Tyto dílčí závěry znalce jsou rovněž v dobré shodě se závěry předchozích znalců.

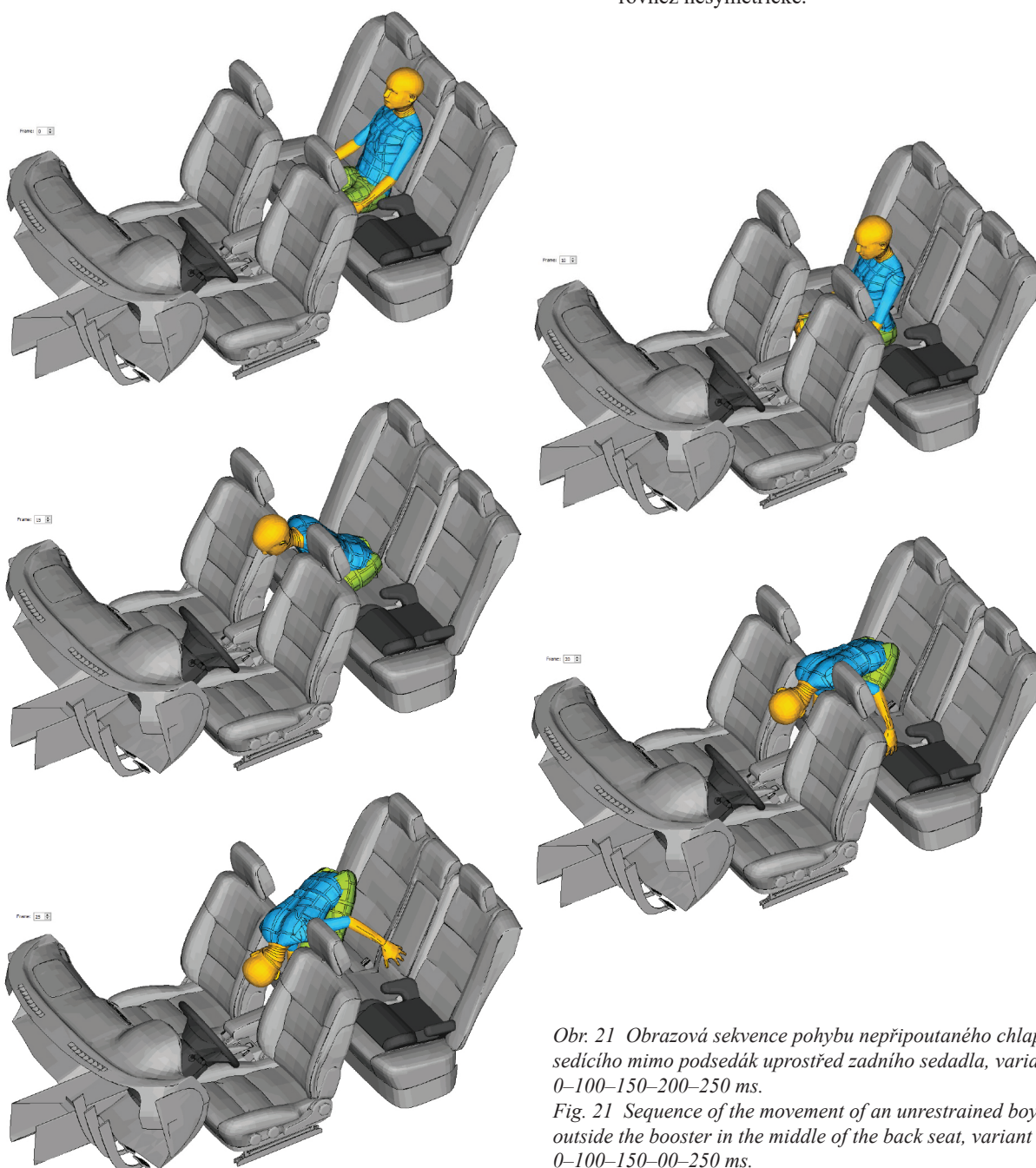
V dalším postupu budou nyní vyhodnoceny závěry všech dílčích analýz provedených s podporou počítačových simulací.

3.1 Varianta 1A – chlapec připoután na dětském podsedáku, střet v rychlosti 36 km/h

Na obr. 18 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce sedícího na dětském podsedáku značky Babideal řádně připoutaného třibodovým bezpečnostním pásem při nárazu vozidla mazda do betonové zídky ve výpočtově zvolené rychlosti 36 km/h. Jednotlivé snímky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 0 – 50 – 80 – 100 – 150 a 200 ms.

Vyobrazený pohyb těla chlapce není symetrický vzhledem k podélné rovině vozidla, a to z následujících 3 důvodů:

- kontakt vozidla s betonovou zídou je v čelním směru šikmý, tedy nesymetrický,
- kdy odstředivé zrychlení při jízdě v oblouku působí na tělo chlapce směrem doprava,
- čímž jsou zádržné účinky šikmé hrudní větve pásu jsou rovněž nesymetrické.



Obr. 21 Obrazová sekvence pohybu nepřipoutaného chlapce sedícího mimo podsedák uprostřed zadního sedadla, varianta 2, čas: 0–100–150–200–250 ms.

Fig. 21 Sequence of the movement of an unrestrained boy sitting outside the booster in the middle of the back seat, variant 2, time: 0–100–150–200–250 ms.

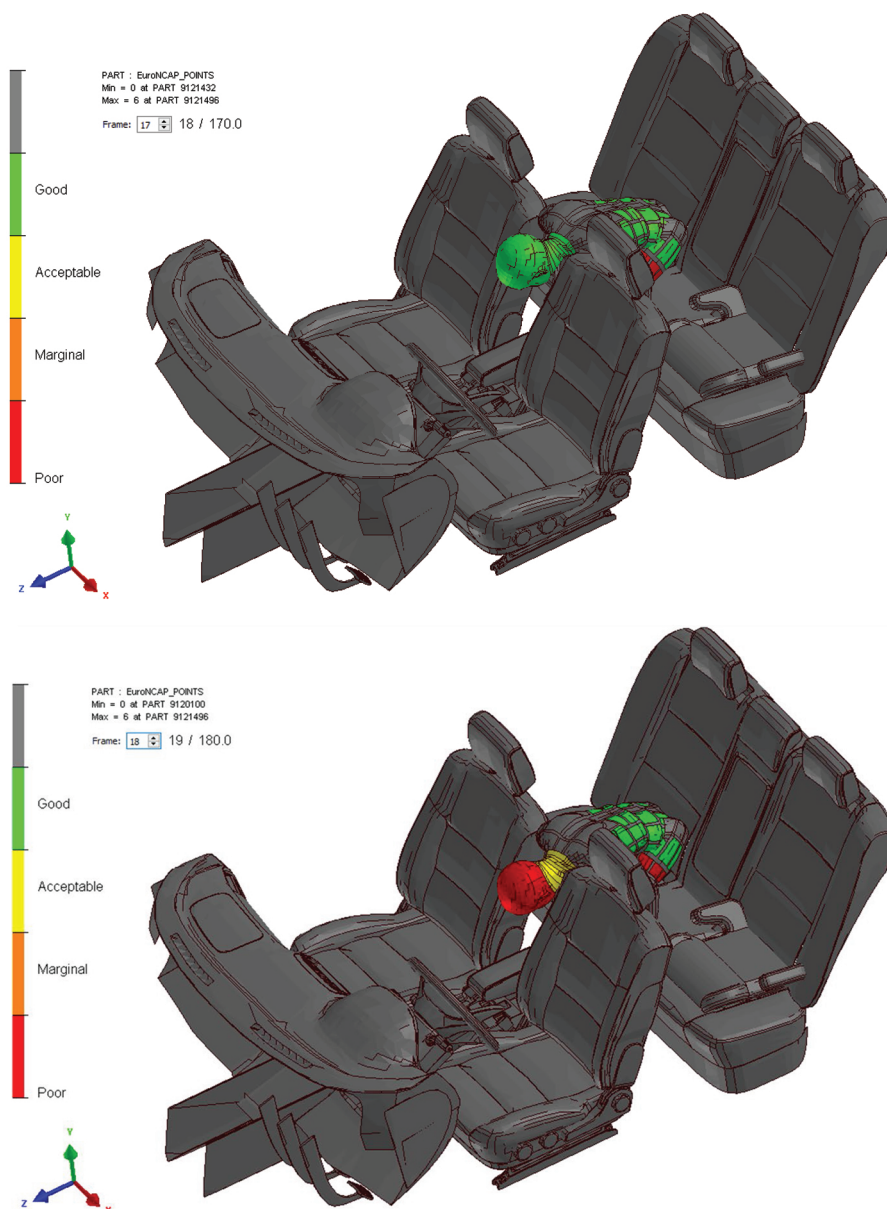
Z obrazové sekvence je tak patrné, že ve výpočtovém čase 50 ms od kontaktu s betonovou zídou uvádějí setrvačné účinky působící na tělo modelu chlapce uvádějí toto tělo do pohybu, a to v podstatě po tečné oblouku v okamžiku nárazu – ve výpočtovém čase cca 80 ms chlapec narazí holení pravé nohy (žlutá barva) do spodní části sedadla řidiče, kde šikmá větev pásu způsobuje zvýšený průhyb hrudní oblasti (žlutá barva), přičemž v tomto čase rovněž počíná zvýšená flexe krční oblasti (žlutá barva) – ve výpočtovém čase 100 ms narazí model chlapce levým kolenem do zadní části sedadla řidiče, což vede ke zvýšenému zatížení stehenní kosti (oranžová), přičemž flexe krku pokračuje. Bezpečnostní pásy zadržují tělo v dalším pohybu.

HIC dosahuje velmi přijatelné hodnoty $HIC_{15.0} = 202$ (hlava chlapce zelená), obr. 18.

3.2 Varianta 1B – chlapec řádně připoután na dětském podsedáku, střet v 40 km/h

V pravé části obr. 19 je znázorněna poloha modelu chlapce v čase 80 ms po prvním kontaktu vozidla mazda s betonovou zídou při výpočtově zvolené rychlosti 40 km/h. Model chlapce je usazen na dětském podsedáku značky Babideal, přičemž je řádně připoután tříbodovým bezpečnostním pásem.

Ve výpočtovém čase cca 70 ms narazí model chlapce holení pravé nohy (žlutá barva) do spodní části sedadla řidiče, přičemž šikmá větev pásu způsobuje zvýšený průhyb hrudní oblasti (žlutá až oranžová barva), v tomto čase rovněž počíná zvýšená flexe krční oblasti (oranžová barva). Dále model chlapce narazí chlapec levým kolenem do zadní části sedadla řidiče, což způsobuje zvýšené zatížení stehenní kosti (oranžová), flexe krku pokračuje. Bezpečnostní pásy zadržují tělo v dalším pohybu.



Obr. 22 Okamžik střetu hlavy chlapce s hranou sedadla řidiče v čase 170 a 180 ms, rychlost střetu 36 km/h, varianta 2.
Fig. 22 The moment the boy's head collides with the edge of the driver's seat at 170 and 180 ms, collision speed 36 km/h, variant 2.

HIC při výpočtově zvolené rychlosti 40 km/h dosahuje stále velmi přijatelné hodnoty $HIC_{15} = 290$ (hlava zelená), obr. 19.

Vzájemné porovnání průběhu zpomalení hlavy modelu chlapce (ze kterého je automaticky vypočítáváno HIC) v rychlostech 36 km/h a 40 km/h, tedy pro varianty 1A a 1B, je na obr. 20.

3.3 Varianta 2 – nepřipoutaný chlapec sedící uprostřed zadního sedadla mimo podsedák

Na obr. 21 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce při nárazu vozidla mazda do betonové zídky, a to ve výpočtově zvolené rychlosti 36 km/h. Model chlapce zde sedí v prostřední části zadního sedadla mimo dětský podsedák. Model chlapce zde není připoután bezpečnostním pásem.

Jednotlivé obrázky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 0 – 100 – 150 – 200 a 250 ms. Z obrazové sekvence na obr. 22 je patrné, že ve výpočtovém čase mezi 170 a 180 ms od okamžiku kontaktu vozidla mazda s betonovou zídkou dochází k nárazu hlavy modelu chlapce do hrany sedadla řidiče. HIC dosahuje orientační hodnoty $HIC_{15} = 1980$, kdy by patrně došlo k vážnému poranění hlavy. Dochází rovněž k nadměrné flexi krku a k zatížení stehenních kostí při kontaktu se zadní stranou předních sedadel vozidla.

3.4 Varianta 3A – nepřipoutaný chlapec sedící na dětském podsedáku v zadní části vozidla

Na obr. 23 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce při nárazu vozidla mazda do betonové zídky, a to ve výpočtově zvolené rychlosti 30 km/h. Jednotlivé snímky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 130 – 140 – 150 ms.

Model chlapce je usazen v zadní části vozidla na dětském podsedáku

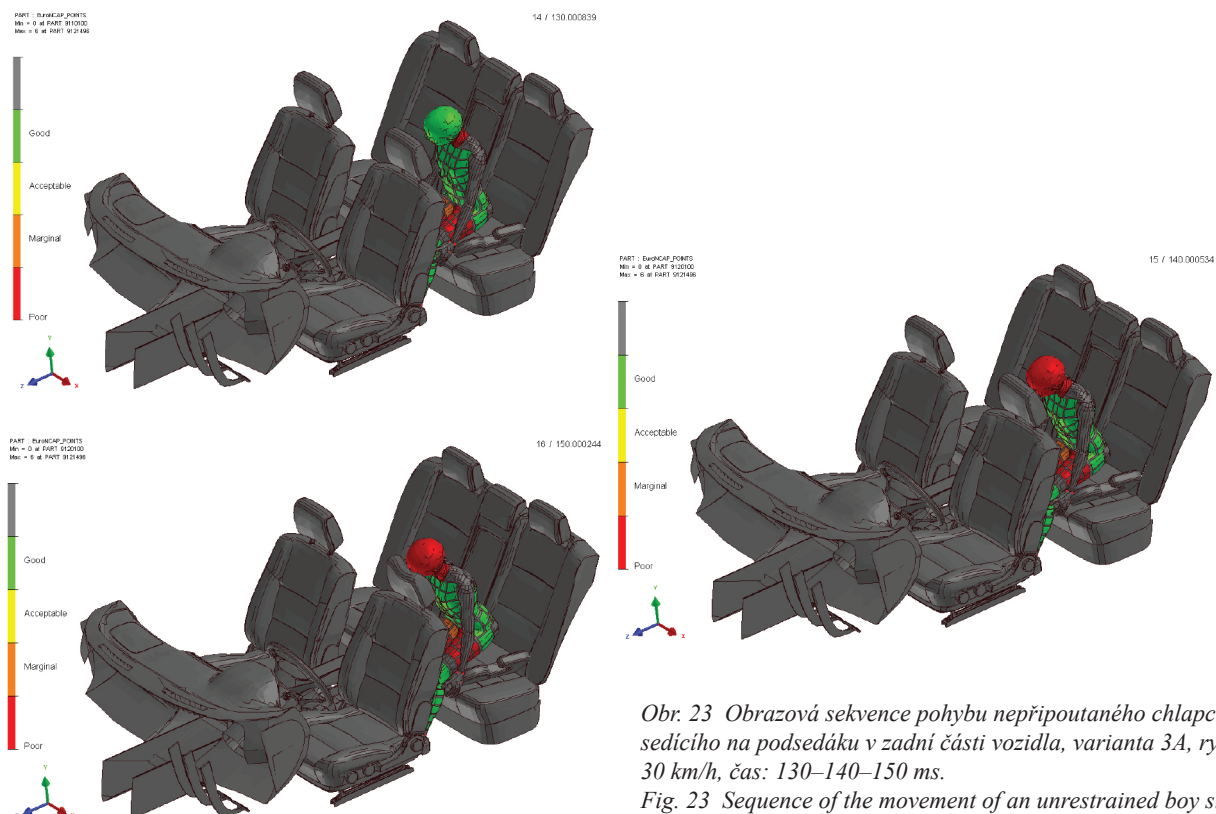
a není připoután tříbodovým bezpečnostním pásem. Chlapec obličejovou částí hlavy (oblast levého oka mezi nosem a levou tvář) naráží do deformovatelné opěrky hlavy řidiče. Tuhost opěrky není z nedostatku podkladových informací přesně validována. Je však nastavena tak, aby vyhověla mezinárodní legislativě.

3.5 Varianta 3A – nepřipoutaný chlapec na dětském podsedáku v zadní části vozidla

Na obr. 23 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce při nárazu vozidla mazda do betonové zídky ve výpočtově zvolené rychlosti 30 km/h. Jednotlivé snímky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 130 – 140 – 150 ms.

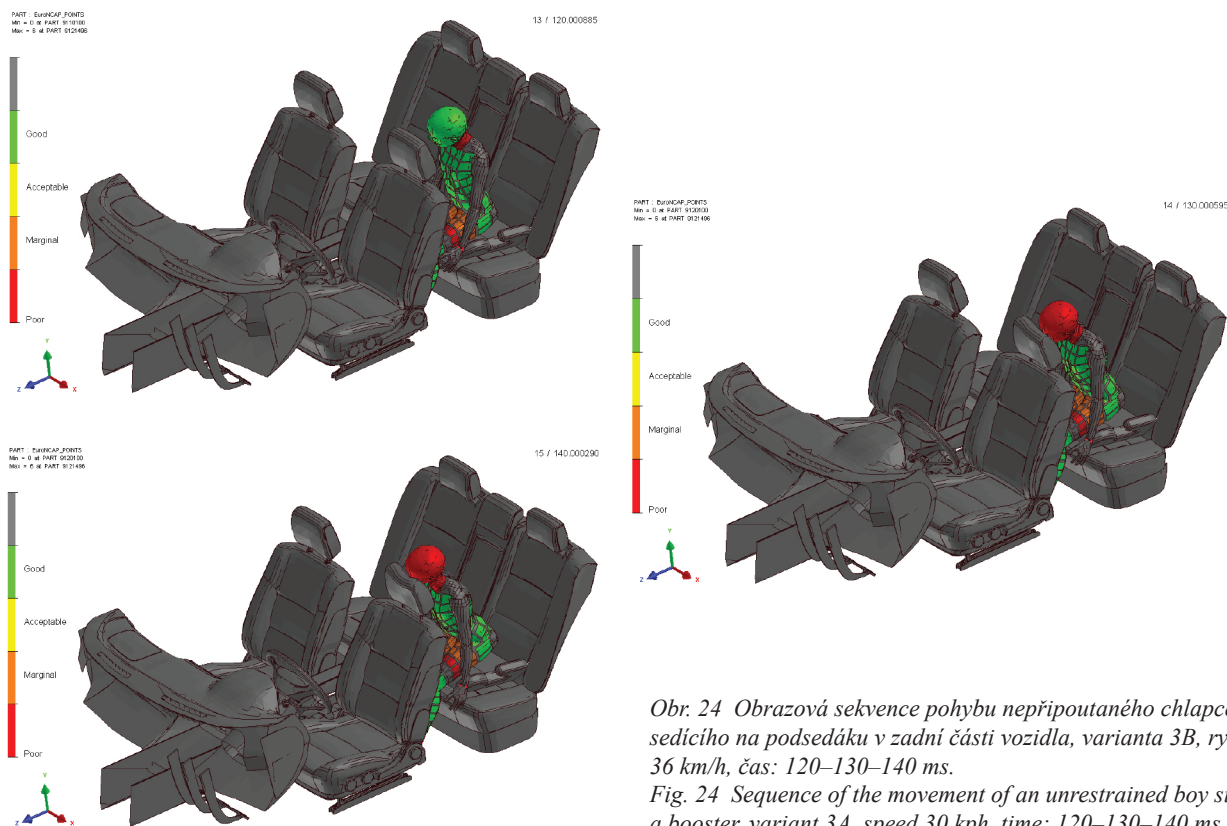
Model chlapce sedí v zadní části vozidla na dětském podsedáku a není připoután tříbodovým bezpečnostním pásem. Model chlapce naráží obličejovou částí hlavy (oblast levého oka mezi nosem a levou tvář) do deformovatelné opěrky hlavy řidiče. Tuhost opěrky není z nedostatku podkladových informací přesně validována. Je však nastavena tak, aby vyhověla mezinárodnímu předpisu EHK 17, kdy kulový impaktor o hmotnosti 6.8 kg (charakteristická hmotnost lidské hlavy) naráží do zadní části opěrky hlavy rychlostí 24.1 km/h (15 mph), přičemž je známo, že pro vyhovující výsledek kritéria HIC dosahuje zpomalení maximální hodnoty 30 až 40 g. ze získaných výpočtových dat je zřejmé, že při střetových rychlostech nad 24 km/h je kinetická energie a biomechanická zátěž hlavy významně vyšší, viz tab. 2.

Z obrazové sekvence na obr. 23 je patrné, že v čase mezi 130 a 140 ms, od okamžiku kontaktu vozidla mazda s betonovou zídkou, dochází k nárazu hlavy chlapce do zadní části opěrky hlavy řidiče. HIC dosahuje orientační hodnoty $HIC = 1172$, kdy by patrně došlo ke zranění hlavy.

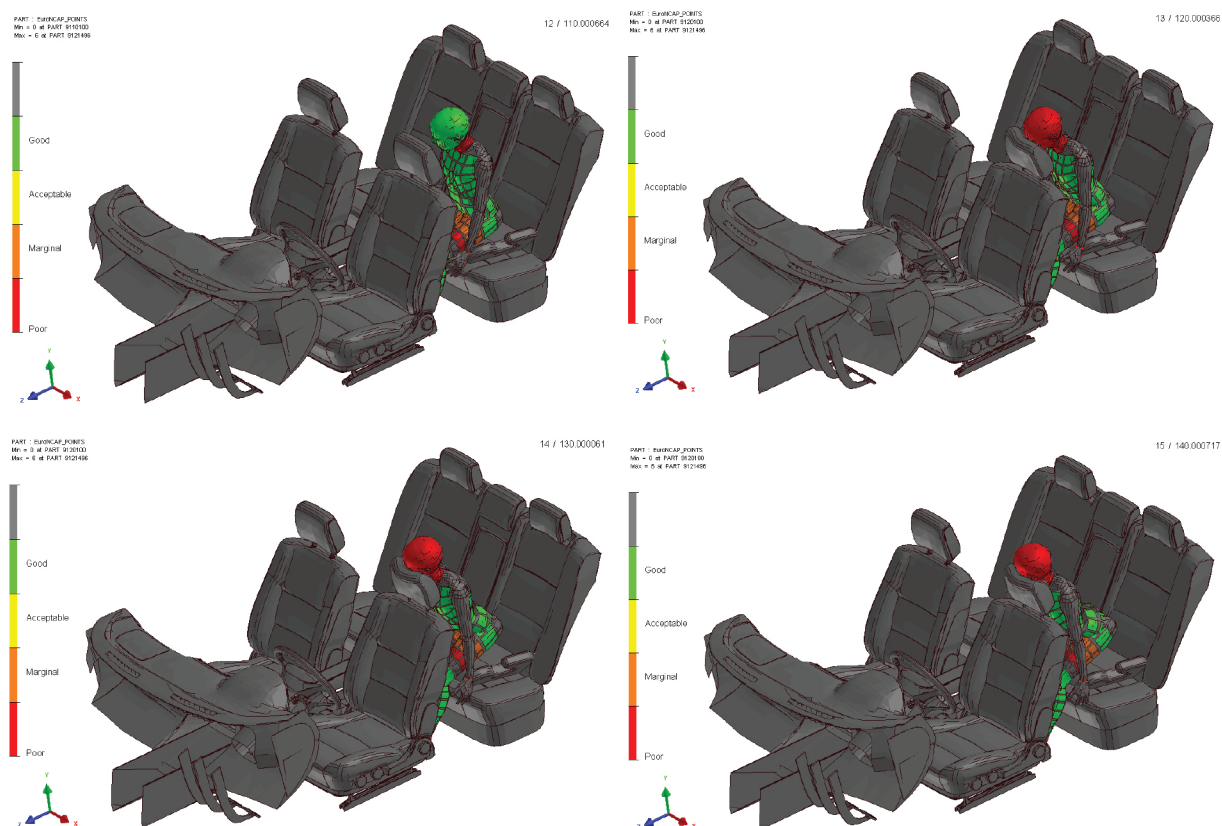


Obr. 23 Obrazová sekvence pohybu nepřipoutaného chlapce sedícího na podsedáku v zadní části vozidla, varianta 3A, rychlost 30 km/h, čas: 130–140–150 ms.

Fig. 23 Sequence of the movement of an unrestrained boy sitting on a booster; variant 3A, speed 30 kph, time: 130–140–150 ms.



Obr. 24 Obrazová sekvence pohybu nepřípoutaného chlapce sedícího na podsedáku v zadní části vozidla, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas: 120–130–140 ms.
Fig. 24 Sequence of the movement of an unrestrained boy sitting on a booster, variant 3A, speed 30 kph, time: 120–130–140 ms.



Obr. 25 Obrazová sekvence pohybu nepřípoutaného chlapce sedícího na podsedáku v zadní části vozidla, varianta 3C, rychlost 40 km/h, čas: 110–120–130–140 ms.
Fig. 25 Sequence of the movement of an unrestrained boy sitting on a booster, variant 3C, speed 30 kph, time: 110–120–130–140 ms.

3.6 Varianta 3B – nepřipoutaný chlapec na dětském podsedáku v zadní části vozidla

Na obr. 24 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce při nárazu vozidla mazda do betonové zídky, a to ve výpočtově zvolené rychlosti 36 km/h. Jednotlivé snímky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 120 – 130 – 140 ms.

Model chlapce je zde usazen v zadní části vozidla na dětském podsedáku a není připoután tříbodovým bezpečnostním pásem. Model chlapce narazí obličejovou částí hlavy (oblast levého oka mezi nosem a levou tváří) do deformovatelné opěrky hlavy řidiče.

Z obrazové sekvence na obr. 24 je patrné, že ve výpočtovém čase mezi 120 a 130 ms, od okamžiku kontaktu vozidla mazda s betonovou zídkou, dochází k nárazu hlavy modelu chlapce do zadní části opěrky hlavy řidiče. HIC dosahuje orientační hodnoty $HIC = 2457$, kdy by ze statistického pohledu patrně došlo k vážnému poranění hlavy.

3.7 Varianta 3C – nepřipoutaný chlapec na dětském podsedáku v zadní části vozidla

Na obr. 25 je znázorněna obrazová sekvence pohybu modelu chlapce při nárazu vozidla mazda do betonové zídky při výpočtově zvolené rychlosti 40 km/h. Jednotlivé snímky sekvence jsou sejmuty z výsledků simulace v časech 110 – 120 – 130 a 140 ms.

Model chlapce je polohován do zadní části vozidla, kde je usazen na dětském podsedáku a není připoután tříbodovým bezpečnostním

pásem. Model chlapce obličejovou částí hlavy (oblast levého oka mezi nosem a levou tváří) narazí do deformovatelné opěrky hlavy řidiče.

Z obrazové sekvence na obr. 25 je patrné, že ve výpočtovém čase mezi 110 a 120 ms, od okamžiku kontaktu vozidla mazda s betonovou zídkou, dochází k nárazu levé strany obličejové části hlavy modelu chlapce do zadní části opěrky hlavy řidiče. HIC dosahuje orientační hodnoty $HIC = 9609$ – tato hodnota HIC ukazuje ze statistického pohledu na zranění hlavy prakticky neslučitelné se životem pasažéra (masivní destrukce lebky a mozku – z výzkumných prací světových autorů lze dohledat jako limitní hodnotu pro přežití $HIC = 3000$).

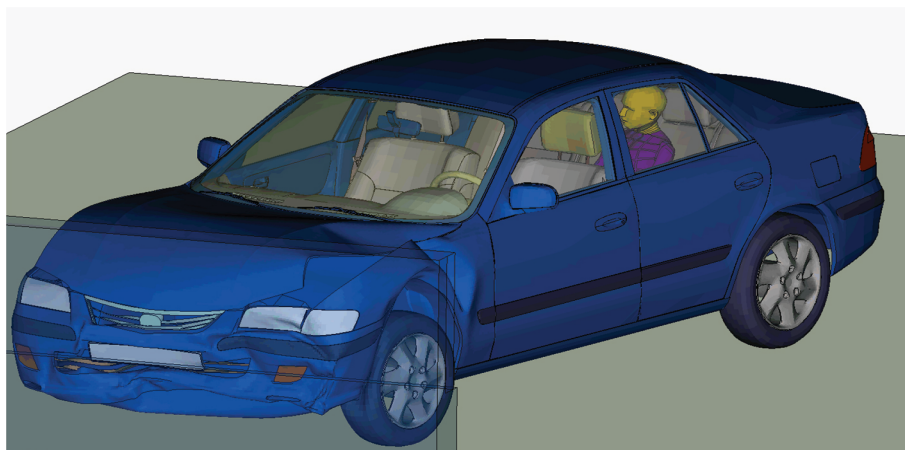
4. ZÁVĚR

Dle zadání byly provedeny virtuální analýzy (počítačové simulace) tří základních variant:

- VAR 1 – chlapec sedí na dětském podsedáku a je řádně připoután tříbodovým pásem,
- VAR 2 – chlapec sedí mimo podsedák uprostřed zadního sedadla a není řádně připoután,
- VAR 3 – chlapec sedí na dětském podsedáku a není řádně připoután.

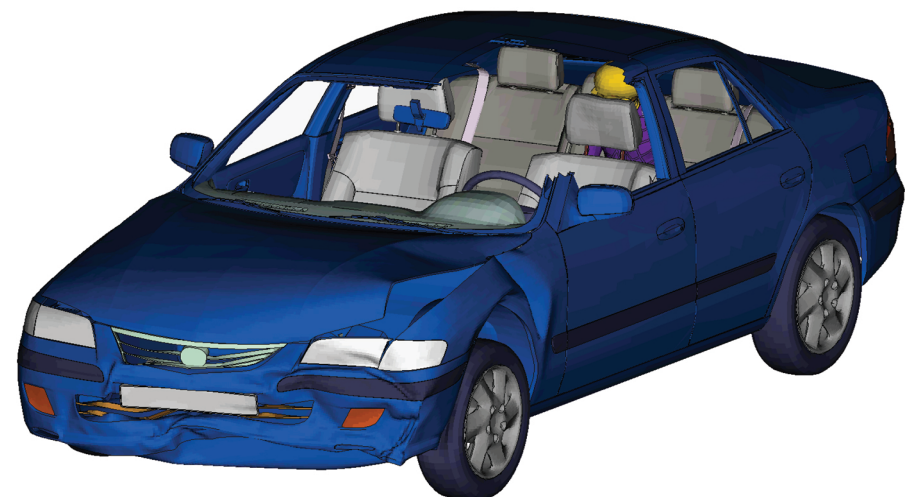
Obr. 26 Počátek setrvačného pohybu trupu a hlavy nepřipoutaného chlapce sedícího na podsedáku v zadní části vozidla, varianta 3B, rychlost 36 km/h, celkový pohled zepředu.

Fig. 26 Beginning of inertial movement of the torso and head of an unrestrained boy sitting on a booster in the rear of the vehicle, variant 3B, speed 36 kph.



Obr. 27 Kontakt hlavy chlapce a hlavovou opěrkou řidiče, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas cca 140 ms, celkový pohled zepředu.

Fig. 27 Contact between the boy's head and the driver's headrest, variant 3B, speed 36 kph, time approx. 140 ms.



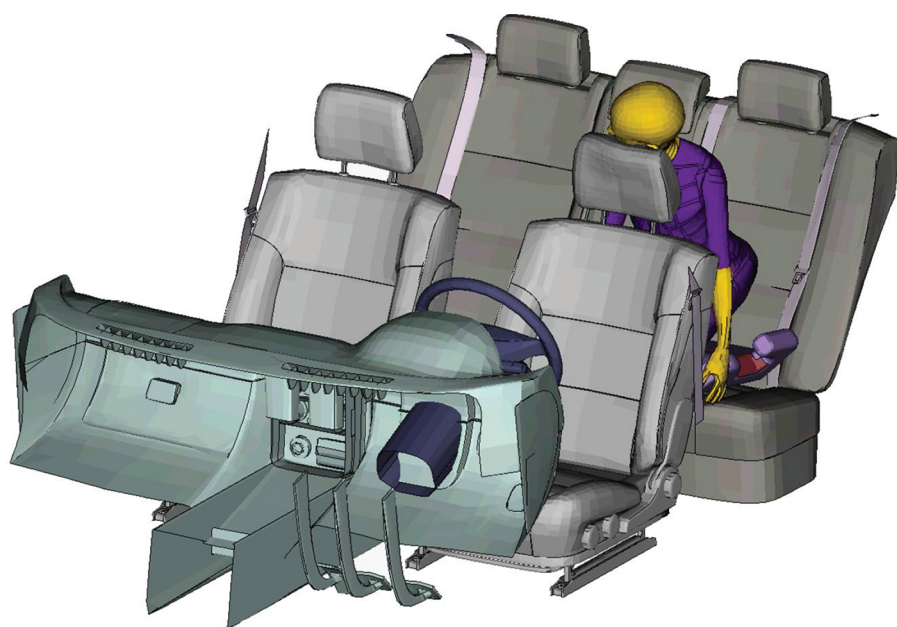
Některé z variant byly výpočtově modelovány při více zvolených nárazových rychlostech z rozsahu 30 až 40 km/h. Varianta 1 tak byla modelována při dvou rychlostech 36 a 40 km/h jako 1A a 1B, varianta 3 pak ve třech rychlostech – 30, 36 a 40 km/h jako 3A, 3B a 3C. V průběhu impaktního děje byla sledována jednak trajektorie pohybu těla a hlavy modelu chlapce a zároveň, přičemž bylo zároveň vyhodnoceno i kritérium poranění hlavy HIC (head injury criterium). Publikace světově uznávaných autorů o biomechanice hlavy osob cestujících ve vozidlech udávají statistickou pravděpodobnost závažnosti zranění hlavy na základě tohoto kritéria HIC. Zároveň shodně konstatují, že nad úrovní $HIC = 3000$ dochází prakticky ve všech případech ke zraněním neslučitelným se životem.

Výpočtově zvolená rychlost 30 km/h byla již dříve vyloučena jako příliš nízká, „neregnerující“ potřebných rozsah deformací přední části vozidla mazda. Přesto byla na doplnění výsledků a z důvodu umožnění lepší představy řešena i varianta 3A při výpočtově zvolené rychlosti 30 km/h.

Na základě výsledků provedených simulací lze vyvodit následující závěry:

U chlapce sedícího na dětském podsedáku řádně připoutaného bezpečnostním pásem, **varianta 1**, lze konstatovat, že v průběhu pohybu jeho těla vyvolaného šikmým čelním nárazem vozidla do tuhé betonové zídky začnou správně fungovat bezpečnostní pásy, které zadrží pohyb trupu chlapce, na rozdíl od hlavy, která má tendenci pokračovat v pohybu, přičemž dochází k nadměrné flexi (ohýbání) krku. Zatímco hlava tak zůstává po celou dobu děje dle stupnice v barvě zelené ($HIC = 202$ při rychlosti 36 km/h, $HIC = 290$ při rychlosti 40 km/h), tedy bez zranění, nelze vyloučit lehké zranění krku, resp. krční páteře či vazů.

Varianta 2, náraz při rychlosti 36 km/h, kdy chlapec sedí na zadním sedadle mimo podsedák přibližně ve středové pozici mezi předními sedadly a není připoután – chlapec tak má dobrý výhled před vozidlo. Náraz by vrhl tělo chlapce vpřed s proniknutím hlavy mezerou mezi předními sedadly s pravděpodobným nárazem



Obr. 28 Kontakt hlavy chlapce a hlavovou opěrkou řidiče, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas cca 140 ms, pohled do interiéru zepředu.
Fig. 28 Contact of the boy's head and the driver's headrest, variant 3B, speed 36 kph, time approx. 140 ms.



Obr. 29 Kontakt hlavy chlapce a hlavovou opěrkou řidiče, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas cca 120 ms, boční pohled.
Fig. 29 Contact of the boy's head and the driver's headrest, variant 3B, speed 36 kph, time approx. 120 ms.



Obr. 30 Průběh kontaktu hlavy chlapce s hlavovou opěrkou řidiče, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas 120–130–140 ms, detail.
Fig. 30 Course of contact of the boy's head with the driver's headrest, variant 3B, speed 36 kph, time 120–130–140 ms.

levé strany obličeje na boční hranu sedadla řidiče, a to v čase mezi 170 a 180 ms od počátečního kontaktu přídě vozidla s betonovou zídou. HIC zde dosahuje dvojnásobku limitní hodnoty, dle grafu na **obr. 9** lze očekávat velmi vážné poranění hlavy s cca 20% pravděpodobností fatálního následku.

U **varianty 3** (chlapec sedící nepřipoutaný na dětském podsedáku), kde byly řešeny 3 nárazové rychlosti (30, 36 a 40 km/h) by ve všech případech byla hlava chlapce vržena proti hlavové opěrce řidiče a to s narůstající intenzitou. HIC by ve všech třech případech dosahovalo objektivně nadlimitních hodnot (HIC > 1000), viz kap. 2.3 – konkrétně HIC = 1170 při rychlosti 30 km/h, HIC = 2460 při rychlosti 36 km/h a HIC = 9600 při



Obr. 31 Závěrečná fáze kontaktu hlavy chlapce s hlavovou opěrkou řidiče, varianta 3B, rychlost 36 km/h, čas cca 150 ms, detail.
Fig. 31 The final phase of contact of the boy's head with the driver's headrest, variant 3B, speed 36 kph, time approx. 150 ms, detail.

rychlosti 40 km/h. Vzhledem k faktu, že u varianty 3C leží HIC vysoko nad hodnotou 3000, a chlapec nehodu přežil, lze rychlost 40 km/h hodnotit jako již nepřiměřeně vysokou.

Podrobné srovnání výsledků získaných u všech provedených analýz je v tab.6

Vzhledem k trajektorii hlavy chlapce a kontaktu hlavy se zadní stranou hlavové opěrky řidiče, viz např. obrazová sekvence na obr. 30, by s využitím obou v článku uvedených hypotéz bylo možno velmi dobře objasnit mechanismus zranění chlapce (zlomenina mediální stěny očníce, obr. 6) z pohledu znalce z oboru zdravotnictví.

Tab. 6 Přehled dosažených výsledků.
Tab. Overview of achieved results.

Varianta	Rychlost střetu (km/h)	HIC	Výsledek
VAR 1A	36	202	vyhovující
VAR 1B	40	290	vyhovující
VAR 2	36	1980	velmi vážné zranění
VAR 3A	30	1173	vážné zranění
VAR 3B	36	2457	velmi vážné zranění
VAR 3C	40	9609	neslučitelné se životem

Na základě provedené analýzy se jako nejpravděpodobnější jeví náraz vozidla do betonové zídky při rychlosti 36 km/h (varianta 3C), kdy chlapec sedí nepřipoutaný na dětském podsedáku.

Je třeba rovněž zmínit, že dle pravidelných průzkumů populace činila v roce 2011 průměrná hmotnost 10letých chlapců v Čechách a na Slovensku 39 kg. Použitý podsedák zn. Babideal čínského výrobce je vhodný pro použití do hmotnosti 36 kg. Chlapec by tak správně měl použít podsedák konstruovaný pro vyšší zatížení než udávaných 15–36 kg (obr. 8). Tato informace však nemá žádný vliv na již provedené závěry.

Správná citace:

PAVLATA, P. Počítačová simulace zranění chlapce na zadním sedadle osobního vozidla. *Soudní inženýrství*, 2023, 34(1), 8–24.
DOI: <http://dx.doi.org/10.13164/SI.2023.1.8>. ISSN 1211-443X.