

Dinamična analiza deformiranja cestne varnostne ograje pri naletu vozila

Dynamic Analysis of a Road-Restraint System's Deformation Resulting from a Vehicle Impact

Matej Vesenjak - Zoran Ren

V prispevku je obravnavana dinamična analiza jeklene cestne varnostne ograje. Slednja se uporablja na javnih cestah za preprečitev zdrsa vozila s cestišča ali preboja na nasprotni vozni pas. Evropski standard EN 1317 podaja natančna merila, ki jih mora izpolnjevati ograja. Dosedanje raziskave so pokazale, da je sedanja cestna varnostna ograja pri naletu vozila pretoga, kar ima za posledico prevelike pojemke pri naletu vozila. Na togost ograje ima v začetni fazi trka vozila ob varnostno ograjo največji vpliv distančnik. Namen raziskave je oblikovanje novega distančnika, ki bo zmožen povečane absorpcije energije trka in s tem nadzorovane deformacije pri naletu vozil. Ustreznost novih oblik distančnika je bila preverjena z dinamičnimi nelinearnimi (materialna, geometrijska in strukturna nelinearnost) analizami trirazsežnega modela varnostne ograje po metodi končnih elementov. Rezultati računalniških simulacij kažejo, da je sedanji distančnik pretog in da lahko z drugačnimi oblikami distančnikov povečamo zmožnost elasto-plastičnega deformiranja in s tem absorpcijo energije trka ter tako posredno zmanjšamo pojemke potnikov v vozilih med trkom in povečamo cestno varnost.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: varnost na cestah, ograje varnostne, analize dinamične, simuliranje numerično, simuliranje nelinearno)

This paper describes a dynamic analysis of a steel road-restraint system that is used on public roads to prevent a vehicle from veering off the road or breaking through to the opposite side of the road. The European standard EN 1317 provides the exact criteria that the road-restraint system has to fulfill. Practical observations of installed systems indicate that the current distance spacer is too stiff, which results in unacceptable decelerations during vehicle impact. The stiffness of the restraint system in the initial phase of the crash is largely attributed to the distance-spacer design. The purpose of this research was to evaluate new designs of the distance spacer with increased crash-energy absorption due to a more controlled deformation during vehicle impact. The stiffness of various designs was evaluated with nonlinear dynamic (material, geometric and structural-contact nonlinearity) analysis of a three-dimensional road-restraint system within the framework of the finite-element method. The computational analyses prove that the currently used distance spacer is indeed far too stiff and that the new designs ensure controllable elasto-plastic deformation and absorb more crash energy, which in turn reduces decelerations during the impact and increases the safety of road users.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: roadside safety, road-restraint barriers, dynamic analysis, numerical simulations, nonlinear simulations)

0 UVOD

V želji, da bi skrbeli za prometno varnost in jo celo izboljšali, so pri načrtovanju varnejših javnih cest na določenih mestih nujno potrebne cestne varnostne ograje. Uporaba teh konstrukcij preprečuje vozilom in pešcem vstop v nevarna območja. Zaradi tega je ustrezna konstrukcija varnostne ograje izrednega pomena.

V pripravi je slovenski pravilnik o varnostnih ograjah, pogojih in načinih, ki bo obsegal tehnično

specifikacijo za javne ceste z obvezno uporabo varnostnih ograj. Le-te morajo ustrezati evropskemu standardu EN 1317, ta podaja natančna merila, ki jim mora ograja ustrezati, in pogoje njenega testnega obnašanja pod obremenitvijo.

Dosedanje raziskave so pokazale, da ima sedanja konstrukcija cestne varnostne ograje v primeru trka osebnega vozila preveliko togost. Zato je treba poiskati ustrezno rešitev, ki bo zmanjšala togost ograje in s tem pojemke pri naletu vozila na ograjo ter tako povečala varnost potnikov v vozilu.

Namen raziskave je oblikovanje novega distančnika, ki bo zmožen absorbirati več energije trka pri naletu vozil in se bo pri tem nadzorovano deformiral.

Ustreznost novih oblik distančnika je bila preverjena z nelinearno dinamično analizo trirazsežnega modela dela varnostne ograje in odbojnika avta. Za izvedbo dinamičnih analiz je bil uporabljen program LS-Dyna PC Version 960, ki omogoča simulacijo velikih deformacij pri dinamičnih odzivih neelastičnih teles.

1 OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZAHTEVE VARNOSTNE OGRAJE

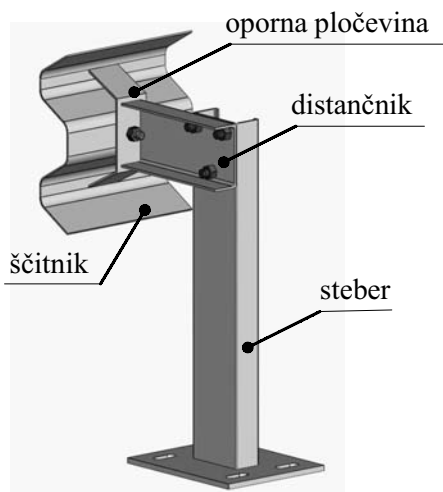
Namen varnostnih ograj je preprečiti zlet vozila s ceste ali preboj vozila na nasprotni vozní pas in s tem preprečiti oziroma zmanjšati poškodbe potnikov v vozilu, oseb in objektov ob vozišču, oziroma zadržati vozila, ki nenadzorovano spreminjajo smer vožnje, na ustreznem voznem pasu.

Varnostno ograjo postavljamo na mestih, kjer je nevarnost poškodb zaradi udarca vozil v varnostno ograjo manjša od nevarnosti prehoda vozil v nevarno območje, ki je ločeno z varnostno ograjo. Na javnih cestah se lahko postavljajo varnostne ograje, ki so atestirane po EN 1317.

Na cestah se praviloma uporablja jeklena varnostna ograja, v posameznih primerih pa je potrebno ali dovoljeno uporabiti tudi betonsko (kadar želimo zagotoviti največjo stopnjo zadrževanja vozil) in leseno varnostno ograjo (na malo prometnih cestah iz naravovarstvenih in estetskih razlogov).

Konstruktivski elementi jeklene cestne varnostne ograje so (sl. 1):

- ščitnik: v primeru udarca vozila s svojo obliko konstrukcije zmanjša posledice udarca in se v nobenem primeru ne sme pretrgati;
- oporna pločevina: povezuje ščitnik in distančnik, ščitniku pa daje še dodatno oporo;



Sl. 1. Sestavni elementi cestne varnostne ograje

- distančnik: ublaži učinek udarca vozila ob ograjo in je namenjen za povezavo med ščitnikom in stebrom ali drugo oporo;
- steber: je nosilec distančnika in/ali ščitnika, ki zagotavlja lego ščitnika na določeni oddaljenosti in določeni višini od vozišča (sl. 2).

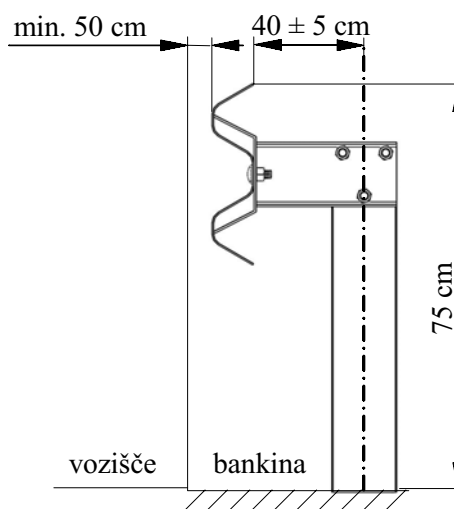
Cestne varnostne ograje so lahko eno- ali dvostranske, z distančnikom ali brez njega. Ograje z distančnikom se uporabljajo predvsem na avtocestah in drugih hitrih cestah, ograje brez distančnikov pa na cestah, kjer zaradi ozkih bankin ni mogoče uporabljati distančnikov.

Zgornji rob jeklene varnostne ograje mora biti postavljen 75 cm nad robom vozišča ali odstavnega pasu. Oddaljenost ščitnika varnostne ograje mora biti najmanj 50 cm od roba vozišča oziroma roba odstavnega pasu. Razdalja med prečno najbolj oddaljenim koncem ščitnika in sredino stebra mora biti 40 ± 5 cm. Opisane mere so prikazane na sliki 2.

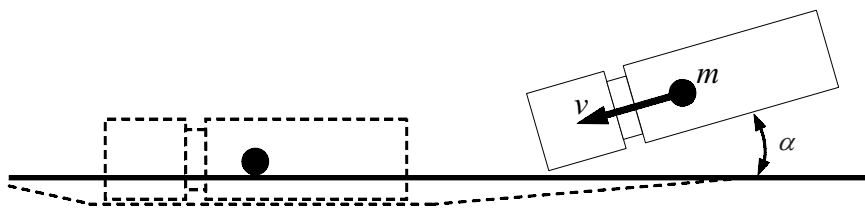
2 RAZVRSTITEV VARNOSTNIH OGRAJ PO EN 1317

Možnosti naleta vozila na cestno varnostno ograjo se razlikujejo glede na hitrost (v), maso (m), kot približevanja (α), tip in obnašanje vozila ter razmere na cesti (sl. 3).

Po standardu EN 1317 so varnostne ograje razvrščene v več ravni učinkovitosti zadrževanja vozil. Standard predpisuje merila, ki jim mora cestna varnostna ograja ustrezati pri določenih pogojih naleta vozil. Pri tem je treba upoštevati, da mora ograja zadržati trke različnih tipov vozil, od osebnih do tovornih vozil. Pri naletu vozil z manjšo maso (manjšo kinetično energijo), mora biti ograja dovolj deformljiva (mehka), da pojemki pri trku niso preveliki. Pri naletu vozila z večjo maso (večjo kinetično energijo) pa mora imeti ograja dovolj visoko nosilnost, da vozilo zadrži na cestišču. Tako je pri konstruiranju cestne varnostne



Sl. 2. Mere postavitve cestne varnostne ograje



Sl. 3. Parametri teoretičnega trka

ograje ves čas treba iskati kompromis med togostjo (deformljivostjo) in nosilnostjo ograje.

Cestne varnostne ograje morajo po EN 1317-2 ustrezati naslednjim kriterijem:

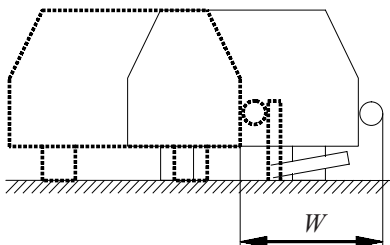
- Raven zadrževanja vozil: pomeni, skladno z evropskimi normami EN 1317-2, stopnjo zadrževanja za različne vrste vozil pred zletom s ceste ali pred prebojem na nasprotno smerno vozišče za posamezno javno cesto. Standard določa štiri ravni zadrževanja vozil: nizka raven zadrževanja (T1, T2 in T3), običajna raven zadrževanja (N1 in N2), visoka raven zadrževanja (H1, H2 in H3) in zelo visoko raven zadrževanja (H4a in H4b).
- Jakost udarca: jakost udarca vozila ob cestno varnostno ograjo v smislu ugotavljanja posledic za potnike v vozilu dobimo z merjenjem indeksa velikosti pospeškov (ASI - acceleration severity index), z določanjem teoretične hitrosti glave pri udarcu (THIV - theoretical head impact velocity)

in z merjenjem pojemka glave po udarcu (PHD - post-impact head deceleration). Mejne vrednosti navedenih parametrov so naslednje: $ASI \leq 1,0$ (1,4), $THIV \leq 33$ km/h in $PHD \leq 20$ g.

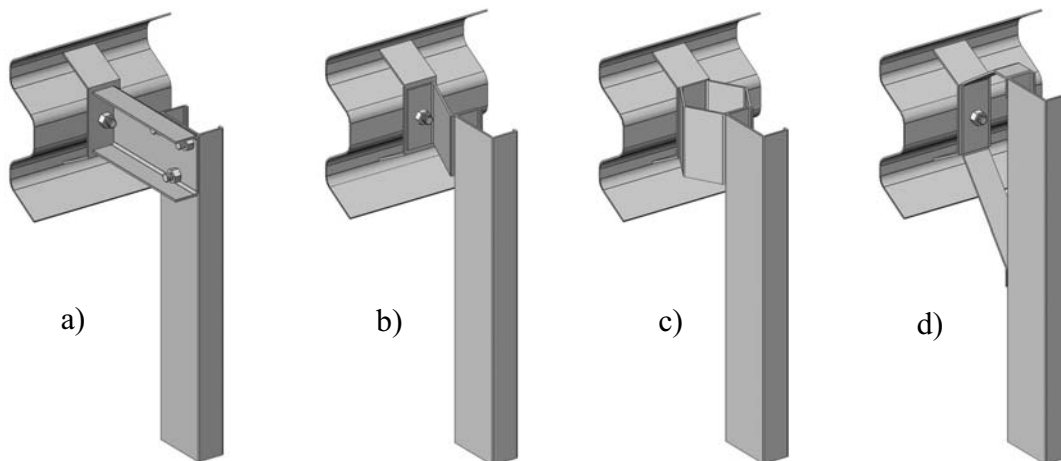
- Deformacija cestne varnostne ograje: pomik (delovna širina) ograje (W) je razdalja med licem ščitnika varnostne ograje (v prvotni legi) in skrajna, od vozišča odmaknjena, točka na ograji po njeni deformaciji ali odmiku od prvotne lege zaradi trka vozila v ograjo (sl. 4). Kriterij za vrednotenje deformacije cestne varnostne ograje je razdeljen na 8 razredov (W1 do W8). Deformacija cestne varnostne ograje se meri v metrih.

3 IZBIRA PRIMERNE OBLIKE DISTANČNIKA

Sedanja konstrukcija cestne varnostne ograje (sl. 5a) je izdelana iz konstrukcijskega jekla S 235 (St 37-2 po DIN). Ščitnik je izdelan iz 3 mm debele pločevine, ta je preoblikovan v obliko, ki povečuje trdnostne lastnosti. Dolžina odbojnika je običajno 4200 mm, pri čemer je dolžina spoja (prekritja) 200 mm. Oporna pločevina je izdelana iz 6 mm debele pločevine in je privarjena na distančnik. Ta distančnik je iz profila U izmer 120 x 50 x 260 mm. Razdalja med oporno pločevino in stebrom znaša 140 mm. Stebri so iz profila C izmer 55 x 120 x 4 mm. Praviloma so dolžine 1,9 m. Postavljeni so na medsebojni oddaljenosti 1,3 m, 2 m in 4 m, kar je odvisno od potrebne ravni zadrževanja vozil. Steber je vgrajen tako, da je zaprti profil v smeri



Sl. 4. Delovna širina (W) cestne varnostne ograje pri trku



Sl. 5. Različne oblike distančnikov

a) - profil U (prvotni distančnik); b) - profil Z; c) - šestkotni profil; d) - profil D

vožnje. Če stebra ni mogoče zabiti, ga je potrebno s podložno ploščo pritrditi na sidrno ploščo. Za vijajne zveze so uporabljeni vijaki M16 x 35 trdnostnega razreda 5.8.

Pri konstruiranju nove oblike distančnika je bilo treba upoštevati različne zahteve. Distančnik mora biti oblikovan tako, da ograja geometrijsko ustreza pravilniku ter da s svojo obliko pri trku čim bolj ublaži udarec, torej absorbira čim več energije trka. Zaradi tega ne sme biti preveč tog, hkrati pa mora dajati zadosten odpor silam, ki delujejo nanj. Pri trku mora ostati povezan z vsaj enim delom ograje. Dodatno pa mora biti lahko izvedljiv in preprost za montažo ter omogočati stalno in preprosto vzdrževanje.

Analizirane so bile štiri različne oblike distančnikov, ki so prikazane na sliki 5.

4 PRIMERJALNA DINAMIČNA ANALIZA DISTANČNIKOV PO METODI KONČNIH ELEMENTOV

S parametrično primerjavo preostalih profilov smo določili tistega, ki geometrijsko in funkcionalno najbolj ustreza. Za numerično analizo deformacijskega stanja varnostne ograje je bila uporabljena metoda končnih elementov.

Za oblikovanje geometrijske oblike in mreže modela končnih elementov in določitev materialnih modelov ter robnih pogojev je bil uporabljen program ETA Femb PC 27.0. Osnovna geometrijska oblika je bila izdelana s programom MSC.visualNastran za Windows-e.

4.1 Numerični model

Obravnavan je bil odsek cestne varnostne ograje v dolžini 20 m, saj so analize pokazale, da večja dolžina modela bistveno ne vpliva na rezultat analiz. Model zajema pet delov ščitnika (modeliran je v enem delu, ker smo predpostavili, da povezuje - prekritje ščitnikov ne pomeni najšibkejšega člena) in deset distančnikov, opornih pločevin ter stebrov, postavljenih na medsebojni razdalji 2 m. Naletno vozilo je aproksimirano z odbojnikom z maso 900 kg. Tako geometrijska oblika kakor lega odbojnika ustrezata meram dejanskega osebnega vozila. Modeliran je s

togimi lupinskimi elementi, kar pomeni da je nedeformabilen. Sestavni deli cestne varnostne ograje so modelirani z lupinskimi končnimi elementi Belytschko-Tsay in imajo tri integracijske točke po debelini elementa. Debeline posameznih delov so naslednje: ščitnik 3 mm, oporna pločevina 6 mm, distančnik 4 mm (razen profil $D = 5$ mm) in steber 4 mm. Povprečna velikost štirikotnih lupinskih elementov je 10 mm. Celoten model je sestavljen iz približno 42000 vozlišč in 41000 elementov.

4.2 Materialni model

Vsi sestavni deli varnostne ograje so izdelani iz konstrukcijskega jekla S 235. Z namenom, da bi ugotovili materialne lastnosti pločevin različnih debelin, smo izvedli ustrezne natezne preskuse v skladu s standardom DIN 50 115. Iz eksperimentalno dobljenih rezultatov so bile definirane elasto-plastične lastnosti materiala oziroma ustrezna odvisnost $\sigma - \varepsilon$ (pregl. 1). Po določitvi modula elastičnosti, meje plastičnosti in modula plastičnosti smo predpisali ustrezen diagram $\sigma - \varepsilon$ za bilinearni izotropni elasto-plastični materialni model s kinematičnim utrjevanjem. Vzeto je bilo, da se odbijač, vijajne zveze in zvarni spoji obnašajo kot toga telesa.

V modelu cestne varnostne ograje niso bili določeni posebni porušitveni pogoji. Kot merilo porušitve je bila uporabljena dejanska plastična deformacija, ki je znašala 0,28, kar ustreza približno 28% žilavosti jekla S 235, iz katerega je izdelana pločevina.

4.3 Robni pogoji in dotiki

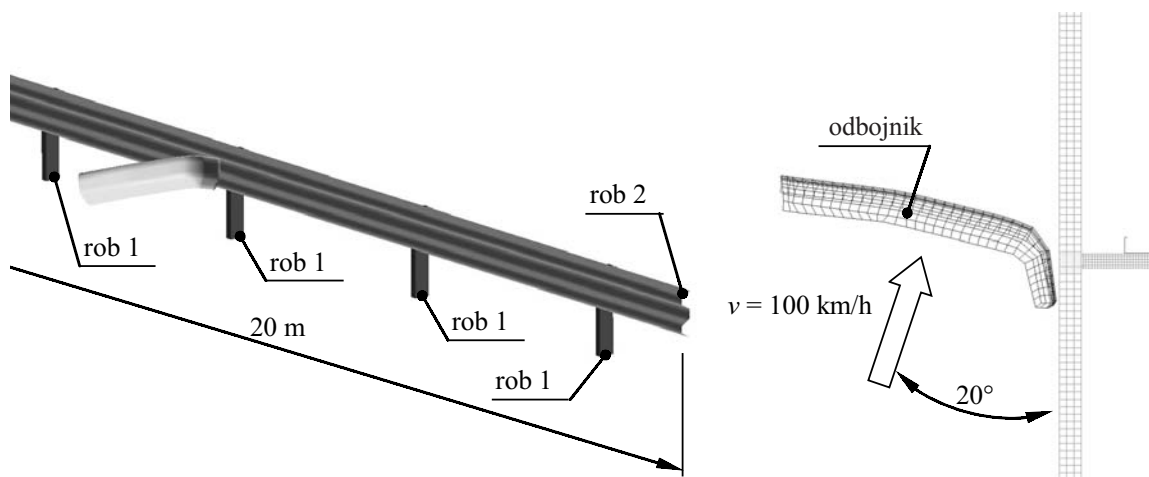
Vozliščem koncev ščitnika po robu 2 (sl. 6) je bil omejen pomik v vzdolžni smeri ščitnika in zasuk okoli preostalih dveh osi. Stebri so bili togo vpeti na spodnjem delu po robu 1 (sl. 6).

Odbojnik ima predpisano začetno hitrost, in sicer 100 km/h s kotom naleta 20° na ščitnik (sl. 6). Gibanje odbojnika je po višini omejeno. Kinetična energija odbojnika pri trku znaša 350 kJ.

Vse površine modela so bile zbrane v eno stično skupino. Statični in dinamični koeficient trenja med vsemi deli znaša 0,1 oziroma 0,05.

Preglednica 1. Fizikalne lastnosti sestavnih pločevin varnostne ograje

Debelina pločevine	Modul elastičnosti	Poissonovo število	Meja plastičnosti	Modul plastičnosti	Natezna trdnost
mm	MPa	-	MPa	MPa	MPa
3	190000	0,29	285	696	400
4	200000	0,29	330	969	450
6	210000	0,29	380	1200	480



Sl. 6. Robni pogoji

4.4 Podatki dinamične analize

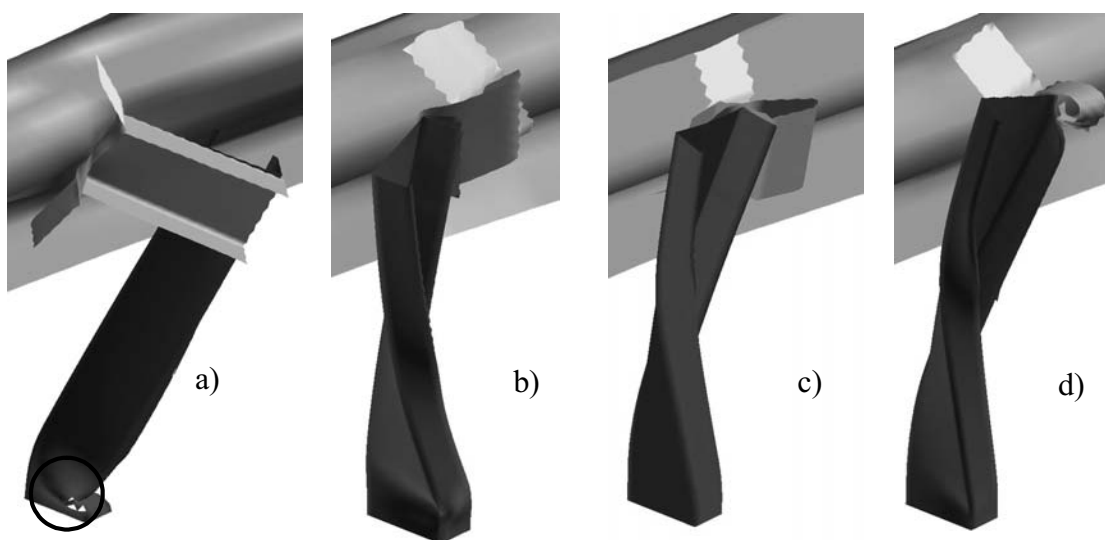
Izvedene so bile dinamične analize z upoštevanjem treh nelinearnosti: materialna (elasto-plastičen materialni model), geometrijska (veliki pomiki in zasuki) in strukturna (stiki). Za izvedbo analiz je bil uporabljen program LS-Dyna PC Version 960. Opazovani časovni korak trka je znašal 0,45 s. Časovni korak izrecne analize je samostojno določen, glede na najnižjo resonančno frekvenco strukture, in je znašal 1,4 μ s. Izpis rezultatov je potekal vsakih 10 ms. Časi analiz so znašali od 85 do 95 ur, odvisno od zahtevnosti modela.

5 REZULTATI ANALIZ IN PRIMERJAVA

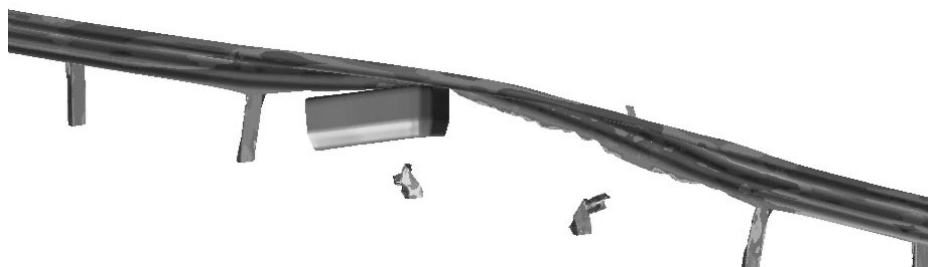
Rezultati, ki smo jih dobili z računalniškimi analizami so prikazani na sliki 7. S slike je razvidno, da

se sedanji distančnik pri naletu vozila le malo deformira in ne ublaži udarca vozila na ograjo. Distančnik profila Z ne daje zadostnega odpora silam in se v zelo hitrem časovnem obdobju deformira tako, da se ščitnik nasloni na steber. Zaradi svoje nesimetrične oblike je tudi vzvojno manj stabilen in deformacijsko manj predvidljiv. Distančnik šestkotnega profila je dal najboljše rezultate. Nadzorovano se je deformiral, dokler ni ščitnik nasedel na steber, a je ob tem zagotavljal večji odpor silam od distančnika profila Z. Distančnik profila D je dal najslabše rezultate. Zaradi svoje vitke strukture ne daje dovolj odpora obremenitvenim silam. Njegova dobra lastnost, da potisne distančnik navzgor in s tem vozilo ne more prevoziti ograje, se je v izvedenih dinamičnih analizah potrdila.

S slike 7a je razvidno, da je deformacija določenih elementov v bližini podlage prekoračila



Sl. 7. Deformacije distančnikov pod obremenitvijo
 a) - profil U (prvotni distančnik); b) - profil Z; c) - šestkotni profil; d) - profil D



Sl. 8. Deformacija ograje s profilom D

Preglednica 2. Primerjava rezultatov

Distančnik	Delovna širina ograje	Dolžina stika vzdolž ograje	Absorbirana energija trka
	m	m	kJ
profil U	0,825	11,7	112,2
profil Z	0,71	13,2	117,5
šestkotni profil	0,78	14,2	129,0
profil D	0,6	-	-

mejno vrednost, zaradi česar je prišlo do porušitve stene. Tudi praktična opazovanja potrjujejo te rezultate, saj pri naletih vozil ob ograje zapisujejo porušitve stebrov v bližini podlage. Deformacije so presegle mejno vrednost tudi v nekaterih primerih pri vijračnih zvezah med ščitnikom in oporno pločevino.

Pri vrednotenju rezultatov so najpomembnejši naslednji podatki: delovna širina W , dolžina dotika vozila vzdolž ograje l , pojemki zaradi trka in absorpcija energije trka. Vsi omenjeni rezultati razen pojemkov so za vse štiri oblike distančnikov zbrani v preglednici 2. Iz rezultatov je razvidno, da je sedanji distančnik absorbiral najmanj energije trka. Najboljše rezultate je dosegel šestkotni profil.

Slika 9 prikazuje časovni potek pojemkov vozila (v obravnavanem primeru odbojnika) za vse štiri oblike distančnikov. Ekstremne vrednosti pojemkov se pojavijo v dveh primerih: ob naletu vozila na ograjo (prvi ekstremi) in ob naletu vozila na steber (drugi ekstremi). Premiki ekstremov med posameznimi modeli cestnih varnostnih ograj so posledica različnih hitrosti zaradi neenakih pojemkov po naletu vozila. S slike je razvidno, da pojemki obravnavanega distančnika (profil U) dosežejo največjo vrednost ob trku ob ograjo. Zaradi največjega pojemka pri naletu ob ograjo (hitra upočasnitev) vidimo, da vozilo doseže steber najkasneje, kjer prav tako doseže največje pojemke (kar 25% večji pojemki kakor pri preostalih oblikah distančnikov). Največji vpliv na obnašanje ograje ima distančnik v začetni dobi naleta, kjer ima funkcijo dušila. Razvidno je, da lahko z drugačnimi oblikami v zgodnji začetni fazi trka zmanjšamo pojemke skoraj za trikratno vrednost.

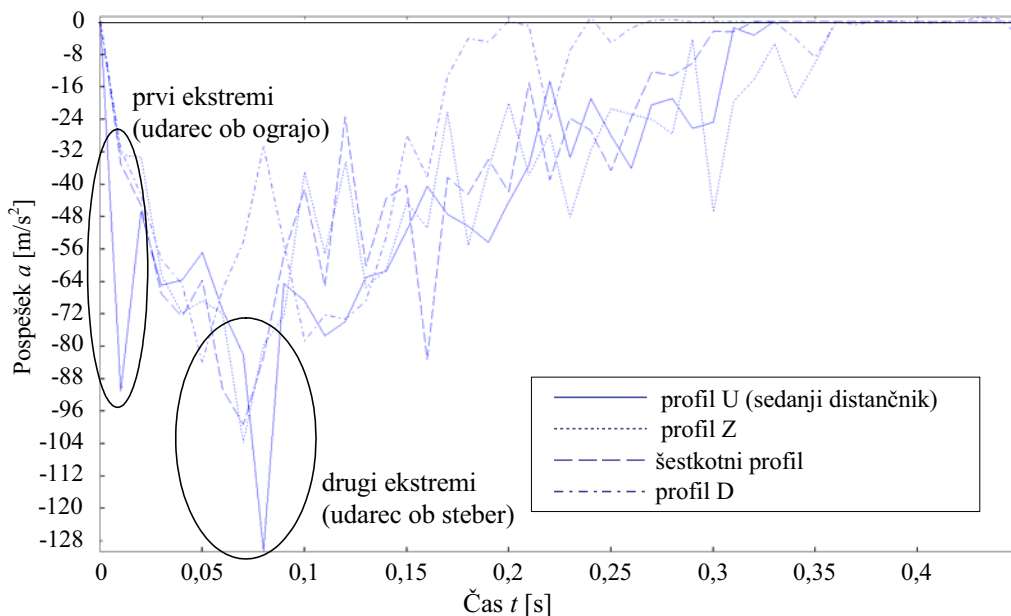
Primerjava rezultatov dokazuje, da sedanji distančnik v nobenem primeru ni ustrezen. Ugotovljeno je bilo, da lahko z drugačnimi oblikami distančnikov povečamo zmožnost absorpcije energije trka in tako posledično zmanjšamo pojemke, ki jih pri trku utrpijo potniki v vozilu.

6 SKLEP

Za vrednotenje različnih oblik distančnikov so bile izvedene nelinearne dinamične analize odseka cestne varnostne ograje pri naletu osebnega vozila, ki je bilo simulirano z odbojnikom. Rezultati računalniških simulacij kažejo, da lahko z drugačnimi oblikami distančnikov zmanjšamo togost varnostne ograje, omogočimo večjo zmožnost deformiranja in tako posredno zmanjšamo pojemke pri naletu vozila ter povečamo varnost potnikov v vozilu.

Računalniške simulacije dokazujejo, da je dosedanji distančnik pretog in je bil očitno konstruiran zgolj po geometrijskih pravilih ne glede na funkcionalnost in cestno varnost. Najboljše rezultate je dosegel distančnik šestkotnega profila, ki ima največjo zmožnost absorpcije energije trka. Njegova geometrijska oblika omogoča predvidljivo deformacijo in zaradi svoje simetričnosti ni občutljiv na kot trka vozila ob ograjo.

V nadaljnjih raziskavah bo simuliran nalet dejanskega modela vozila na varnostno ograjo in natančna določitev indeksov, ki zagotavljajo dovolj visoko raven varnosti v cestnem prometu. Velik vpliv na obnašanje ograje ima tudi podlaga, v katero je zabit steber, zato jo je v naslednjih računalniških simulacijah smiselno upoštevati.



Sl. 9. Pospeški vozila pri naletu na varnostno ograjo

7 LITERATURA

[1] Engstrand, K. E. (2000) Improvements to the weak - post W - beam guardrail. *Worcester: Worcester Polytechnic Institute.*
 [2] European Committee for Standardization (1998) European Standard EN 1317-1, EN 1317-2, Road Restraint Systems.
 [3] Livermore Software Technology Corporation (2001) LS-Dyna Keyword User's Manual.
 [4] Hitchings, D. (1992) NAFEMS – A finite element dynamics primer. *NAFEMS Birniehill, Glasgow.*
 [5] Ministrstvo za promet, Tehnična specifikacija za javne ceste, Urad za standardizacijo in meroslovje, Direkcija republike Slovenije za ceste (2001) TSC 02.xxx, Varnostne ograje, pogoji in načini postavitve.
 [6] Vesenjak, M., Z. Ren (2002) Konstruiranje distančnika cestne varnostne ograje. Kuhljevi dnevi '02, Ribno pri Bledu, 26.-27. september, *Zbornik del. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko.*

Naslov avtorjev: Matej Vesenjak
 prof. dr. Zoran Ren
 Univerza v Mariboru
 Fakulteta za strojništvo
 Smetanova 17
 2000 Maribor
 m.vesenj@uni-mb.si
 ren@uni-mb.si

Prejeto: 27.10.2003
 Received:

Sprejeto: 12.2.2004
 Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto
 Open for discussion: 1 year