

FRI-1.317-1-MEMBT-09

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS W-BEAM GUARDRAIL DESIGNS¹

Eng. Metodiy Steliyanov, PhD Student

Department of Transport,
 “Angel Kanchev” Univesity of Ruse
 Phone: (+359) 0876 308 849
 E-mail: metodiy@abv.bg

Prof. Ivelin Ivanov

Department of Engineering Mechanics,
 “Angel Kanchev” Univesity of Ruse
 Phone: (+359) 0887 745 811
 E-mail: ivivanov@uni-ruse.bg

Abstract: *The structural integrity and crashworthiness of roadside W-beam guardrail systems are essential for occupant safety during collision scenarios. Standard W-beam constructions often need vertical steel posts positioned at 2.0 metres to satisfy Test Level 3 (MASH) performance standards. Nonetheless, practical limitations, such as shallow subterranean utilities, sometimes inhibit the installation of a post, requiring alternative solutions. This research examines the effectiveness of a modified W-beam system with double-layered rails, bolted in tandem, that extend 4.0 metres between two posts. A comprehensive finite element model was created in LS-DYNA to simulate vehicle collision dynamics and evaluate barrier deflection, energy absorption, and structural performance. Concurrent analytical computations were conducted in MATLAB employing EN 1317-1 to assess the Theoretical Head Impact Velocity (THIV) and Acceleration Severity Index (ASI). The LS-DYNA findings indicated that the redesigned barrier sustained deflection levels within permissible TL-3 limits during impact situations. The analytical results aligned well with the simulation data, validating the proposed architecture. The results validate that a twin W-beam layout may offset the absence of a post and maintain safety performance. This study offers engineers a verified, simulation-driven option for barrier design in restricted highway settings.*

Keywords: *W-beam, Model, LS-DYNA, FEM, THIV, ASI, simulation, crashworthiness, modified guard rail.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на пътните обезопасителни системи (ПОС) отразява напредъка на съвременната пътнотранспортна инфраструктура. Един от най-често използваните елементи в тази категория е двувълнестата стоманена преграда (ДСП), която играе съществена роля за предотвратяване на тежки пътнотранспортни произшествия. На международния пазар този продукт е по-известен под наименованието *W-beam guardrail*, чийто стандартен монтаж изисква машинно набиване на вертикални стоманени пилони (стълбчета) през всеки 2,0 m.

Тези конструкции могат да бъдат изградени над важна подземна инженерна инфраструктура. Но често тръбопроводите или кабелни трасета се оказват разположени плитко под пътната настилка и под ъгъл спрямо оста на пътя, което налага нарушаване на идеалната подредба на стълбчетата. В някои случаи се налага пропускане на инсталирането на един от тях. Такива случаи пораждаат основателния въпрос: възможно ли е да се запази изискуемото ниво на безопасност при нестандартна конфигурация на опорите?

Настоящото изследване разглежда едно потенциално инженерно решение, което компенсира липсващото стълбче чрез болтово съединена, една зад друга удвоена шина, с цел

¹ Докладът е представен на научната сесия на секция „Механика и машиностроителни технологии“ на 24 октомври 2025 г. с оригинално заглавие на български език: СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РАЗЛИЧНИ КОНСТРУКЦИИ НА ДВУВЪЛНЕСТА ПЪТНА ПРЕГРАДА

повишаване на коравината на системата в рамките на 4,0-метровата отсечка. Макар този тип модификации да намират широко приложение в практиката, липсват научно обосновани публикации, които да документират тяхната ефективност чрез утвърдени методи за инженерно моделиране и симулация.

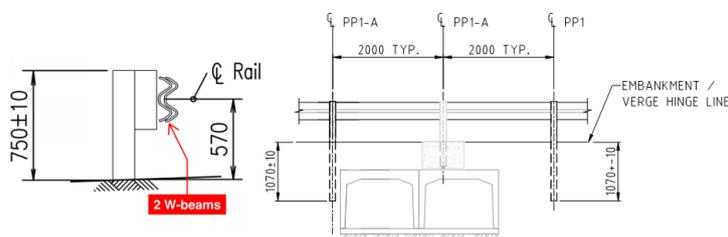
В тази връзка, настоящото изследване прилага комбиниран подход, включващ:

- (1) числено моделиране чрез метода на крайните елементи (МКЕ) с помощта на софтуера LS-DYNA, симулиращо изпитване по ниво TL-3 съгласно стандартите на MASH, и
- (2) аналитични изчисления в MATLAB, в съответствие с EN 1317-1, за определяне на ключовите показатели за безопасност — THIV (теоретична скорост на удар на главата) и ASI (коефициент на влияние на ускорението).

Целта е да се оцени дали широко прилаганото в практиката решение с двойна греда може действително да компенсира липсващата опора, без компромис със защитната функция на системата.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Анализът на съществуващата научна литература показва липса на изследвания, които да са насочени към специфичната конфигурация, разглеждана в настоящото проучване – болтово съединени, удвоени W-шини, разположени на 4 m една от друга (фиг.1), подложени на удар под ъгъл от 20° от моторно превозно средство с маса 1500 kg. Въпреки това изследванията на подобни теми косвено подкрепят тезата, че деформацията на сдвоената греда може да бъде успешно контролирана. Макар данните да не са директни съвпадения, те предлагат полезна корелативна информация. Като липсата на действителни изследвания на тази конкретна модификация дава шанс за уникално проучване и принос в областта.



Фиг. 1. Модификация тип двойна застъпка.

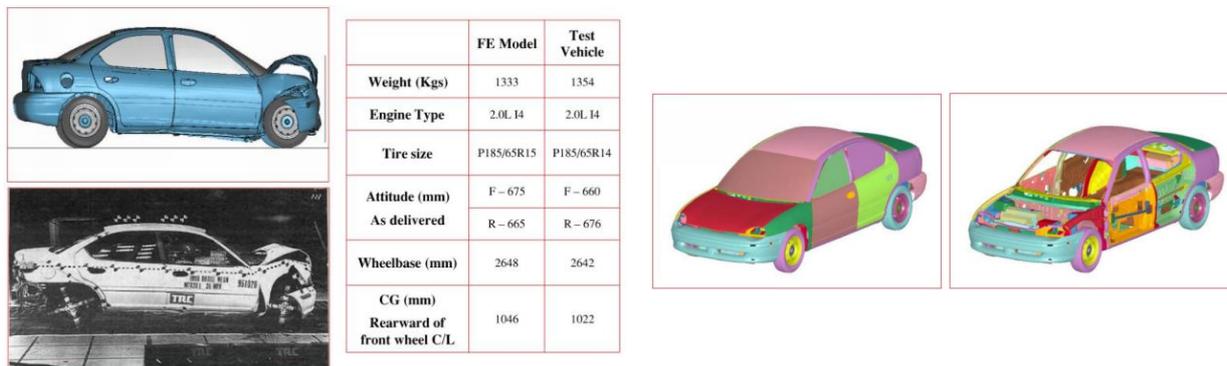
Сравнителният анализ разглежда и оценява ефективността на безопасността на три различни конструкции на мантинела с двувълнеста греда, като се позовава на числени симулации и констатации от съществуващата литература. Условното означение на разглежданите три конструкции е следното:

- „1w2m“ – стандартна конструкция с единична греда и стълбове през 2 m;
- „1w4m“ – модифицирана конструкция с единична греда и премахнато стълбче;
- „2w4m“ – модификация тип двойна греда със застъпване и премахнато стълбче,

които са подложени на едни и същи ударни условия и се сравняват с проучването на Teng et al. (2015), в което са изследвани двувълнести конфигурации на ПОС с различни разстояния между стълбчетата. Основните показатели за оценка на съоръжението включват коефициент на влияние на ускорението (ASI) и теоретична скорост на удара на главата (THIV) и работна ширина, т.нар. зона на действие (WN) на ПОС.

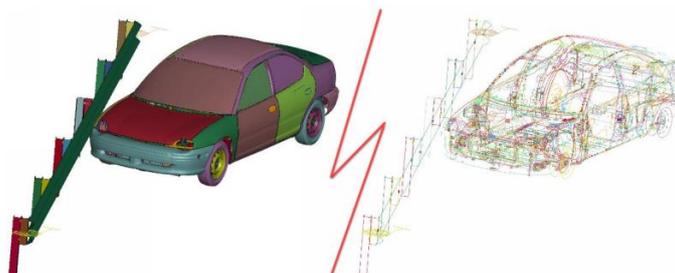
За целите на изследването е използван предварително разработен модел на автомобил Dodge Neon (фиг. 2), създаден по метода на крайните елементи (МКЕ) с помощта на софтуера LS-DYNA. Моделът е предназначен основно за симулации на челни удари и е валидиран от програмата NCAP. Поради повишената сложност на страничните удари (в случая удар под

тъгъл от 20°) модела на МПС е допълнително опростен, с цел постигане на устойчива и изчислително ефективна симулация. Автомобилът е трансформиран в идеално



Фиг. 2. МКЕ модел 1996, версия 7 на FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center.

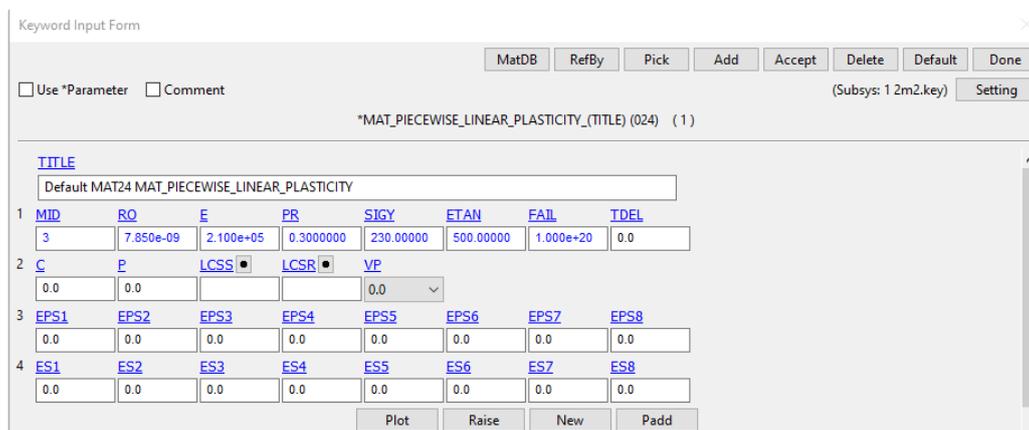
твърдо тяло с маса от 1500 kg (фиг. 3), което кореспондира на средно натоварен малък европейски седан – Ауди А3, 1.9 TDI (тегло празен 1200 kg и максимално допустимо тегло 1760 kg). Центърът на тежестта, както и главните масови инерционни моменти на оригиналният модел са запазени и се съпротивляват на ускорението на въртенето около осите.



Фиг. 3. Общ изглед на фактическия модел.

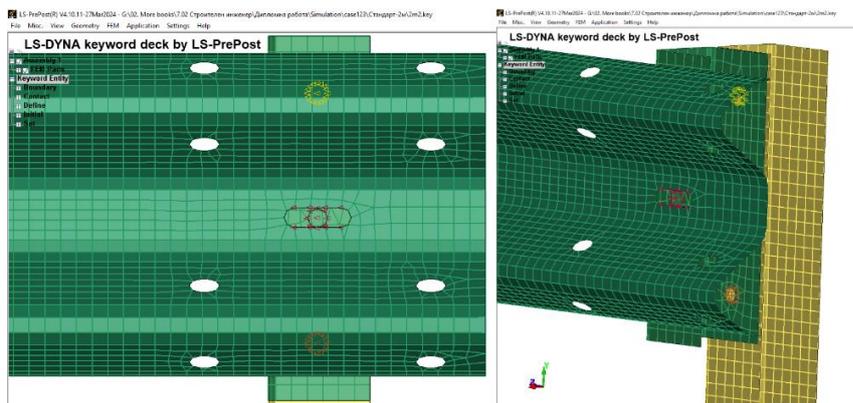
Подготовката на конструктивния модел за анализ на удар с използването на LS-DYNA изисква шест ключови стъпки:

- (1) Създаване на геометричен модел на конструкцията на ПОС с помощта на CAD софтуер.
- (2) Дефиниране на нелинейните свойства на материалите (якост, еластичност и пластичност), за да се моделира реалното поведение на конструкцията по време на удар (фиг. 4).



Фиг. 4. Параметри на ПОС.

(3) Мрежова дискретизация (фиг. 5).



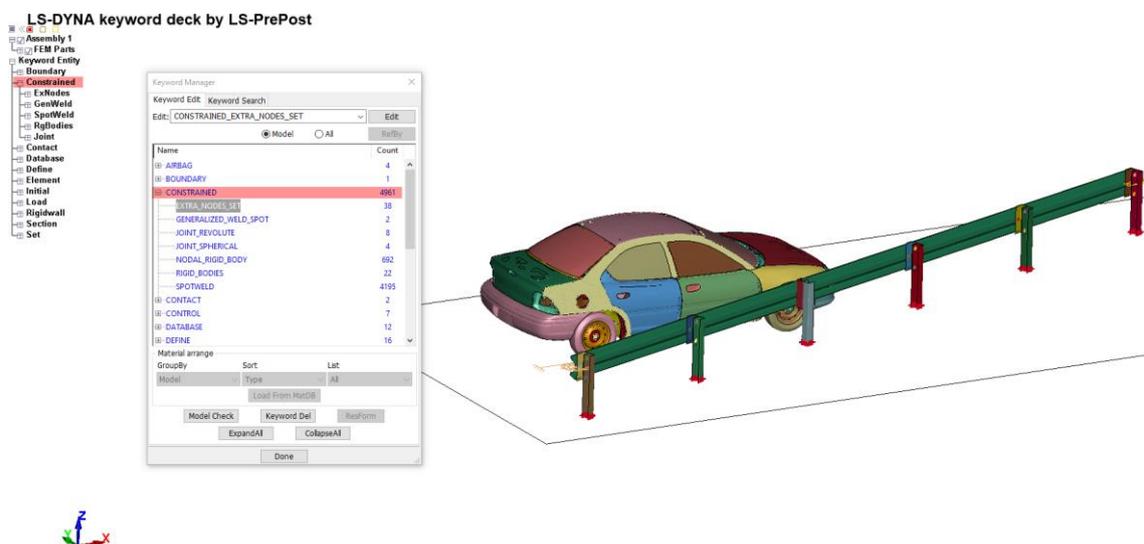
Фиг. 5. Общ изглед на мрежовата дефиниция в зоните с високо натоварване.

(4) Дефиниране на гранични условия и натоварвания.

(5) Дефиниране на контактите алгоритми за взаимодействието между различните части на модела по време на удар – „surface-to-surface“.

(6) Дефиниране на минимална времева и интеграционна стъпка за осигуряване точни и стабилни резултати от симулацията.

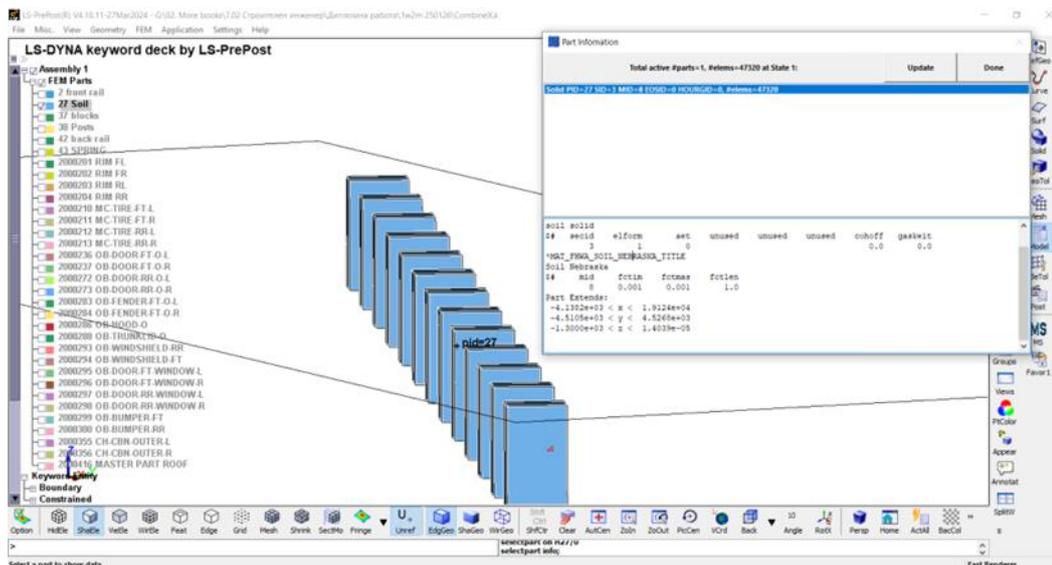
За целите на модела са приложени следните ограничителни функции: „ExNodes, GenWeld, SpotWeld, Rigid Bodies“ и „Joints“, като общият брой зададени връзки е 4961 (фиг.5)



Фиг. 5. Брой и тип връзки на модела.

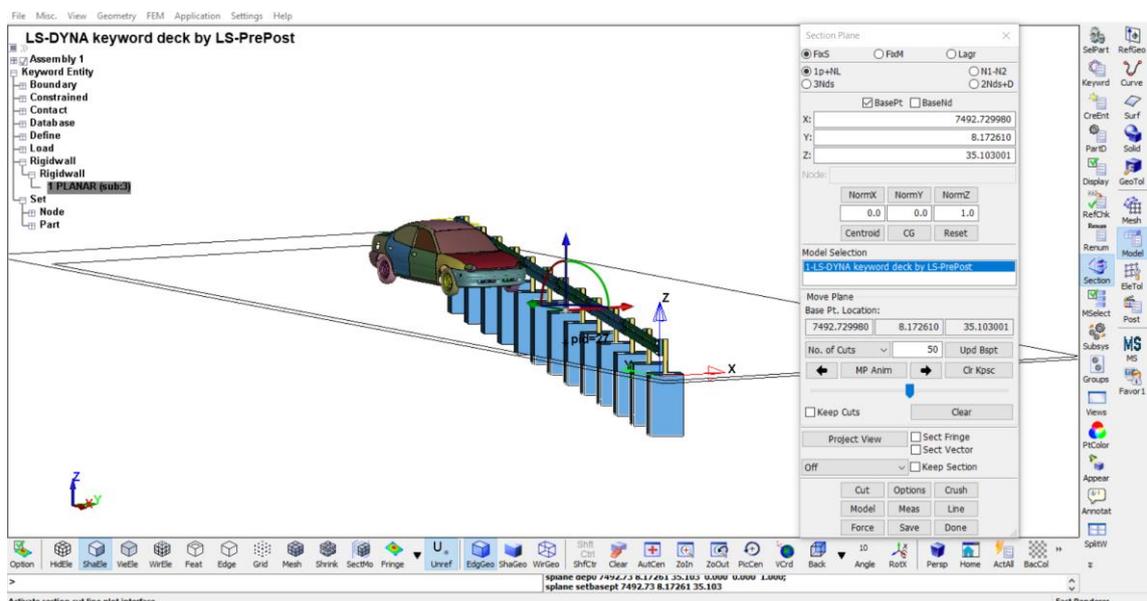
Моделът на почвата избран за приложение в симулацията на LS-DYNA е MAT_FHWA_SOIL_NEBRASKA. Този тип материал е одобрен с доклад No: FHWA-HRT-04-095 на центъра за изследване и развитие на Федералната магистрална администрация на САЩ през 2004 година (фиг. 6). Той осигурява реалистично представяне на взаимодействието между почвените слоеве, земната деформация и поглъщането на енергия (Lewis, 2004). Използваният голям брой крайни елементи (47 320) позволява моделиране с висока пространствена разделителна способност, при което са приложени следните настройки: - $FCTIM = 0,001$; $FCTMAS = 0,001$ и $FCTMAS = 0,001$. Това позволява улавяне на въртене на стълба и изместване, критично за оценка на ефективността на мантинелата. Тези настройки

са в съответствие с препоръките на FHWA за симулации на бариери за безопасност на магистрала (Lee, 2019).



Фиг. 6. Почвен модел „Небраска“.

Последният тип специално гранично условие, използвано в LS-DYNA за симулиране на неподвижна и безкрайно твърда повърхност, е функцията Rigidwall (фиг. 7). Въвеждането на този елемент в симулацията гарантира, че силите се пренасят правилно през конструкцията без допълнителни деформации.



Фиг. 7. Гранично състояние „Rigidwall“.

Математическият апарат, използван в симулацията с LS-DYNA, се основава на явно (explicit) времево интегриране. Приложеният анализ е транзитен, тъй като проследява прехода между две равновесни състояния, предизвикан от краткотрайно ударно въздействие. Тези процеси се характеризират с висока динамичност и нелинейност, което налага използването на прецизен времеви дискретизационен подход в уравнението на динамиката за механична система с много степени на свобода (Иванов, 2023):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

където силите $\mathbf{f}(t)$ от външното натоварване в зоната на удара, която е зависима от времето на действие t ; \mathbf{d} е преместването; \mathbf{M} е масовата матрица, в случая на автомобила и на обезопасителната преграда; \mathbf{C} е демпферната матрица и включва загуба на енергия поради триене и материални свойства; а \mathbf{K} е коравинна матрица, която зависи от характеристиките на материала.

Диференциалното уравнение на динамиката се интегрира по времето чрез дискретизация на стъпки Δt . За стъпка n и време $n \Delta t$ е валидно уравнението на динамиката:

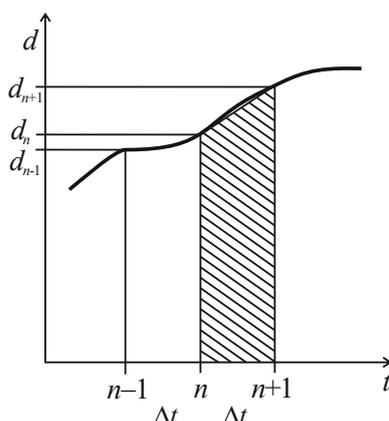
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_n + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_n + \mathbf{K}_n\mathbf{d}_n = \mathbf{f}_n \quad (2)$$

Като при явното интегриране преместването има следната форма:

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{f}(\mathbf{d}_n, \dot{\mathbf{d}}_n, \ddot{\mathbf{d}}_n, \mathbf{d}_{n-1}, \dots) \quad (3)$$

За оценка на производните по времето се използва метод, при който преместването се дискретизира в три точки от времето (фиг. 8):

$$\dot{\mathbf{d}}_n = \frac{1}{2\Delta t}(\mathbf{d}_{n+1} - \mathbf{d}_{n-1}), \quad \ddot{\mathbf{d}}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(\mathbf{d}_{n+1} - 2\mathbf{d}_n + \mathbf{d}_{n-1}) \quad (4)$$



Фиг. 8. Триточково интегриране и правило на трапеците.

Оценката на скоростта се извършва чрез изместване с половин стъпка във времето назад:

$$\dot{\mathbf{d}}_{n-1/2} = \frac{1}{\Delta t}(\mathbf{d}_n - \mathbf{d}_{n-1}), \quad (5)$$

Единствената неизвестна величина е ускорението, като интегрирането във времето при съсредоточена масова матрица се извършва повъзлово, като преди това вътрешните сили и вискозните дисипативни сили са оценени поелементно:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}_n = \mathbf{f}_n - \mathbf{K}_n\mathbf{d}_n - \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}}_{n-1/2} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{d}}_{n+1/2} = \dot{\mathbf{d}}_{n-1/2} + \Delta t \ddot{\mathbf{d}}_n, \quad \mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \Delta t \dot{\mathbf{d}}_{n+1/2}.$$

Методът е особено ефективен, тъй като не изисква решаване на системи линейни уравнения, което елиминира необходимостта от многократни операции по обръщане на матрици. Недостатък обаче е ограничението върху времевата стъпка, което налага извършването на голям брой итерации за проследяване на състоянието на механичната система.

Алгоритъмът за контакт внедрен в LS-DYNA е основен за симулацията на удар, тъй като той моделира динамиката на повърхностните взаимодействия. Той се базира на два

основни метода: наказателна коравина “penalty based” и прилагане на кинематични ограничения, включително обвързване или плъзгане, за регулиране на взаимодействията. За всеки проникнал възел се прилага сила нормална на сегмента и пропорционална на проникването с коефициент равен на контактната коравина k , която се пресмята по формулата:

$$k = \frac{2\alpha KA^2}{V}, \quad (7)$$

където α е мащабен коефициент; K е еластичния модул на обемните деформации на материала на сегмента; A е площ на сегмента и V е обема на елемента на сегмента за пространствени елементи.

За черупковите крайни елементи, които определят сегмента важи уравнението:

$$k = \frac{2\alpha KA}{\max d}, \quad (8)$$

където d е диагонала на черупковия елемент на сегмента.

Оценката на ускорението на изпитателния автомобил служи за анализ на взаимодействията, възникващи при удар между МПС и ПОС. Тази оценка е от съществено значение, тъй като при сблъсък МПС може рязко да промени скоростта и посоката си на движение. Това ще доведе до повишени претоварвания, потенциални наранявания на пътниците и до по-значителни материални щети. С оглед на това се извършва количествено квалифициране на въздействието чрез определяне на силите, които влияят върху пътниците в автомобила. Това се осъществява в съответствие с EN 1317-1 и посредством параметрите коефициент на влияние на ускорението – ASI и теоретична скорост на удар на главата – THIV, които служат като индикатори за нивото на въздействие върху човешкото тяло при удар. За изчисляването на тези параметри са създадени скриптове в MATLAB (фиг. 9 и 10).

```

% Severity index calculation
% ASICALC.m file
clear all
format compact
M=csvread('CGaccelXYZ.csv',2,0);
time=M(:,1); Ax=M(:,2)/9810; Ay=M(:,4)/9810;
Az=M(:,6)/9810;
figure
plot(time,Ax,time,Ay,time,Az)
title('Unfiltered Accelerations')
xlabel('time, s')
ylabel('acceleration, g')
legend('a_x','a_y','a_z','Location','southeast')
grid on

N = length(Ax);
T=time(end)/N;
wd = 2*pi*13;
wa = tan(wd*T/2);
a0 = wa^2/(1+wa*sqrt(2)+wa^2);
a1 = 2*a0;
a2 = a0;
b1 = -2*(wa^2-1)/(1+wa*sqrt(2)+wa^2);
b2 = (-1+wa*sqrt(2)-wa^2)/(1+wa*sqrt(2)+wa^2);

% Filtering 1-st pass
X1(1) = a0*Ax(1); Y1(1) = a0*Ay(1); Z1(1) = a0*Az(1);
X1(2) = a0*Ax(2)+a1*Ax(1)+b1*X1(1);
Y1(2) = a0*Ay(2)+a1*Ay(1)+b1*Y1(1);
Z1(2) = a0*Az(2)+a1*Az(1)+b1*Z1(1);
for k=3:N;
    X1(k) = a0*Ax(k)+a1*Ax(k-1)+a2*Ax(k-2)+b1*X1(k-1)+b2*X1(k-2);
    Y1(k) = a0*Ay(k)+a1*Ay(k-1)+a2*Ay(k-2)+b1*Y1(k-1)+b2*Y1(k-2);
    Z1(k) = a0*Az(k)+a1*Az(k-1)+a2*Az(k-2)+b1*Z1(k-1)+b2*Z1(k-2);
end

figure
plot(time,X1,time,Y1,time,Z1)
title('1-pass filtered Accelerations')
xlabel('time, s')
ylabel('acceleration, g')
legend('a_x','a_y','a_z','Location','southeast')
grid on

% Filtering 2-nd pass
X2(1) = a0*X1(1); Y2(1) = a0*Y1(1); Z2(1) = a0*Z1(1);
X2(2) = a0*X1(2)+a1*X1(1)+b1*X2(1);
Y2(2) = a0*Y1(2)+a1*Y1(1)+b1*Y2(1);
Z2(2) = a0*Z1(2)+a1*Z1(1)+b1*Z2(1);
for k=3:N;
    X2(k) = a0*X1(k)+a1*X1(k-1)+a2*X1(k-2)+b1*X2(k-1)+b2*X2(k-2);
    Y2(k) = a0*Y1(k)+a1*Y1(k-1)+a2*Y1(k-2)+b1*Y2(k-1)+b2*Y2(k-2);
    Z2(k) = a0*Z1(k)+a1*Z1(k-1)+a2*Z1(k-2)+b1*Z2(k-1)+b2*Z2(k-2);
end

figure
plot(time,X2,time,Y2,time,Z2)
title('2-pass filtered Accelerations')
xlabel('time, s')
ylabel('acceleration, g')
legend('a_x','a_y','a_z','Location','southeast')
grid on

ASI = sqrt((X2/12).^2+(Y2/9).^2+(Z2/10).^2);
figure
plot(time,ASI)
title('ASI')
xlabel('time, s')
ylabel('index')
grid on

mxASI = round(max(ASI),2)
    
```

Фиг. 9. MATLAB файл за пресмятане на ASI.

```

% Theoretical Head Impact Velocity
calculation
% THIVcalc.m file
clear all
format compact

v0 = 22220; % mm/s = 80 km/h Initial velocity
x0 = 200; % mm Head position
y0 = 0; % mm
Dx = 600; % mm
Dy = 300; % mm

R=csvread('CGrotZ.csv',2,0); % in radians
C=csvread('CGcoordXY.csv',2,0); % in mm
V=csvread('CGveloXY.csv',2,0); % in mm/s
time=R(:,1); psi=-R(:,2); Cx=C(:,2); Cy=-
C(:,4); Vx=V(:,2); Vy=-V(:,4);

figure
plot(time,psi)
title('Rotation of CG')
xlabel('time, (s)')
ylabel('\psi, (rad)')
grid on

figure
plot(time,Cx,time,Cy)
title('Coordinates of CG')
xlabel('time, (s)')
ylabel('coordinate, (mm)')
legend('X','Y','Location','east')
grid on

figure
plot(time,Vx,time,Vy)
title('Velocity of CG')
xlabel('time, (s)')
ylabel('V, (mm/s)')
legend('V_x','V_y','Location','east')
grid on

N=length(time);
psidot(1)=0;
for i=2:N;
    dt = time(i)-time(i-1);
    dpsi = psi(i)-psi(i-1);
    psidot(i) = dpsi/dt;
end

figure
plot(time,psidot)
title('Rotational velocity of CG')
xlabel('time, (s)')
ylabel('\omega, (rad/s)')
grid on

X0 = Cx(1);
Y0 = Cy(1);
Xc = Cx - X0 - v0*time;
Yc = Cy - Y0;
XdotC = Vx - v0;
YdotC = Vy;

figure
plot(time,Xc,time,Yc)
title('Ground relative position')
xlabel('time, (s)')
ylabel('distance, (mm)')
legend('X_C','Y_C','Location','east')
grid on

figure
plot(time,XdotC,time,YdotC)
title('Ground relative velocity')
xlabel('time, (s)')
ylabel('velocity, (mm/s)')
legend('V_x','V_y','Location','east')
grid on

xb = (x0-Xc).*cos(psi)+(y0-Yc).*sin(psi);
yb = -(x0-Xc).*sin(psi)+(y0-Yc).*cos(psi);
xdotb = -XdotC.*cos(psi) - YdotC.*sin(psi) +
yb.*psidot;
ydotb = XdotC.*sin(psi) - YdotC.*cos(psi) -
xb.*psidot;

for i=1:N;
    if xb(i) >= x0+Dx | yb(i) >= Dy | yb(i)
<= -Dy;
        break
    end
end
i
T = time(i)

figure
plot(time,xb,time,yb)
title('Head relative position')
xlabel('time, (s)')
ylabel('distance, (mm)')
grid on
lim = axis;
hold on
plot([T,T],[lim(2),lim(4)])
legend('x_b','y_b','impact','Location','east')
}
hold off

figure
plot(time,xdotb,time,ydotb)
title('Head relative velocity')
xlabel('time, (s)')
ylabel('velocity, (mm/s)')
grid on
lim = axis;
hold on
plot([T,T],[lim(2),lim(4)])
legend('v_x','v_y','impact','Location','east')
}
hold off

V1 = xdotb(i)/1000*3.6; V2 =
ydotb(i)/1000*3.6;
THIV = round(sqrt(V1^2 + V2^2),2)

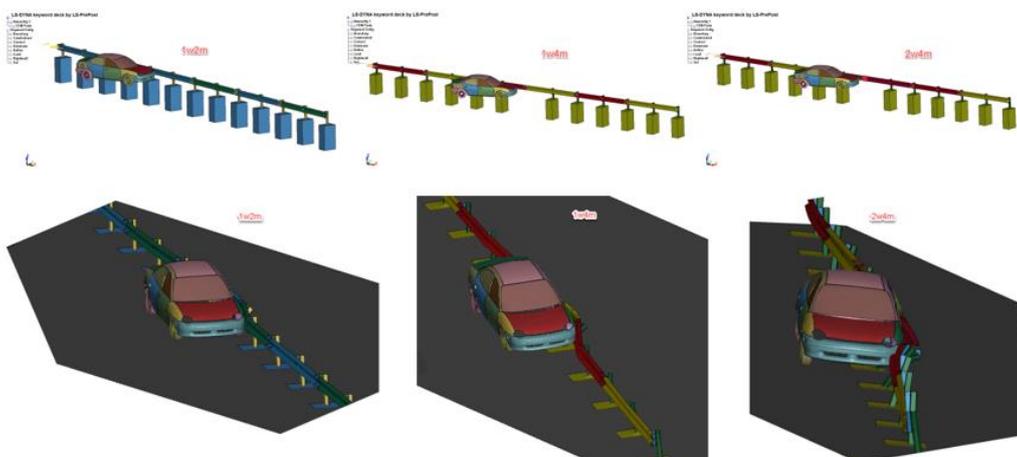
```

Фиг. 10. MATLAB файл за пресмятане на THIV.

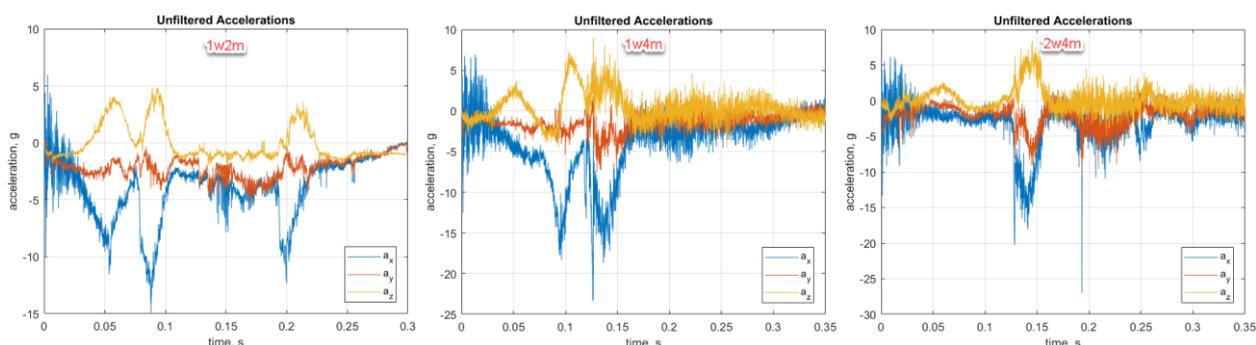
Извършените симулации са три на брой (фиг.11), като базовият модел се основава на стандартната система „N2-A-W4: стандартна конструкция (1w2m); модифицирана конструкция с премахнато стълбче (1w4m); модификация тип двойна застъпка (2w4m). На фиг. 12 са показани генерираните данни по време на удара за ускоренията по X,Y и Z от всяка симулация. Наблюдават се значителни пикове в ускоренията по X и Z, докато страничното ускорение по Y е сравнително плавно, което предполага по-контролирано пренасочване на МПС (Таблица-1).

Конструкцията с най-добри резултати е „1w2m“, тя най-ефективно усвоява енергията генерирана при удара и води до по-ниски пикови ускорения, следователно до по-контролирано движение. Конструкцията „1w4m“ е недопустима, тъй като показателят THIV е по-голям от максимално допустимата стойност от 33 km/h. Конструкцията „2w4m“, обаче е напълно допустима по показателя THIV и дори показателят ASI е под единица, т.е. той я

определя в същата категория на безопасност като стандартната конструкция. Единственият недостатък на тази конструкция е твърде голямата зона на действие, което се дължи на по-голямата податливост на стълбчетата в сравнение с вкоравената греда и от там по-големи деформации на тези стълбчета.



Фиг. 11. Общ изглед на моделите.



Фиг.12 Нефилтрирани ускорения на центъра на масовия център на МПС.

Таблица-7 Нефилтрирани върхови ускорения.

| Модел | a_x [g] | a_y [g] | a_z [g] | Доминираща характеристика |
|-------|-----------|-----------|-----------|---|
| 1w2m | ≈12 | ≈5 | ≈7 | Силен първоначален удар, умерени странични претоварвания. |
| 1w4m | ≈18 | ≈6 | ≈9 | Най-висок трансфер на енергия. По-голямо странично изместване, което показва по-голяма деформация на мантинелата. |
| 2w4m | ≈25 | ≈8 | ≈10 | Повишени трептения, по-висока интензивност на удара. |

Таблица-2. Сравнителни резултати.

| Модел | Тегло | Скорост на удар | Ъгъл | MASH | EN | ASI | THIV | Зона на действие |
|-------|---------|-----------------|------|------|----------------|------|------------|------------------|
| 1w2m | 1500 kg | 80 km/h | 20° | TL3 | N2-A-W4 (TB31) | 0.76 | 25.77 km/h | 502mm |
| 1w4m | | | | | | 1.06 | 37.68 km/h | 709mm |
| 2w4m | | | | | | 0.91 | 20.59 km/h | 925mm |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на направения анализ може да се направят следните основни изводи:

- (1) Симулациите в LS-DYNA показаха, че намаляването на броя на вертикалните стълбове води до увеличаване на стойностите на ASI и THIV, което потенциално увеличава риска за пътниците в МПС.
- (2) Модифицираните конфигурации на ПОС могат да осигурят задоволителна безопасност, ако модифицирането не се извършва с просто премахване на елементи, а се търси замената им с други, осигуряващи необходимата коравина на конструкцията.
- (3) Повишената зона на действие при някои модификации може да доведе до несъответствие със стандартите на EN-1317, особено в условия, където има ограничено пространство за деформация на преградата и трябва да се търси подобрене като повишаване на коравината на стълбчетата например.
- (4) Липсата на нормативно регулиране за модифицирани конструкции на ПОС в България създава предпоставки за неефективно прилагане на нови конфигурации без адекватни изпитания.

На база на тези заключения се препоръчва извършването на допълнителни експериментални изпитания за намирането на подходящи модификации, както и адаптиране на нормативната база, за да се гарантира, че всяка предложена модификация на ПОС е в съответствие с международните стандарти и не компрометира безопасността на пътните участници.

REFERENCES

Teng, T., Liang, C., & Tran, T. (2015). *Effect of various W-beam guardrail post spacings and rail heights on safety performance*. *Advances in Mechanical Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1177/1687814015615544>.

EN 1317-1: 2010. Road restraint systems. Part 1: Terminology and general criteria for test methods.

EN 1317-2: 2010. Road restraint systems. Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets.

LS-DYNA support files. <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-integration>

Иванов, И., (2023). *Строителна динамика и сеизмичен анализ. Лекционни записки*. Русенски Университет „Ангел Кънчев“.

Lee, R., (2019). *LS-Dyna for Engineers A Practical Tutorial Book*. BW Publications ISN 9781703208856

Lewis, B., (2004). *FHWA-HRT-04-095 MANUAL FOR LS-DYNA SOIL MATERIAL MODEL 147*. Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, VA 22101-2296.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването е реализирано с финансова подкрепа по проект 2025-МТФ-01, към фонд „Научни изследвания“ на РУ „Ангел Кънчев“.