

Elasto-plastična analiza deformiranja naprave za zaščito pred podletom za motorna vozila

Elasto-Plastic Deformation Analysis of a Rear-Underrun Protection Device for Load-Carrying Vehicles

Matej Glavač · Zoran Ren · Martin Prašnički

V prispevku je prikazan postopek računalniško podprtega simuliranja elasto-plastičnega deformiranja naprave za zaščito pred podletom od zadaj, ki omogoča oceno konstrukcijske rešitve pred homologacijo. Homologacijski pravilnik ECE R 58 namreč predpisuje način preskušanja zaščitne naprave, dopušča pa tudi, da zaščitno napravo poleg praktičnega preskušanja preverimo tudi z računalnikom. Prispevek prikazuje nadaljnji razvoj postopka elasto-plastičnega računalniškega simuliranja z metodo končnih elementov, ki smo ga predstavili na IAT 99 [5]. Rezultati elasto-plastične analize obetajo možnost optimiranja zaščitne naprave v fazi konstruiranja brez izvedbe praktičnih preskusov. Računalniško simuliranje tudi precej poceni postopek homologacije novih naprav.

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: naprave zaščitne, zaščita pred podletom, preskušanje, simuliranje računalniško)

The paper describes a procedure for simulating the elasto-plastic behaviour of a rear-underrun protection device (RUPD), which can be used to estimate whether the design fulfils the ECE R 58 regulation. This regulation prescribes practical device testing, but also allows a computational safety inspection of the protection device. The paper also includes the development of the elasto-plastic computational simulation using the finite-element method that was presented at IAT 99 [5]. The results of the elasto-plastic analysis simulations lead to the conclusion that this method can be used to optimize the RUPD in the design process without the need for practical testing. Computational simulation also reduces the cost of the approval procedure.

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

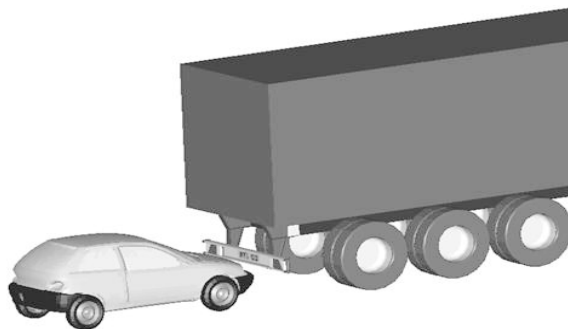
(Keywords: protection devices, rear underrun protection, experimental testing, computational simulations)

0 UVOD

Motorna tovorna vozila morajo imeti na zadnji površini vgrajeno zaščitno napravo, ki jo imenujemo tudi podletna zaščitna naprava. Njena naloga je, da prepreči zagozditve osebnega ali podobnega nizkega vozila pod tovornim vozilom pri naletu od zadaj (sl. 1). S tem je zagotovljena večja varnost potnikov.

0 INTRODUCTION

A load-carrying vehicle must be equipped at the rear with a safety device called a rear-underrun protection device (RUPD). It is intended to prevent vehicles being wedged under the chassis during accidental crashes from behind (Fig. 1). This device significantly increases the safety of road users.



Sl. 1. Naprava za zaščito pred podletom
Fig. 1. The rear underrun protection device (RUPD)

Pravilnik ECE R 58 [1] predpisuje pogoje, ki jih mora zaščitna naprava izpolnjevati, da proizvajalec zanjo pridobi ustrezno homologacijsko dovoljenje v Sloveniji. Ena najpomembnejših zahtev pravilnika določa največjo dovoljeno deformacijo zaščitne naprave pod vplivom sil, ki delujejo v smeri vzdolžne osi vozila. Pravilnik predpisuje praktični preskus naprave na preskuševališču z obremenjevanjem na določenih mestih. Kadar gre za zaščitno napravo samo, ki je namenjena za vgradnjo v neznano vozilo, je praktični preskus obvezen. Če je zaščitna naprava integrirana v nadgradnjo tovornega vozila, praktični preskus ni obvezen, če lahko z računom dokažemo, da zaščitna naprava zadostuje predpisu ECE R 58. Ker preskusna sila v večini primerov povzroči plastično preoblikovanje zaščitne naprave, je treba izvesti elasto-plastični preračun naprave.

V fazi konstruiranja zadovoljevanje izmer zaščitne naprave praviloma ne pomeni problema. Problem pa se pojavi pri optimiranju mase in trdnosti. Zaščitna naprava večji del svoje dobe trajanja ne rabi praktičnemu namenu, zato je z vidika gospodarnosti mase vozila zgolj nepotreben balast. Vendar pa mora naprava v primeru trka od zadaj učinkovito preprečiti zagozditev vozila pod karoserijo in s tem zmanjšati možnost kritičnih poškodb potnikov v nesreči udeleženega vozila.

Možnost računskega preverjanja zadostitve zahtevam predpisov za pridobitev homologacije je vspodbudila raziskavo uporabe računalniškega simuliranja deformiranja zaščitne naprave. V ta namen je bila uporabljena metoda končnih elementov, ki omogoča zelo dobro metazoritve elasto-plastičnega deformiranja zaščitne naprave pod obremenitvijo. Metoda je uporabna tudi že v zgodnji fazi razvoja, še preden je izdelan prvi prototip zaščitne naprave.

1 PRAKTIČNI PRESKUS PO PRAVILNIKU ECER 58

Pravilnik ECE R 58 natančno predpisuje izmere zaščitne naprave, odvisne tudi od izmer vozila, na katerega je vgrajena.

Predpisana preskusna sila deluje na zaščitno napravo prek hidravličnega bata, katerega naležna površina meri največ 250 mm v višino in 200 mm v širino ter mora biti na robovih zaobljena. Bat mora biti povezan z batnico preskusnega stroja s krogelnim zgibom, ki omogoča prosto prilagajanje naležne površine deformacijam zaščitne naprave.

Pravilnik ECE R 58 predpisuje tri različne obremenitvene primere glede na velikost preskusne sile in točko delovanja (sl. 2), in sicer:

P_1 – vodoravna sila velikosti 25 kN ali 12,5 % mase vozila, karkoli je manjše, ki deluje zaporedoma v

The ECE R 58 [1] regulation prescribes the conditions that must be fully met by the RUPD or the load-carrying vehicle, if such a vehicle is to be registered in Slovenia. The most important condition is the RUPD's resistance to loading forces acting along or parallel to the vehicle's longitudinal axis. The regulation also calls for practical RUPD testing on a testing machine, where the RUPD is subject to prescribed loads at some particular loading points. Practical testing is required for all standard mounted RUPDs. However, for a standard RUPD, which is already mounted on serial production vehicles or RUPD, and which is an integral part of the vehicle chassis, the practical testing is not necessary, if it can be proven with a calculation that the RUPD fully complies with the ECE R 58 regulations. Since the RUPD usually undergoes plastic deformation when subjected to the test forces, it is therefore necessary to perform an elasto-plastic analysis.

Usually it is not difficult to fulfil the design demands during the design phase of the RUPD. But a problem occurs as soon as the RUPD's mass and stiffness need to be optimized. During most of its lifetime the RUPD does not have a function and represents, from the economic viewpoint, only ballast. However, in the event of a crash, the RUPD prevents other vehicles from being wedged under the chassis and so reduces the level of critical injuries to road users involved in a crash.

The possibility of a computational RUPD safety inspection prompted research into the possibilities of a computational simulation of RUPD behaviour under loading. A computational simulation based on a finite-element method allows for a better estimation of the device's elasto-plastic deformation behaviour under a variety of loadings. The described method can also be used in the early development stage of the RUPD.

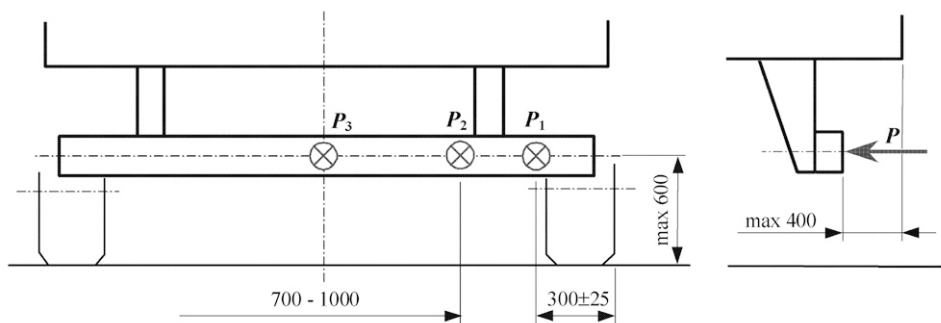
1 PRACTICAL DEVICE TESTING ACCORDING TO ECE R 58

The ECE R 58 regulation provides strict requirements in terms of device design depending on the dimensions of the vehicle that the protection device is mounted on.

The prescribed testing forces should be applied to the device via a loading surface not more than 250-mm high and 200-mm wide, with a radius at the vertical edges. The loading surface (piston) must be connected to the piston rod of the testing machine with a ball joint, which enables free adaptation of the loading surface to the deforming protection device.

The ECE R 58 regulation prescribes the following three different load cases in terms of the testing-force size and its loading position (Fig. 2):

P_1 – a horizontal force of 25 kN or 12,5% of the force generated by the maximum mass of the vehicle, whichever is smaller, should be applied



Sl. 2. Točke delovanja preskusnih sil
Fig. 2. The points of testing-force application

dveh točkah, ki sta oddaljeni 300 ± 25 mm od največje širine zadnje osi vozila proti sredini zaščitne naprave,

P_2 – vodoravna sila velikosti 100 kN ali 50 % mase vozila, karkoli je manjše, ki deluje v dveh točkah, ki sta simetrični glede na srednjo navpično ravnino naprave oziroma vozila in sta med seboj oddaljeni za 700 do 1000 mm,

P_3 – vodoravna sila velikosti 25 kN ali 12,5 % mase vozila, karkoli je manjše, ki deluje na srednji navpični ravnini zaščitne naprave.

Zaščitna naprava zadosti predpisu, če skupna oddaljenost točke, v kateri deluje preskusna sila, od zadnjega skrajnega roba vozila v vzdolžni osi vozila ne preseže vrednosti 400 mm med delovanjem preskusne sile.

2 RAČUNALNIŠKA ANALIZA ZAŠČITNE NAPRAVE

Za računalniško preverjanje zaščitne naprave je uporabljena metoda končnih elementov, ki da ob pravilni določitvi robnih pogojev zelo dobre rezultate tako v elastičnem kakor tudi v plastičnem področju deformiranja.

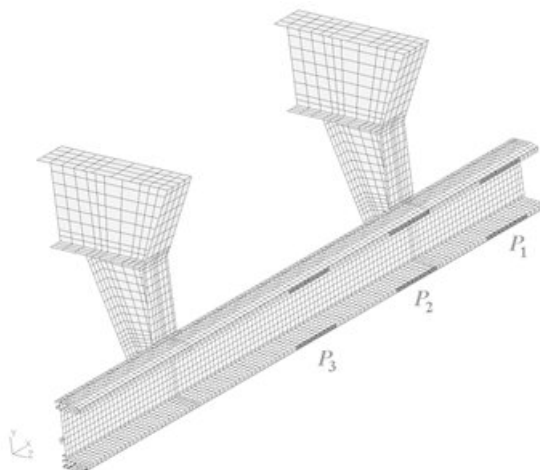
consecutively to two points located 300 ± 25 mm from the outer edges of the wheels on the rear axle towards the centre of the protection device, a horizontal force of 100 kN or 50% of the force generated by the maximum mass of the vehicle, whichever is smaller, should be applied consecutively to two points situated symmetrically about the vertical centre line of the device or the vehicle at a minimum distance apart of 700 mm and a maximum of 1000 mm,

P_3 – a horizontal force of 25 kN or 12,5% of the force generated by the maximum mass of the vehicle, whichever is smaller, should be applied at the median vertical plane of the protection device.

The protection device can be approved if during and after testing with the prescribed forces the horizontal distance between the RUPD and the outermost rear end of the vehicle does not exceed 400 mm.

2 COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE PROTECTION DEVICE

The finite-element method was used for the computational analyses of the protection device. If the boundary conditions are well defined, this method gives very good results in the elastic and elasto-plastic regions of deformation.



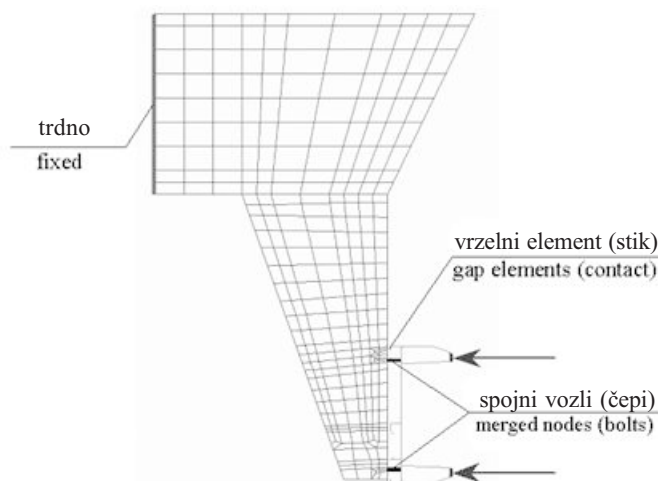
Sl. 3. Zamrežen model zaščitne naprave
Fig. 3. Discretised model of the protection device

Analizirana zaščitna naprava je sestavljena iz dveh pokončnih stebrov in prečnega profiliranega nosila (branik). Prečno nosilo je privijačeno na pokončna stebra s štirimi vijaki.

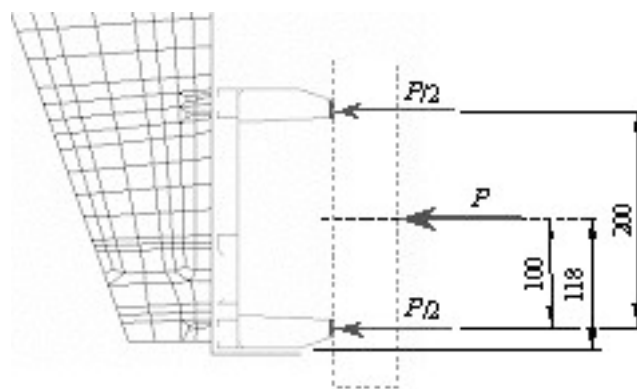
Pokončna stebra sta izdelana iz jekla z naslednjimi podatki: modul elastičnosti $E_{el} = 2,068 \times 10^5$ MPa, modul plastičnosti $E_{pl} = 2,068 \times 10^4$ MPa, Poissonovo število $\nu = 0,29$, meja plastičnosti $\sigma_y \geq 260$ MPa ter porušitvena trdnost $\sigma_M \geq 420$ MPa. Prečni profiliran branik je izdelan iz aluminijaste zlitine s podatki: $E_{el} = 7,5 \times 10^4$ MPa, $E_{pl} = 7,5 \times 10^3$ MPa, $\nu = 0,33$, $\sigma_y = 195$ MPa ter $\sigma_M = 216$ MPa.

The subject of our computational analysis is a real protection device that consists of two vertical pillars and a transversal cantilever. The transversal profile is fastened onto vertical pillars with four bolts.

The vertical pillars are made of steel profiles with the following properties: Young's modulus $E_{el} = 2,068 \times 10^5$ MPa, Poisson's ratio $\nu = 0,29$, yield stress $\sigma_y \geq 260$ MPa and ultimate stress $\sigma_M \geq 420$ MPa. The transversal profile is made of aluminium alloy with the following properties: $E_{el} = 7,5 \times 10^4$ MPa, $\nu = 0,33$, $\sigma_y = 195$ MPa and $\sigma_M = 216$ MPa.



Sl. 4. Stranski pogled zaščitne naprave in robni pogoji
Fig. 4. Side view of the protection device and boundary conditions



Sl. 5. Obremenitev zaščitne naprave
Fig. 5. The loading of the protection device

Zaščitna naprava je modelirana enako, kakor je to razloženo v [5] (sl. 3).

Model sestoji iz 11480 štirikotnih tankostenskih lupinskih končnih elementov. V področju vijasnih zvez med stebroma in branikom so vozlišča končnih elementov spojena. Na mestih naleganja prečnega branika in navpičnega stebra je med oba vstavljenih 384 posebnih vrzelnih elementov, ki med numeričnim reševanjem problema zagotavljajo stik (sl. 4).

Glede na glavne podatke vozila in zaščitne naprave ter pogoje praktičnega preskusa [5], so

The protection device is modelled as described in [5] (Fig. 3).

The model is fully discretised with 11480 thin-shell linear four-noded finite elements. The bolt connections of the transversal and vertical profiles are modelled by merging the nodes on the flanges, which resemble 4 bolt connections. At points where the transversal and vertical profiles contact, 384 special gap elements are used, which ensure contact between the profiles during the computational analysis (Fig. 4).

Following from the basic vehicle and protection-device data and the requirements of

določene velikosti preskusnih sil P_1 , P_2 in P_3 in lega točk obremenjevanja na naletni površini prečnega branika (sl. 3, 5):

v vodoravni smeri:

$P_1 = 25$ kN levo ali desno v razdalji 950 mm od srednje navpične ravnine naprave,

$P_2 = 100$ kN levo ali desno v razdalji 500 mm od srednje navpične ravnine naprave,

$P_3 = 25$ kN na srednji navpični ravnini naprave,

v navpični smeri:

P_1, P_2 in P_3 : 100 mm od spodnjega roba prečnega profila.

Preskusna sila je predpisana kot normalni tlak na končne elemente v območju naleganja površine preskusnega bata na zaščitno napravo.

Za analizo po metodi končnih elementov sta bila uporabljena programska paketa I-DEAS Master Series 8.0 [4] ter MSC.Nastran 70. 5 [6]. I-DEAS Master Series je rabil za pripravo mreže končnih elementov ter predstavitev rezultatov analize, MSC.Nastran pa za dejanski preračun po metodi končnih elementov. Ker program I-DEAS ne podpira celotnega zapisa v formatu MSC.Nastran za nelinearno analizo, je bila v vmesno datoteko zapisana zgolj geometrijska oblika končnih elementov. Fizikalne in materialne lastnosti ter nadzorni parametri preračuna pa so bili v vhodno datoteko programa MSC.Nastran vneseni ročno.

Za preveritev modela je bila v prvi fazi izvedena elastična analiza z modulom MSC.Nastran 101. Za elasto-plastično analizo zaščitne naprave je bil uporabljen modul MSC.Nastran 106, ki omogoča statično nelinearno elasto-plastično analizo. Pri tem je bila lupinским končnim elementom samodejno omejena 6. prostostna stopnja (rotacija okoli normalne osi lupinastega končnega elementa), ki v formulaciji elementa matematično ni definirana. S tem je bila zagotovljena stabilnost numeričnega preračuna.

Za vsako lego delovanja preskusne sile sta bila predpisana po dva obremenitvena primera. Prvi je obsegal obremenitev zaščitne naprave z imensko vrednostjo preskusne sile, drugi pa popolno razbremenitev. Slednji obremenitveni primer je rabil za določitev preostale trajne deformacije. Zaradi nelinearnosti numeričnega preračuna je bila obremenitev po korakih večana v dvajsetih enakih prirastkih (od 0 do P_x), medtem ko je razbremenitev potekala v desetih enakih korakih (od P_x do 0). Togostna matrika sistema je bila obnovljena pri vsakem prirastku obremenitve.

3 PRIMERJAVA REZULTATOV

Deformacije zaščitne naprave pod preskusnimi silami so prikazane na slikah 6, 7 in 8.

Primerjava rezultatov praktičnega preskusa in računalniškega simuliranja je podana v preglednici 1. Kot pomik pod silo je v primeru

praktičnega testiranja (glej [5]), velikost in aplikacijske pozicije testnih sil P_1 , P_2 in P_3 na površini prečnega profila so (glej Fig. 3, 5):

in vodoravni smeri:

$P_1 = 25$ kN levo ali desno v razdalji 950 mm od mediane navpične ravnine naprave,

$P_2 = 100$ kN levo ali desno v razdalji 500 mm od mediane navpične ravnine naprave,

$P_3 = 25$ kN v mediani navpični ravnini naprave,

in v navpični smeri:

P_1, P_2 in P_3 : 100 mm od spodnjega roba prečnega profila.

Testne sile so uporabljene kot konstantna normalna tlaka na končne elemente v območju naleganja površine preskusnega bata na zaščitno napravo.

Za analizo po metodi končnih elementov sta bila uporabljena programska paketa SDRC/I-Deas 8.0 [4] in MSC.Nastran 70.5 [6]. I-Deas 8.0 je bil uporabljen za pripravo mreže končnih elementov in vizualizacijo rezultatov analize, MSC.Nastran pa za dejanski preračun. Ker program I-Deas ne podpira celotnega zapisa v formatu MSC.Nastran za nelinearno analizo, je bila v vmesno datoteko zapisana zgolj geometrijska oblika končnih elementov. Fizikalne in materialne lastnosti ter nadzorni parametri preračuna pa so bili v vhodno datoteko programa MSC.Nastran vneseni ročno.

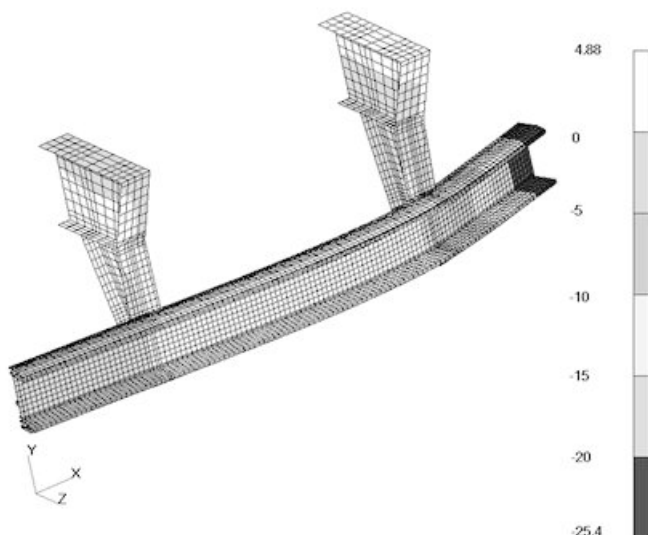
Za preveritev modela je bila v prvi fazi izvedena elastična analiza z modulom MSC.Nastran 101. Za elasto-plastično analizo zaščitne naprave je bil uporabljen modul MSC.Nastran 106, ki omogoča statično nelinearno elasto-plastično analizo. Pri tem je bila lupinским končnim elementom samodejno omejena 6. prostostna stopnja (rotacija okoli normalne osi lupinastega končnega elementa), ki v formulaciji elementa matematično ni definirana. S tem je bila zagotovljena stabilnost numeričnega preračuna.

Za vsako lego delovanja preskusne sile sta bila predpisana po dva obremenitvena primera. Prvi je obsegal obremenitev zaščitne naprave z imensko vrednostjo preskusne sile, drugi pa popolno razbremenitev. Slednji obremenitveni primer je rabil za določitev preostale trajne deformacije. Zaradi nelinearnosti numeričnega preračuna je bila obremenitev po korakih večana v dvajsetih enakih prirastkih (od 0 do P_x), medtem ko je razbremenitev potekala v desetih enakih korakih (od P_x do 0). Togostna matrika sistema je bila obnovljena pri vsakem prirastku obremenitve.

3 COMPARISON OF RESULTS

Deformation of the protection device under the testing force is shown in Figures 6, 7 and 8.

The comparison of the practical testing and the computer simulation results is given in Table 1. For the case of the practical testing the displacement



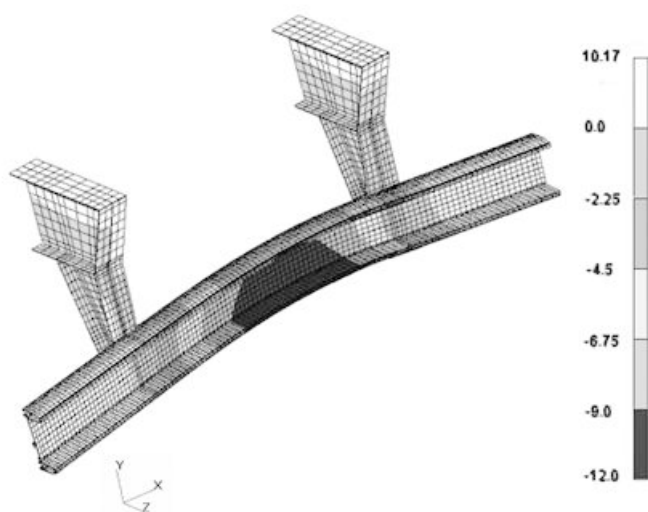
Sl. 6. Pomiki (mm) strukture zaščitne naprave pod preskusno silo P_1
 Fig. 6. Displacements (mm) of the protection device under test force P_1

preskusa upoštevan pomik preskusnega bata (središča obremenjevalne površine), merjen med obremenjevanjem zaščitne naprave, v primeru računalniškega simuliranja pa povprečni pomik srednje linije zgornje in spodnje naletne površine v območju obremenitve. Trajni pomik je pomik zaščitne naprave na mestu delovanja sile, ki pri praktičnem preskusu ostane po razbremenitvi. Primerjava rezultatov kaže na dobro ujemanje simuliranih pomikov s pomiki, izmerjenimi pri preskusu.

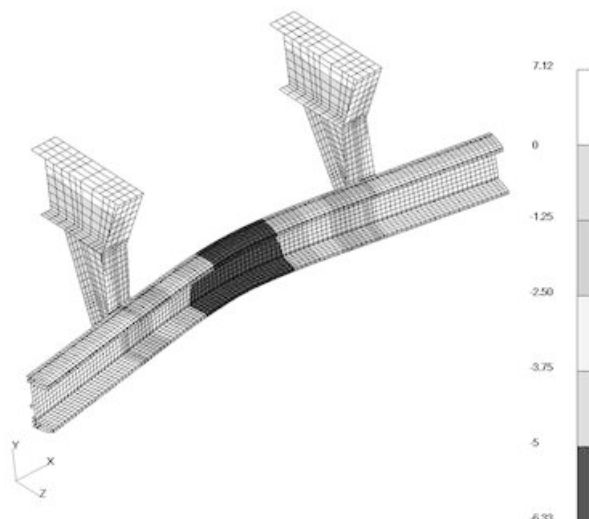
Preskušana naprava vsekakor zadovoljuje homologacijske zahteve, saj je skupna največja vodoravna razdalja med deformirano zaščito in skrajnim zadnjim robom vozila enaka $150 + 21 = 171$ mm in tako ni večja od dovoljene največje razdalje 400 mm.

under force is the displacement of the loading piston (the centre of the loading surface) measured during the force application to the protection device, while in the case of the computational simulation this is the average displacement on the median vertical line of the lower and upper contact loading surface. The permanent displacement is the displacement of the protection device still present at the point of force application after the unloading during practical testing. The comparison of results indicates good agreement between simulated and actually measured displacements during testing.

The tested device fully complies with the requirements, since the total largest horizontal distance between the RUPD and the outermost rear end of the vehicle is equal to $150 + 21 = 171$ mm, which is well below the allowable distance of 400 mm.



Sl. 7. Pomiki (mm) strukture zaščitne naprave pod preskusno silo P_2
 Fig. 7. Displacements (mm) of the protection device under test force P_2



Sl. 8. Pomiki (mm) strukture zaščitne naprave pod preskusno silo P_3
 Fig. 8. Displacements (mm) of the protection device under test force P_3

Preglednica 1. Primerjalne vrednosti rezultatov preskusa in računalniškega simuliranja
 Table 1. Comparison of test and computational simulation results

Obremenitveni primer Loading case	Preskusna sila Testing force [kN]	Pomik pod silo Displacement under force [mm]		Trajni pomik Permanent displacement [mm]	
		Preskus Test	Simulacija Simulation	Preskus Test	Simulacija Simulation
P_1	25	21	20	4	5
P_2	100	12,4	10,8	3	2,3
P_3	25	7,6	6,3	0,5	0,5

4 SKLEP

Prispevek prikazuje možnost uporabe računalniško podprtega simuliranja homologiranja naprave za preprečevanje podleta od zadaj. Rezultati elasto-plastične analize se dobro ujemajo s praktičnim preskusom. To vodi k ugotovitvi, da se predstavljena metoda lahko uporabi za homologacijo zaščitnih naprav. Ker je potrebno zgolj virtualno testiranje, in ne drago praktično testiranje, so prihranki pri postopkih homologacije zaščitnih naprav precejšnji. MSC. Nastran se je izkazal kot primerno in učinkovito orodje za izvajanje takšnih analiz. Metoda je uporabna tudi za konstruiranje in optimiranje novih podletnih naprav in se s tem namenom trenutno uporablja v podjetju RTI d.o.o.

4 CONCLUSION

The paper illustrates the possibilities of applying computational simulation for the purpose of RUPD approval. The results of elasto-plastic computational analysis show a good agreement with the experimental results. This leads to the conclusion that the presented computational procedure can be safely used for approval of the RUPD. The potential savings are substantial, since only virtual testing is required, which is far cheaper than regulated experimental testing. The MSC.Nastran system is clearly an appropriate and extremely efficient tool for such simulations. The procedure is also suitable for design and optimisation of new RUPDs and is currently being used in RTI for this purpose.

5 REFERENCE 5 REFERENCES

- [1] Odredba o homologiranju naprav za preprečevanje podleta od zadaj, vozil glede na montažo naprav za preprečevanje podleta in vozil glede na zaščito pred podletom (št. 58.01), *Uradni list Republike Slovenije*, št. 3, 20.1.1995, 182-183.

- [2] Zienkiewicz, O.C, and R.L. Taylor (1989) The finite element method, IVth Ed., Volume 1 – Basic formulation and linear problems, *McGraw-Hill Book Company*.
- [3] Zienkiewicz, O.C, and R.L. Taylor (1991) The finite element method, IVth Ed., Volume 2 – Solid and fluid mechanics dynamics and non-linearity, *McGraw-Hill Book Company*.
- [4] I-DEAS-Master series, *User's Guides*, 1997
- [5] Ren, Z., M. Prašnički, M. Glavač (1999) Računalniško preverjanje ustreznosti zaščitne naprave pred podletom motornih tovornih vozil, *Strojniški vestnik 11*.
- [6] MSC.Nastran-Handbook for nonlinear analysis, 1992.

Naslova avtorjev: Matej Glavač
mag. Martin Prašnički
RTI d.o.o.
Ptujška 184
2000 Maribor

prof.dr. Zoran Ren
Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo
Smetanova 17
2000 Maribor

Authors' Addresses: Matej Glavač
M.Sc. Martin Prašnički
RTI Ltd.
Ptujška 184
2000 Maribor, Slovenia

Prof.Dr. Zoran Ren
University of Maribor
Faculty of Mechanical Eng.
Smetanova 17
2000 Maribor, Slovenia

Prejeto: 21.8.2001
Received:

Sprejeto: 7.12.2001
Accepted: