

SODOBEN PRISTOP K RAZISKAVI PROMETNIH NEZGOD A MODERN APPROACH TO TRAFFIC ACCIDENT RESEARCH

Miha Ambrož¹, Simon Krašna¹, Ivan Prebil¹, Marija Hribernik²

Prispelo: 30. 1. 2000 – Sprejeto: 15. 3. 2004

Pregledni znanstveni članek
UDK 656.11:614.86:616-001

Izvleček

Prispevek podaja pregled sodobnih orodij za analizo prometnih nezgod s poudarkom na analizi poškodb ljudi kot udeležencev v prometu. Predstavljena so poškodbeni merila kot teoretična osnova za vrednotenje poškodb ter računalniški programi za simulacijo nezgod. V nadaljevanju sta opisana mehanski model človeškega telesa za simulacijo obremenitev pri trku ter preizkuševališče za eksperimentalno preverjanje rezultatov, ki sta rezultat lastnega razvoja. Prikazane so možnosti pridobivanja podatkov o masnih in vztrajnostnih lastnostih segmentov človeškega telesa, ki so potrebni za analizo obremenitev. Kot zgled so predstavljeni in komentirani rezultati vrste trčnih poskusov pri različnih hitrostih in analiza vpliva mase glave preizkusne osebe na obremenitev glave pri trku.

Ključne besede: biomehanika, poškodbeni merila računalniška simulacija, eksperimentalne metode

Review article
UDC 656.11:614.86:616-001

Abstract

The article gives an overview of modern tools used in traffic accident analysis with emphasis on the analysis of road trauma. Injury criteria that constitute a theoretical background for injury analysis are presented, along with some software tools employed for accident simulation. In addition, the paper presents a mechanical model of human body used in simulations and a sled device for experimental verification of the results, which are both products of own development. Options for obtaining the geometrical and inertial properties of human body segments needed for load analysis are described. The article presents and comments the results of a series of crash tests performed at different velocities, and analyses the influence of the test subject's head mass on the head load sustained during the crash.

Keywords: biomechanics, injury criteria, computer simulation, design of experiment

1. Uvod

Vprašanja, na katera mora odgovoriti izvedenec pri raziskavah prometnih nezgod, postajajo zaradi različnih dejavnikov vedno kompleksnejša, pot do odgovorov nanje pa vedno daljša in bolj razvejana. Zaradi napredka aktivnih in pasivnih varnostnih sistemov v vozilih se je spremenila narava poškodb potnikov v prometnih nezgodah. Takšnih poškodb s klasičnimi metodami (1, 29) ni več mogoče ustrezno raziskati in ovrednotiti, zato se vse bolj uveljavljajo

orodja za računalniške simulacije (3, 4) različnih vidikov prometnih nezgod. Z uporabo teh orodij so raziskave prometnih nezgod postale interdisciplinarna znanost, ki zahteva znanje tako s področja tehnike kot s področja medicine in združuje strokovnjake z obeh področij.

Namen prispevka je prikazati prednosti, ki jih ima sodoben način raziskave prometnih nezgod, predstaviti lasten razvoj strojne in programske opreme za raziskavo prometnih nezgod ter možnosti za njeno uporabo in nadaljnji razvoj.

¹ Fakulteta za strojništvo, Center za modeliranje elementov in konstrukcij, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana
Kontaktni naslov: e-pošta: miha.ambroz@fs.uni-lj.si

² Medicinska fakulteta, Inštitut za anatomijo, Korytkova 2, 1000 Ljubljana

2. Poškodbeni merila

Teža poškodb potnikov zaradi posledic prometne nezgode ni nujno odvisna samo od intenzivnosti trka oziroma od njegovih mehanskih parametrov (energije, sunka sile, pojemka in deformacijskega dela). Obremenitve potnikov in s tem njihove poškodbe so v veliki meri odvisne tudi od njihovega relativnega gibanja glede na vozilo. Tako lahko na primer pri trku z veliko hitrostjo, kjer pride do hudih poškodb na vozilu, le-to prevzame večino energije trka in ostanejo potniki nepoškodovani, po drugi strani pa ima lahko trk pri majhni hitrosti, ki niti ne povzroči vidnih poškodb na vozilu, za posledico gibanje glave potnika, ki povzroči poškodbe vratne hrbtenice. Enako pomembna kot velikost sile, ki deluje na potnika pri trku, je tudi njena smer. Tako na primer zaradi obremenitve pri bočnem trku nastopijo prelomi reber na eni strani telesa, pri enaki obremenitvi pri čelnem trku pa pride do prelomov reber na obeh straneh, kar je lahko po določenih klasifikacijah za dva razreda hujša telesna poškodba (5). Zadovoljivo opredelitev povezave med obremenitvijo pri trku, njegovo mehaniko in spremembo energije na eni ter poškodbami potnikov na drugi strani je težko zapisati. Uveljavljeni sta dve vrsti klasifikacij. Pri prvih je poudarek na tehničnih vidikih (mehaniki poškodbe, velikosti obremenitev in energijskih razmerah), pri drugih pa na kliničnih in travmatoloških vidikih ter na ozdravljivosti poškodb.

2. 1. Tehnična merila

Tehnični merila poskušajo razvrstiti poškodbe, ki pri prometni nezgodi nastanejo na vozilu in ovrednotiti njihove posledice. Nekatera izmed njih so:

- **VDI - Vehicle Deformation Index** podaja stopnjo deformacije vozila - po vzdolžni osi do 200% in po prečni osi do 100%.
- **VIDI - Vehicle Interior Deformation Index** podaja stopnjo deformacije notranjosti vozila. Pri tem je notranjost potniške celice razdeljena po dolžini in širini na 10 enakih delov.
- **ETS - Equivalent Test Speed** podaja ekvivalentno hitrost, ki bi povzročila enake poškodbe na vozilu pri trčnem preizkusu (crash-testu).
- **EBS - Equivalent Barrier Speed** podaja ekvivalentno hitrost, ki bi povzročila enake poškodbe na vozilu pri trku v togo oviro.
- **EES - Energy Equivalent Speed** podaja ekvivalentno hitrost, ki bi povzročila enake poškodbe na vozilih pri enakih pogojih,

- **EIS - Equivalent Injury Speed** podaja ekvivalentno hitrost, ki bi povzročila enake poškodbe potnikov. Uporablja se pri poskusih z lutkami za ocenjevanje teže poškodb.

2. 2. Medicinska merila

Medicinski kriteriji poskušajo razvrstiti poškodbe, ki jih pri prometni nezgodi utрпи človeško telo in ovrednotiti njihove posledice. V nadaljevanju so opisana nekatera izmed njih.

2. 2. 1. SI - Severity Index (indeks teže poškodb)

Je številka vrednost, ki upošteva časovni potek pojemka $a(t)$ med trkom:

$$SI = \int_0^{\tau} a^{2,5}(t) dt \quad (1)$$

Teža poškodbe je odvisna tako od amplitude pojemka, kot tudi od njegovega trajanja in je tem večja, čim daljši je čas trajanja (

novjši rezultati/newer results

področje preživetje/survival area

področje smrtnih poškodb/death injuries area

Slika 1). Pri tem velja, da pri čelnem trku nastopijo trajne poškodbe možganov, ko SI preseže vrednost 1000.

2. 2. 2. HIC - Head Injury Criterion (merilo poškodbe glave)

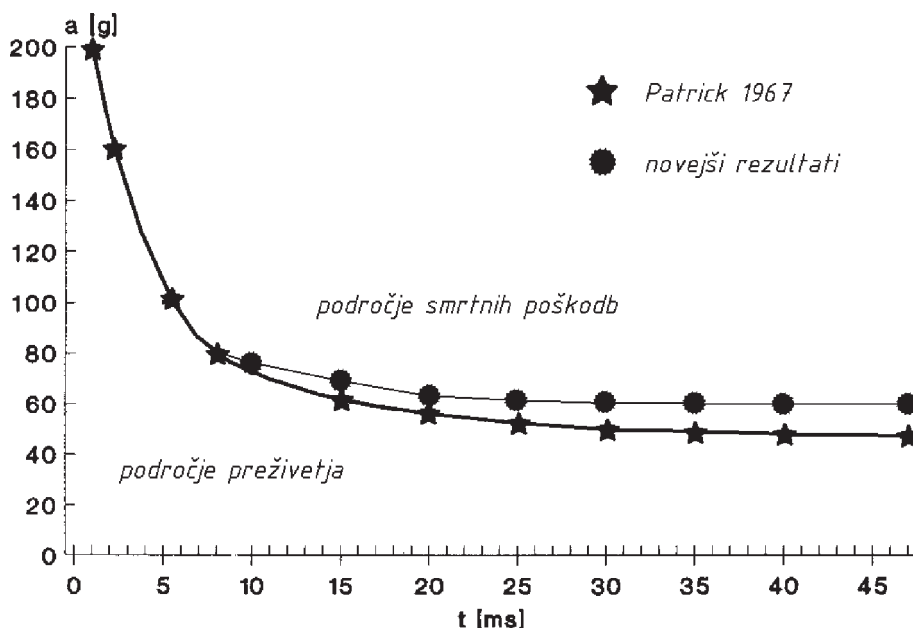
Za razliko od SI s tem merilom ne upoštevamo celotnega časovnega intervala, v katerem deluje pojemek, ampak opazujemo, ali (in kdaj) le-ta na določenem časovnem intervalu preseže zgornjo mejno vrednost:

$$HIC = \max \left[\left(\frac{1}{t_{21}^{-}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res}(t) \cdot dt \right)^{2,5} \cdot (t_{21} - t) \right] \quad (2)$$

Orientacijski mejni vrednosti pospeška glave sta 80 g v trajanju 3 ms ali 60 g v trajanju 10 ms (6).

2. 2. 3. AIS - Abbreviated Injury Scale (skrajšana poškodbeni lestvica)

Klasifikacijo AIS v obliki lestvice, ki razvršča celotne poškodbe določenega področja telesa oziroma stopnje teže posamezne poškodbe (Tabela 1), je predlagalo združenje AAAM (American Association for Automotive Medicine).



Slika 1. Odvisnost poškodb od amplitude in trajanja pojemka
 Figure 1. Relationship between injuries, and amplitude and duration of deceleration

Tabela 1. Lestvica poškodb po AIS
 Table 1. Injury scale by AIS

AIS	Vrsta poškodb
0	brez
I	meja poškodbe (površinske rane, udarnine, bolečine v mišicah)
II	zmerne do srednje težke (globoke rane v mehkem tkivu, pretres možganov z izgubo zavesti do 15 min, nekomplcirani zlomi dolgih kosti, nekomplcirani zlomi reber)
III	težke vendar ne življenjsko nevarne poškodbe, ki pri medicinski oskrbi omogočajo preživetje (premaknjeni zlomi lobanje brez poškodb možganov, premiki vretenc brez poškodb hrbtenjače, večkratni zlomi reber brez zapletov pri dihanju)
IV	težke poškodbe, ki so lahko življenjsko nevarne, vendar jih je večinoma mogoče preživeti (pretres možganov z zlomom lobanje ali brez z izgubo zavesti do 24 ur, nestabilen prsni koš z zapleti pri dihanju, raztrganine mehurja, jeter, vranice in črevesja, premiki posameznih segmentov hrbtenice)
V	kritične, življenjsko nevarne poškodbe z vprašljivo možnostjo preživetja, preživetje brez zdravniške pomoči ni možno (raztrganine srca in črevesja, izguba zavesti nad 24 ur)
VI	najtežje poškodbe brez možnosti preživetja (zlomi vratne hrbtenice nad tretjim vratnim vretencem s poškodbami hrbtenjače, najtežje odprte poškodbe trebušne votline)

Iz merila AIS sta izpeljani še dve poškodbeni merili:

- **OAIS** - Overall-AIS, ki z uporabo AIS lestvice oceni skupno težo poškodb celotnega telesa (politravma).
- **MAIS** - Maximal-AIS, ustreza AIS vrednosti najtežje posamezne poškodbe na telesu.

3. Mehanski modeli človeškega telesa

loveško telo lahko obravnavamo kot sistem togih in elastičnih teles, ki so medsebojno povezana z vezmi, pri čemer matematični model sistema teles temelji na osnovnih zakonih mehanike. Model človeškega telesa omogoča analizo dinamičnega odziva pri simulaciji različnih obremenitev in primerjavo z izmerjenimi podatki. Na osnovi dinamične analize je možno izračunati ter napovedati mehanske obremenitve v različnih kritičnih situacijah ter tako predvideti možnost nastanka poškodb ljudi. Matematični model potnika v vozilu omogoča analizo vpliva parametrov človeškega telesa na pospeške, ki na telo delujejo ob trku, ter posledično na nastanek poškodb.

3. 1. Programska orodja za analizo obremenitev človeškega telesa

Različni programski paketi, kot so npr. ADAMS, MADYMO, ATB-GEBOD, PAM-SAFE, omogočajo analizo obremenitev človeškega telesa v trirazsežnem prostoru.

S pomočjo takšnega programskega paketa lahko rekonstruiramo gibanje posameznih delov človeškega telesa med prometno nezgodo. Na osnovi kinematične in kinetične analize telesa lahko ugotavljamo, kakšne

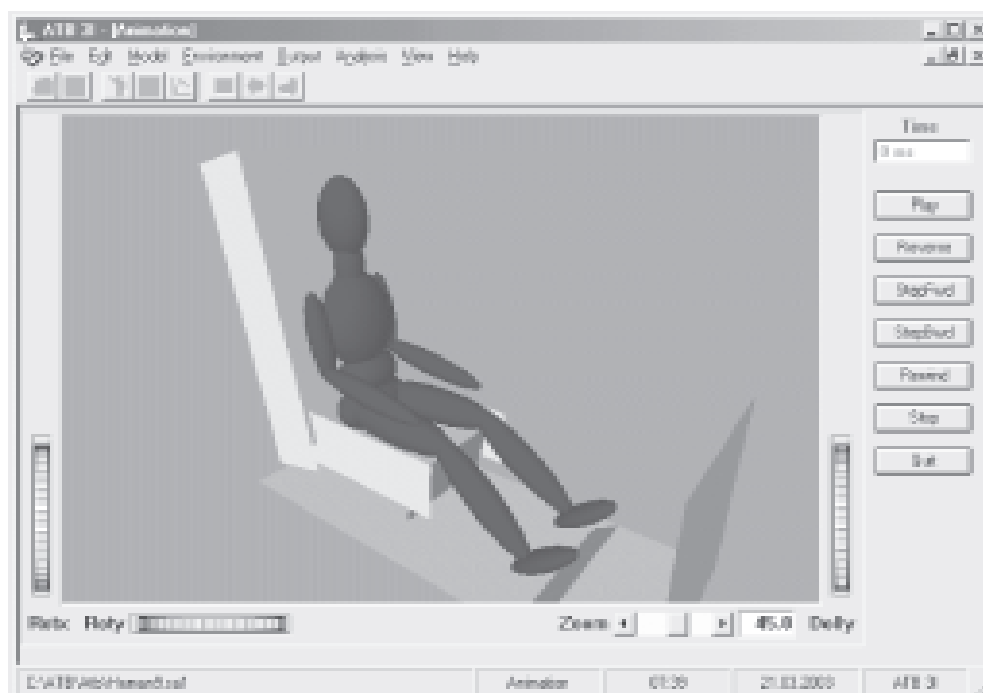
so mehanske obremenitve posameznih delov človeškega telesa, s čimer lahko ugotavljamo in napovedujemo možnosti različnih poškodb pri udeležencih prometnih nezgod z upoštevanjem ustreznih poškodbenih meril.

Našteta komercialna programska orodja ne zagotavljajo vedno zadovoljivih rezultatov (bodisi zaradi vhodnih podatkov ali zaradi neustreznih poenostavitev pri matematičnih ali geometrijskih modelov), zato je potreben tudi lastni razvoj programske in eksperimentalne opreme.

3. 1. 1. Programski paket ATB-GEBOD

Programski paket ATB-GEBOD (izdelek raziskovalnega središča na Wright Patterson Air Force Base, ZDA) je med najbolj razširjenimi orodji za analizo in rekonstrukcijo gibanja človeškega telesa med prometno nezgodo.

Program GEBOD (Generator of Body Data) se uporablja za generiranje antropomorfnih podatkov o udeležencih prometnih nezgod. Vhodni podatki so masa, višina in starost osebe, GEBOD pa nato na osnovi vgrajene baze podatkov določi dimenzije, mase in vztrajnostne tenzorje za posamezne segmente človeškega telesa. Osnova za podatkovno bazo so statistične vrednosti določenega vzorca populacije prebivalstva.

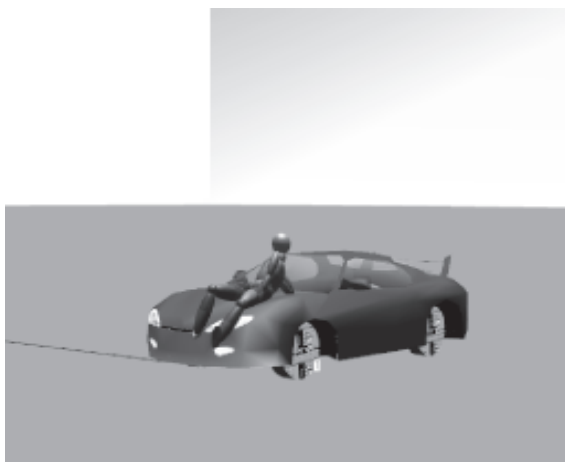


Slika 2. *Prikaz v navideznem trirazsežnem okolju s programom ATB 3I*
 Figure 2. *Situation in a three-dimensional space created by the ATB 3I simulation*

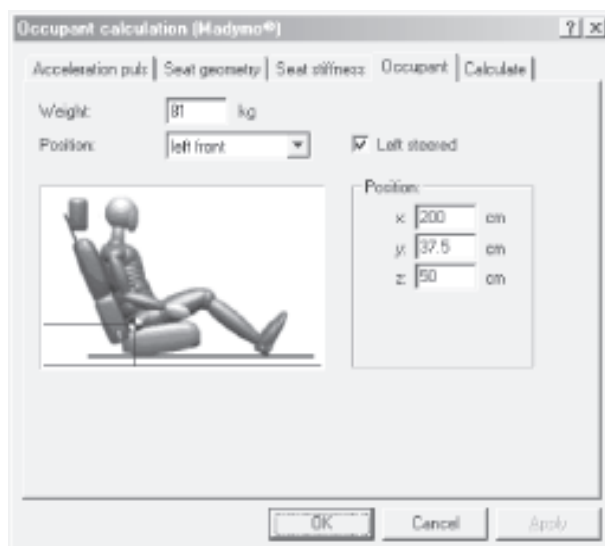
Program ATB (Articulated Total Body) je namenjen simulaciji dinamike človeškega telesa v trirazsežnem prostoru. Množica vhodnih podatkov o lastnostih telesa je generirana s programom GEBOD in po potrebi dopolnjena z dodatnim vnosom podatkov, oblika in velikost sunka, ki mu je izpostavljen udeleženec trka, pa sta predpisani s strani uporabnika. Zasnova ATB omogoča analizo in napovedovanje obremenitev človeškega telesa pri najrazličnejših zunanjih obremenitvah. Vgrajen je tudi modul za prikaz v navideznem trirazsežnem okolju (Slika 2).

3. 1. 2. Program PC Crash

PC Crash se je v letih svojega obstoja razvil v celovit program za obravnavo prometnih nezgod (3). Najnovejša različica ima vgrajeno orodje za analizo gibanja človeškega telesa, ki deluje na osnovi dinamike sistema togih teles in za izračun uporablja matematični model MADYMO. Možne so tako simulacije nezgod s pešci (Slika 3) kot tudi simulacije obremenitev voznikov in potnikov v vozilih (Slika 4).



Slika 3. *Simulacija trka pešca in vozila v programu PC Crash*
Figure 3. *Simulation of a vehicle/pedestrian collision by PC Crash*



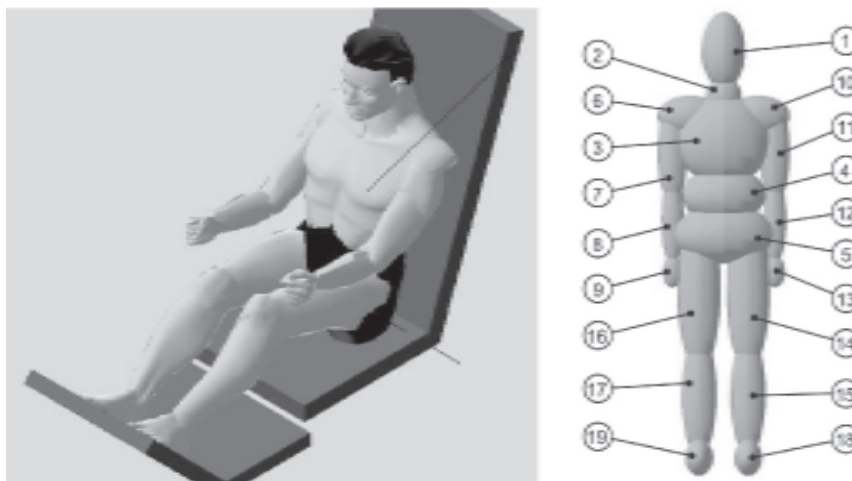
Slika 4. *Simulacija obremenitev potnika z modulom Madymo v programu PC Crash*
Figure 4. *Simulation of the load sustained by a passenger using Madymo module in PC Crash*

3. 1. 3. Lastni razvoj

Varnost vozil se običajno načrtuje na osnovi preizkusnih trkov z lutkami. Lutke nadomeščajo ljudi, ki bi bili pri preizkusnem trku znatno obremenjeni in izpostavljeni poškodbam. Dimenzije in mehanske lastnosti lutk v splošnem ne zrcalijo individualnih značilnosti človeka, saj so zasnovane na povprečnih vrednostih določenega vzorca v populaciji. Poskusi z različnimi vrstami lutk (7) so pokazali velika odstopanja pri dinamičnem odzivu na enako zunanjo obremenitev, kar je predvsem posledica različnih mehanskih lastnosti in različnih začetnih pogojev. V zadnjem času je predmet intenzivnih raziskav vpliv variabilnosti antropomorfnih značilnosti in začetnih oziroma robnih pogojev na dinamični odziv ter posledično na možnost nastanka poškodb. Ker se lutke težko prilagodijo značilnostim posameznika, nam preostane še možnost računalniške simulacije prometne nezgode na osnovi primernih mehanskih in matematičnih modelov človeškega telesa.

V takšnem modelu je človeško telo predstavljeno kot sistem togih teles (segmentov) z določenimi geometrijskimi in mehanskimi lastnostmi, medsebojno povezanih s sferičnimi in rotacijskimi kinematičnimi pari (8), kot prikazuje

Slika 5. Model ima skupno do 19 segmentov in do 36 prostostnih stopenj.



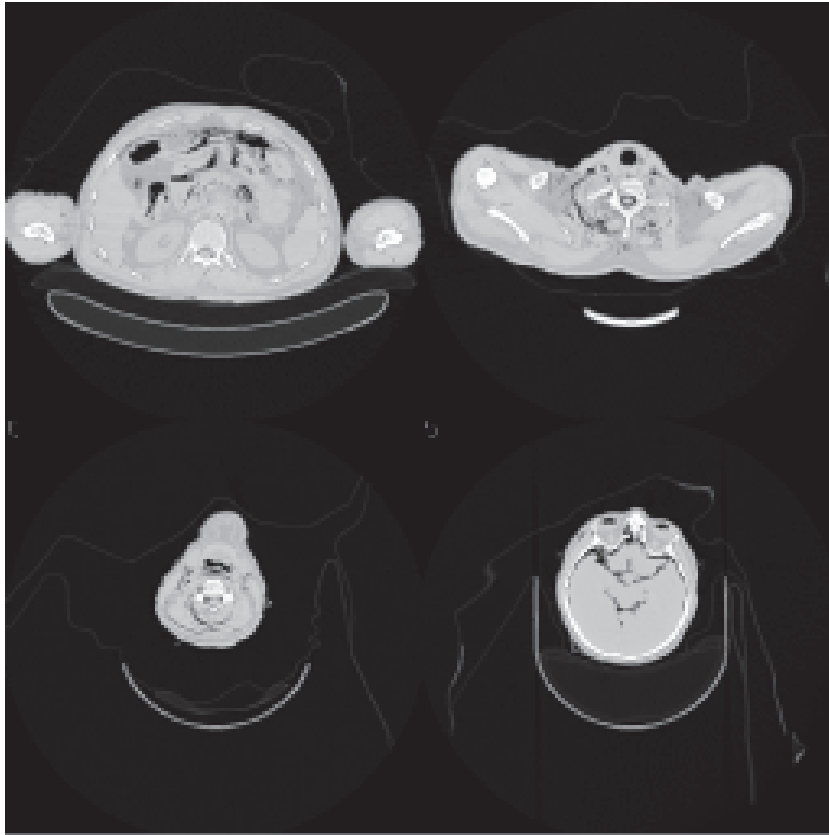
Slika 5. Človeško telo in njegov mehanski model z 19 segmenti
Figure 5. Human body and its mechanical model with 19 segments

3. 2. Pridobivanje geometrijskih in vztrajnostnih lastnosti človeškega telesa

Za učinkovito simuliranje gibanja človeškega telesa in obremenitev, ki delujejo nanj med potekom prometne nezgode, je treba čimbolj natančno poznati geometrijske in vztrajnostne lastnosti človeškega telesa oziroma njegovih segmentov. Za natančno vrednotenje posameznih primerov resničnih prometnih nezgod statistično pridobljeni podatki iz vnaprej pripravljenih baz niso vedno ustrezni. Da bi dobili geometrijske in vztrajnostne lastnosti posameznih segmentov telesa z zahtevano natančnostjo, moramo izvesti meritve na osebi podobne telesne zgradbe.

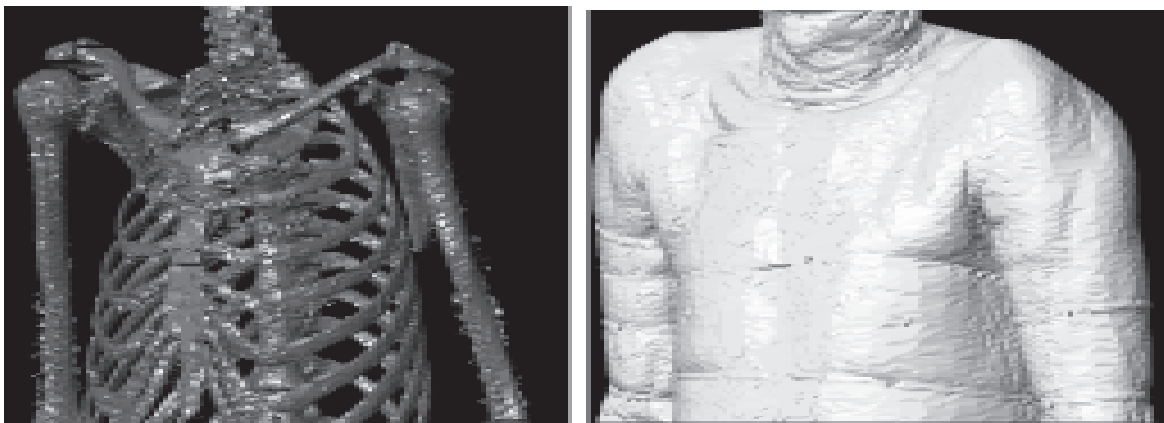
3. 2. 1. Določanje geometrije človeškega telesa z računalniškim tomografom

Ena od možnosti pridobivanja geometrijskih (in posredno tudi vztrajnostnih) lastnosti človeškega telesa je slikanje z računalniškim tomografom. Serijo zaporednih posnetkov s tomografa (Slika 6) z ustrežno programsko opremo sestavimo v trirazsežni model (Slika 7).



Slika 6. *Računalniški tomogram*
 Figure 6. *CT scan*

Takšen model je uporaben tako za pridobivanje geometrijskih in vztrajnostnih lastnosti segmentov človeškega telesa kot tudi za prikaz v navideznem trirazsežnem okolju.



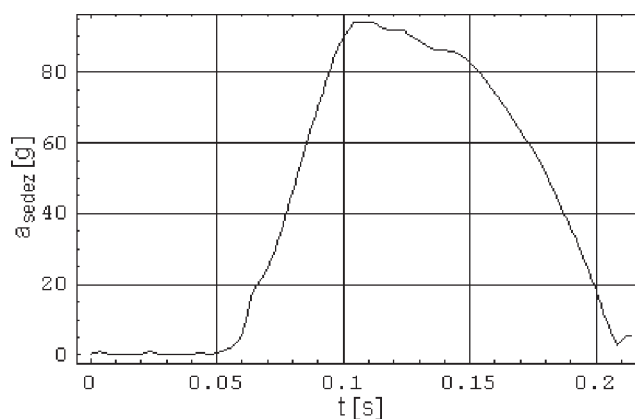
Slika 7. *Trirazsežni model na osnovi računalniškega tomograma*
 Figure 7. *Three-dimensional model based on a CT scan*

3. 3. Občutljivostna analiza

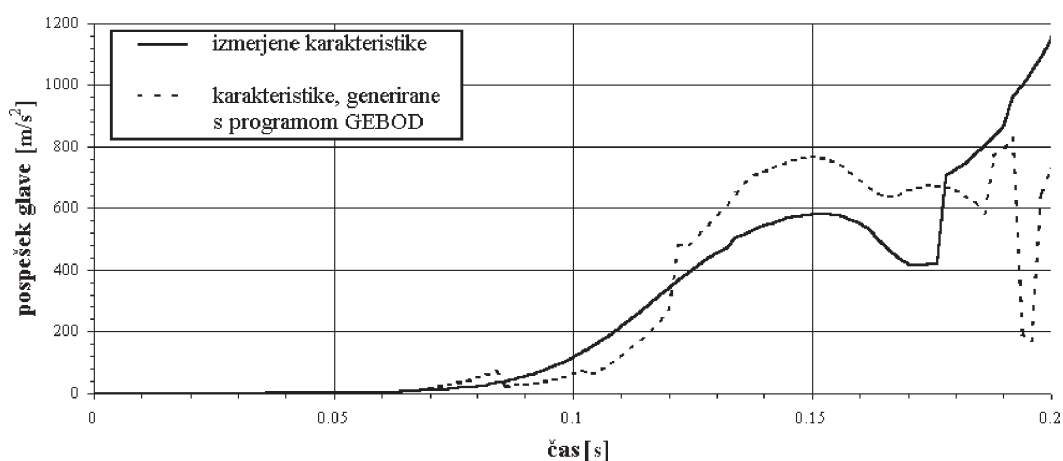
Občutljivostna analiza preučuje vpliv spremembe posameznih značilnosti človeškega telesa na njegov dinamični odziv ter s tem na spremembo verjetnosti nastanka in teže poškodb. Kot primer navajamo pospešek glave pri odraslem moškem, izračunan z izbranim matematičnim modelom telesa, pri zunanji obremenitvi, kot jo prikazuje **Slika 8**.

Slika 9 prikazuje primerjavo časovnih potekov pospeška glave pri dveh numeričnih simulacijah z

enakim modelom človeškega telesa (9), vendar z različnimi vhodnimi podatki (geometrijo, maso, vztrajnostne lastnosti). Polna črta označuje potek pospeška glave za izmerjene (realne) vrednosti mehanskih lastnosti telesa, prekinjena pa za vrednosti, dobljene s programom GEBOD. Iz diagrama pospeška glave je razvidno, da pri spremenjeni masi glave kljub enaki zunanji obremenitvi nastanejo razlike pri dinamičnem odzivu.



Slika 8. Zunanja obremenitev (pojemek sani s sedežem)
Figure 8. External load (deceleration of sled device)



Slika 9. Razlika v pospešku glave pri enaki zunanji obremenitvi
Figure 9. Differences in head deceleration with equal external loads

4. Preskuševališče – naletna proga

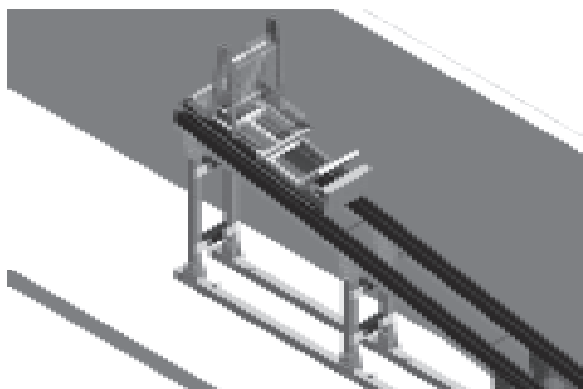
Snovanje in verifikacija modela človeškega telesa, analiza možnosti nastanka poškodb ter občutljivostna analiza zahtevajo ustrezno eksperimentalno podporo. V ta namen je bila v tehnološkem centru CEMEK zgrajena posebna preizkusna naprava – naletna proga (Slika 10), postavljena na Anatomskem inštitutu Medicinske fakultete v Ljubljani.

Naletna proga je namenjena trčnim preskusom pri nižjih hitrostih. Sestavljena je iz poševnih tirnic za vodenje

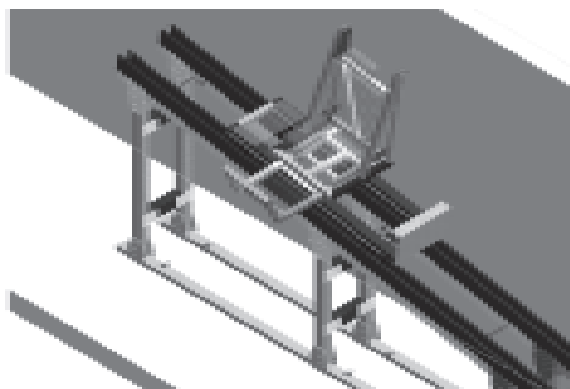
sani in udarne ovire, v katero trčijo sani s preizkušancem. Naprava omogoča rotacijo sedeža ter s tem izvedbo čelnih trkov, trkov od zadaj in bočnih trkov. S spremembo naletne hitrosti, nastavitvijo dušenja pri udarcu v oviro ter orientacijo sedeža (Slika 11) je možno preskusiti različne obremenitvene primere. Prilagodljiva geometrija togega sedežnega sklopa omogoča tudi zasledovanje vpliva začetne drža na dinamiko odziva preskušanca.



Slika 10. *Naletna proga*
Figure 10. *Trajectory*



a)



b)

Slika 11. *Orientacija sedeža na saneh naletne proge; (a) čelni trk, (b) bočni trk*
Figure 11. *Sled device seat in (a) frontal crash and (b) lateral crash*

Kot primer uporabe naletne proge je naveden krajši povzetek meritev pospeškov na telesu, ki nastanejo pri čelnem trku s tremi različnimi hitrostmi: 8, 10, 12 km/h. Pri tem so preostali pogoji (lega telesa pred trkom, mehanski parametri trka, itn.) pri meritvi ostali nespremenjeni. Preskušane je bil opremljen s triosnimi pospeškometri tehnologije MEMS, ki so bili pritrjeni na izbrane segmente telesa (glava, prsni koš, stegnenica); pojemek sani je bil izmerjen z enoosnim

pospeškometerom. Zaradi večje ponovljivosti pozicioniranja v začetno lego so bile na telesu označene tudi ustrezne referenčne točke. Signali s pospeškometerov so bili obdelani in filtrirani glede na priporočila, omenjena v standardu ISO 6487. Za preučevanje razmer med trkom je bil potek poskusa posnet kot digitalni video. Štiri slike iz videoposnetka, posnete v značilnih trenutkih poteka trka, prikazuje Slika 12.



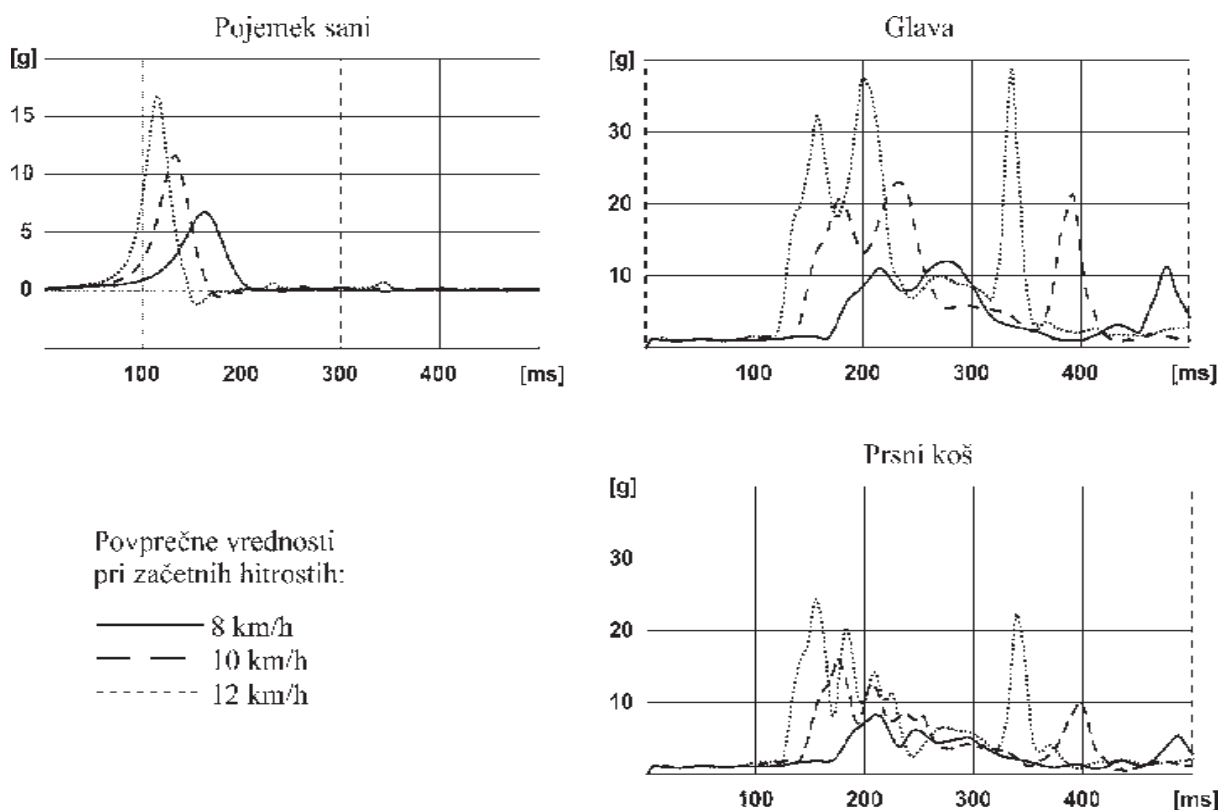
Slika 12. *Izsek iz posnetka čelnega trka*
Figure 12. *Frontal crash situation – a segment*

Slika 13 prikazuje povprečne pospeškovne razmere pri različnih hitrostih: pojemek sani, rezultirajoči pospešek glave in rezultirajoči pospešek prsnega koša. Pri vsaki od navedenih hitrosti je bilo izvedenih 10 zaporednih meritev ter izračunano njihovo povprečje v vsakem trenutku. Diagram kaže, da znašajo maksimalne vrednosti pojemka sani, ki predstavlja zunanjo obremenitev preizkušanca, 7 g pri hitrosti 8 km/h, 12 g pri hitrosti 10 km/h in 17 g pri hitrosti 12 km/h. Diagrama pospeškov glave in prsnega koša kažeta na velika odstopanja dinamičnega odziva telesa, ki

nastanejo zaradi spremembe začetnih pogojev (hitrosti in pojemka sani). Maksimalne vrednosti pospeškov so različne tako po amplitudi kot po trenutku, v katerem se pojavijo.

5. Sklep

Analiza prometnih nezgod, posebej tistih, v katerih nastanejo poškodbe udeleženi ljudi, zahteva individualno obravnavo posameznih primerov. To



Slika 13. Primer rezultatov meritev na naletni progi
 Figure 13. Measurements made on the trajectory

potrjujeta oba zгледа, predstavljena v prispevku. S klasičnimi metodami analize prometnih nezgod ne popišemo poteka kinematičnih in kinetičnih veličin med potekom trka, zato iz njih ne moremo sklepati o poteku nastanka poškodb. Z uporabo prikazanih orodij lahko določimo obremenitve posameznih delov človeškega telesa v vsakem trenutku in s tem kakovost obravnave prometnih nezgod in rezultatov analiz dvignemo na bistveno višjo raven.

S postavitvijo naletne proge kot sistema za merjenje obremenitev potnikov so dane možnosti eksperimentalnega preverjanja rezultatov simulacij in preučevanja vpliva obremenitev potnikov na njihove poškodbe pri trkih.

Ključnega pomena pri določanju posledic obremenitev na človeško telo je znanje s področja medicine, zato je nujna povezava strokovnjakov s področij tehnike in medicine.

Literatura

1. Burg, Heinz; Rau Hartmut: *Handbuch der Verkehrsunfallrekonstruktion*, VIA, Kippenheim 1981.
2. Danner, Manfred: *Technische Analyse von Straßenverkehrsunfällen*, Kraftfahrzeugtechnischer Verlag, München 1981.
3. Wach, Wojciech: *PC Crash, Program for Simulation of Road Accidents*, Institut Expertyz Sadowych, Kraków 2001.
4. Burg, Heinz: *CARAT 3.0 Handbuch*, lbB, Mühlheim a. d. Mosel, 1998.
5. Ropohl, Dirk: *Die rechtmedizinische Rekonstruktion von Verkehrsunfällen*, DAT Stuttgart 1990.
6. Patrick, Lawrence M.: *Head Injuries*, Wayne State University, Detroit 1967.
7. Lau, I. V.: *An Analysis of the MVMA Sponsored Full Scale Side Impact Tests*. In: Proceedings of Stapp Car Crash Conference 1989, SAE International, Warrendale, 1989.
8. Kapandji, I. A.: *The Physiology of the Joints*, Vol 1, 2, 3, Longman Group UK Limited, London, 1970-1990.
9. Ciglaric, Iztok: *Modeliranje vozil in potnikov za analizo cestno prometnih nezgod*, doktorsko delo na FS, Ljubljana 2001.