

Tomáš Coufal

Specyfika obliczania w programie symulacyjnym PC-Crash wartości EES przy użyciu modułu „CRASH3 – obliczenie EBS”

Streszczenie

Autor analizuje możliwości stosowania modułu „CRASH3 – obliczenie EBS” w programie symulacyjnym *PC-Crash*. We wstępnej części opisuje zasadę obliczania *EES* w tym module, a w następnych rozdziałach omawia możliwości wykorzystania tego modułu w pracy biegłego. Zaprezentowana została specyfika modułu *CRASH3* i ograniczenia w korzystaniu z niego oraz przykłady praktyczne, opatrzone szczegółowymi opisami. Mając na względzie trafne i rzetelne stosowanie modułu „CRASH3 – obliczenie EBS”, autor formułuje 6 zasad umożliwiających biegłemu łatwą ocenę, czy dla danego typu uszkodzenia pojazdu wynik obliczeń *EES* będzie prawidłowy. Stosując te zasady można w znacznym stopniu wyeliminować błędy popełniane w trakcie szacowania wartości *EES* za pomocą modułu „CRASH3 – obliczenie EBS” w programie symulacyjnym *PC-Crash*.

Słowa kluczowe

CRASH3, PC-Crash, EES, energia deformacji.

* * *

1. Wstęp

W pracy biegłego, dla określenia energii deformacji pojazdu podczas zderzenia, najczęściej szacuje się tzw. *prędkość równoważną energii (EES – Energy Equivalent Speed)*, która wyraża energię rozproszoną na trwałą (czyli plastyczną) deformację pojazdu. Obecnie w inżynierii sądowej istnieje kilka metod ilościowego określania energii deformacji, bądź parametru *EES* pojazdu, na podstawie zakresu jego uszkodzeń. Jedną z nich jest właśnie moduł zawarty w programie symulacyjnym *PC-Crash*, zwany „CRASH3 – obliczenie EBS”, którego zasady, ograniczenia i możliwości zastosowania omawia niniejszy artykuł.

2. Obliczania EES w programie symulacyjnym PC-Crash za pomocą metody CRASH3

2.1. Algorytm obliczania programu CRASH3

Podstawowe algorytmy programu *CRASH3* opierają się na badaniach K. L. Cambela [3], którego metodę obliczeń rozwinął R. McHenry [8] w programie komputerowym *CRASH* (*Computer Reconstruction of Accident Speed on the Highway*), stworzonym przez firmę *Calspan Corporation*. McHenry zastosował podstawowy wzór do obliczenia siły działającej na jeden metr szerokości pojazdu w postaci:

$$F = A + B \cdot C \quad (1)$$

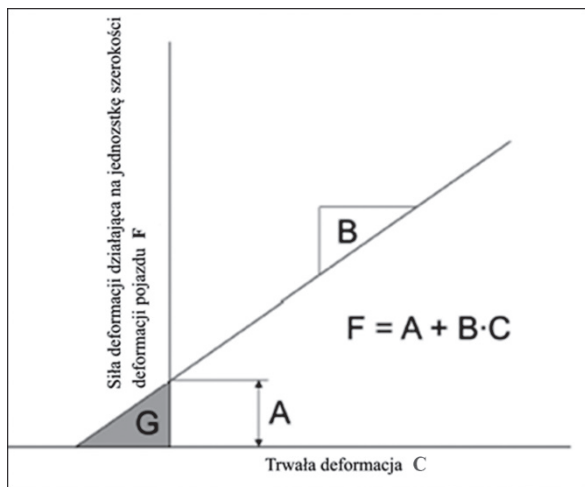
gdzie:

F [N/m] – siła działająca na jednostkę szerokości strefy deformacji pojazdu,

A [N/m] – siła graniczna działająca na jednostkę szerokości strefy deformacji pojazdu, przy której zaczyna dochodzić do trwałych odkształceń,

B [N/m²] – współczynnik sztywności pojazdu odniesiony do jednostki szerokości strefy deformacji,

C [m] – głębokość trwałej deformacji.



Ryc. 1. Liniowa zależność jednostkowej siły odkształcenia pojazdu od głębokości trwałego odkształcenia [8].

Całkowita energia deformacji może być wyrażona poprzez podwójne całkowanie wzoru (1)

$$E_D = \int_0^{w_0} \int_0^{w_0} F dC dw = \int_0^{w_0} A \cdot C + \left(A \cdot C + \frac{B \cdot C^2}{2} + G \right) dw \quad (2)$$

gdzie G jest stałą całkowania względem zmiennej C , która wyraża potencjalną

energię sprężystości¹. Odpowiada ona pracy wykonanej przez siłę A w sprężystym obszarze deformacji:

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Poprzez podstawienie wyrażenia (3) do wzoru (2) otrzymuje się:

$$E_D = A \cdot \int_0^{w_0} C \, dw + B \cdot \int_0^{w_0} \frac{C^2}{2} \, dw + \frac{A^2}{2 \cdot B} \cdot w_0 \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Po podstawieniu do wzoru (4): $\int_0^{w_0} C \cdot dw = \eta$ oraz $\int_0^{w_0} \frac{C^2}{2} \cdot dl = \gamma$, otrzymuje się:

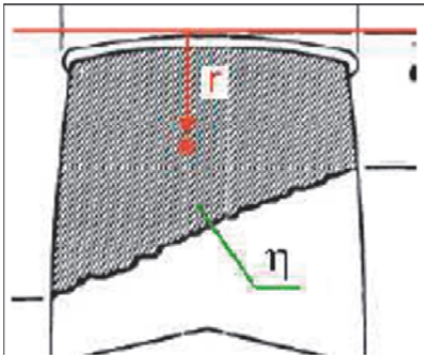
$$E_D = A \cdot \eta + B \cdot \gamma + G \cdot w_0 \quad [\text{J}] \quad (5)$$

gdzie:

η [m²] – powierzchnia rzutu pionowego obszaru zawartego pomiędzy obrysem oryginalnym a zdeformowanym,

γ [m³] – moment bezwładności pierwszego rzędu powierzchni pomiędzy profilem deformacji a krzywą opisującą pierwotny, niezdeformowany kształt ($\gamma = \eta \cdot r$, patrz ryc. 2),

w_0 [m] – szerokość odkształconego profilu (czasem również oznaczana jako L , zwłaszcza w publikacjach amerykańskich).



Ryc. 2. Zobrazowanie parametrów η i γ występujących we wzorze (5) [8].

Opierając się na założeniu, że energia deformacji pojazdu jest równoważna rozproszonej energii kinetycznej, otrzymujemy:

$$E_D = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \Delta V^2 \quad [\text{J}] \quad (6)$$

¹ Jest to maksymalna jednostkowa energia pochłaniana na odkształcenie sprężyste.

z problemów rekonstrukcji wypadków i opiniowania

Podstawienie wyrażenia (6) do wzoru (2) ujawnia zależność liniową ΔV od głębokości deformacji²

$$\Delta V = \frac{A}{B} \cdot \sqrt{\frac{B \cdot w_0}{m}} + C \cdot \sqrt{\frac{B \cdot w_0}{m}} = A \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{w_0}{B \cdot m}}}_{b_0} + \underbrace{\sqrt{\frac{B \cdot w_0}{m}}}_{b_1} \cdot C \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

gdzie:

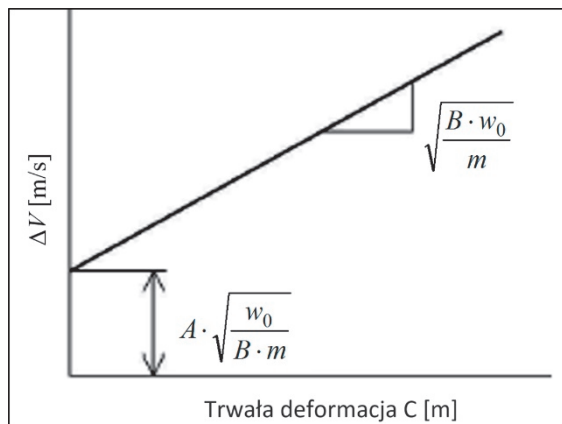
ΔV [m/s] – jest traktowana jako zmiana prędkości w fazie kompresji, tzn. przed fazą restytucji,

b_0 [m/s] – prędkość graniczna, przy której zaczyna powstawać trwała deformacja,

b_1 [m/s/m] – pochylenie charakterystyki (nachylenie linii prostej),

m [kg] – masa,

w_0 [m] – szerokość deformacji.



Ryc. 3. Zmiana prędkości ΔV jako funkcja liniowa trwałej deformacji podczas zderzenia czołowego [8].

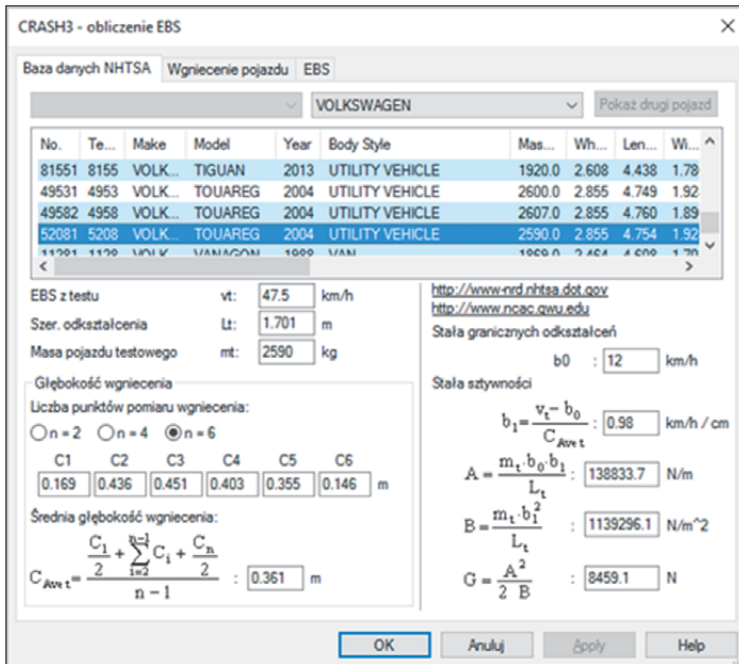
Powyższe wzory stały się podstawą algorytmów programu *CRASH*, który w 1982 r. został przyjęty przez US DOT (*United States Department of Transportation*) jako jednolity standard przetwarzania danych uzyskanych podczas testów zderzeniowych. W roku 1982 US DOT zatwierdził aktualnie obowiązującą wersję – program *CRASH3*. Obecnie jest tworzona i modernizowana wersja programu

² Parametr E_D jest to całkowita energia deformacji, uwzględniająca zarówno energię rozproszoną na odkształcenia plastyczne (trwałe), jak i na sprężyste (zanikające). Stąd właśnie $\Delta V = EBS$, gdzie EBS nosi nazwę zastępczej prędkości barierowej (*Equivalent Barrier Speed*). Natomiast EES reprezentuje tylko deformację plastyczną. Parametry te są związane ze sobą poprzez współczynnik restytucji k za pomocą wzoru $EES = EBS\sqrt{1 - k^2}$. Dla dużych prędkości względnych zderzenia (większych niż ok. 25–30 km/h) można przyjąć, że $EES \approx EBS$, gdyż $k \approx 0,1$. EBS jest to prędkość, z jaką należałoby zderzyć pojazd testowy ze sztywną, nieodkształcalną barierą w zderzeniu szorstkim (bez poślizgu), aby uzyskać odkształcenie identyczne z tym, jakiego doznał pojazd uczestniczący w wypadku. Natomiast EES to prędkość, która reprezentuje tylko energię deformacji plastycznej pojazdu w tym teście zderzeniowym. Reszta energii to restytucja (*przyp. red.*).

o nazwie *CRASH4*, o której wspomniano w literaturze [8], jednakże do tej pory nie została ona wydana.

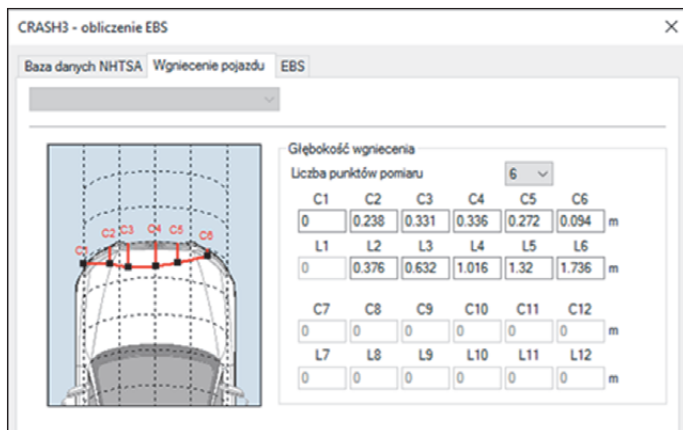
2.2. Obliczanie EES w programie PC-Crash z wykorzystaniem standardu CRASH3

Aby obliczyć wartość *EES*, *PC-Crash* wykorzystuje standard *CRASH3*, którego podstawy zostały wyjaśnione w poprzednim rozdziale. Użytkownik wybiera w programie pojazd zbliżony pod względem parametrów do pojazdu, dla którego chce określić *EES*. Po dokonaniu wyboru, wyświetlone zostaną dane testu zderzeniowego, zawarte w bazie danych, w tym poszczególne parametry *A*, *B* i *G* (patrz ryc. 4).

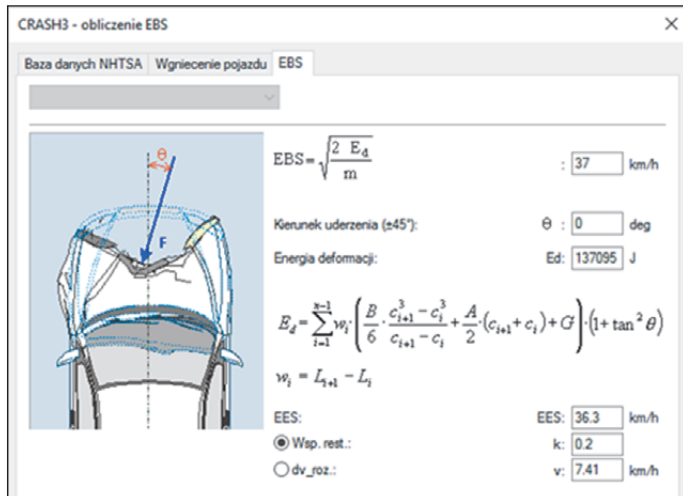


Ryc. 4. Okno „CRASH3 – obliczenie EBS”, baza danych NHTSA z prób zderzeniowych.

W zakładce „Wgniecenie pojazdu” (dotyczącej samochodu, dla którego chcemy określić *EES*) użytkownik wprowadza w poszczególnych miejscach wartości głębokości trwałych deformacji i ich odległości poprzeczne (odległości poprzeczne są tu oznaczone jako *L* zamiast dotychczas używanego *w* – patrz ryc. 5). Następnie, w zakładce *EBS*, w oparciu o wprowadzoną wartość deformacji, znany współczynnik restytucji i kierunek działania siły uderzenia (w przedziale od -45° do $+45^\circ$ odchylenia od osi wzdłużnej lub poprzecznej pojazdu), program oblicza energię deformacji, wartości *EBS* i *EES* (patrz ryc. 6).



Rys. 5. Okno „CRASH3 – obliczenie EBS” – wprowadzanie deformacji pojazdu.

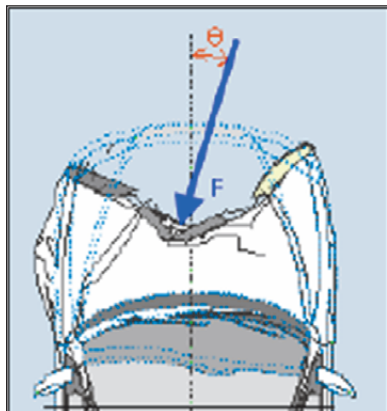


Rys. 6. Okno „CRASH3 – obliczenie EBS” – obliczanie poszukiwanych parametrów dla pojazdów uczestniczących w wypadku.

Jeżeli siła deformująca nie działa w osi podłużnej pojazdu, wówczas energia deformacji jest korygowana w zależności od wprowadzonego przez użytkownika kąta, zawartego między siłą deformującą i osią podłużną pojazdu (patrz ryc. 7). Korektę taką umożliwia współczynnik *ECF* (*Energy Correction Factor*), który w programie *CRASH3* jest definiowany w sposób następujący:

$$ECF = 1 + \tan^2 \theta \quad (8)$$

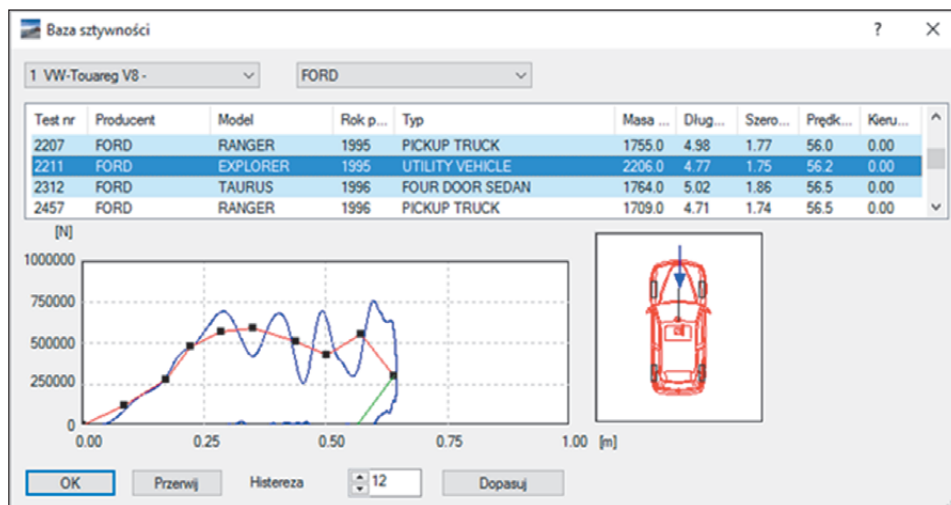
Współczynnik ten ma zastosowanie do kątów w przedziale $\pm 45^\circ$ i przyjmuje wartości od 1 do 2.



Ryc. 7. Odchylenie kierunku działania siły deformującej od osi podłużnej pojazdu.

Metoda obliczania EBS przy pomocy programu CRASH3 zakłada liniową zależność między działającą siłą a deformacją plastyczną (patrz ryc. 1). Do obliczeń wchodzi tylko jedna charakterystyka sztywności, opisująca deformacyjne właściwości całego przedniego, bocznego lub tylnego obszaru pojazdu jako całości. A zatem, jeśli pojazd zostanie uszkodzony tylko częściowo, założenie to może mieć działanie ograniczające.

Program symulacyjny PC-Crash zawiera ponadto bazę danych sztywności, pochodzących z testów zderzeniowych, gdzie widać rzeczywisty przebieg siły w zależności od odkształcenia konkretnego pojazdu. Przy pomocy tej bazy, dla pojazdu uczestniczącego w wypadku można znaleźć pojazd referencyjny o podobnych parametrach. Baza służy jednak tylko do celów informacyjnych i nie jest połączona z modułem „CRASH3 – obliczenie EBS”.



Ryc. 8. Charakterystyka deformacyjna samochodu referencyjnego Ford Explorer, przyjęta dla samochodu VW Touareg.

3. Ocena programu CRASH3 i możliwości jego wykorzystania w pracy biegłego

Czynnikiem ograniczającym dla programu *CRASH3* jest założenie liniowej zależności między prędkością i siłą uderzenia a głębokością deformacji, co może wprowadzać nieścisłości do obliczeń. Bardziej ograniczające jest jednak założenie *jednorodnej sztywności na całej szerokości przedniej części pojazdu*. Podczas zderzenia czołowego z pełnym pokryciem założenie to nie będzie miało znaczenia, jednak w przypadku zderzenia z częściowym pokryciem błąd w obliczeniach zaczyna narastać. Może mianowicie zaistnieć sytuacja, w której biegły będzie chciał obliczyć *EES* pojazdu uszkodzonego (przykładowo) przy pokryciu 20%. Z uwagi na założenie jednolitej sztywności na całej szerokości może nastąpić przeszacowanie lub niedoszacowanie wartości *EES*, w zależności od lokalnej sztywności danego miejsca względem sztywności uśrednionej dla całego przodu pojazdu. Jeśli biegły, przy pomocy programu *CRASH3*, obliczy *EES* dla zderzenia czołowego pojazdu np. z wąskim słupem i jeżeli siła uderzenia będzie skoncentrowana na podłużnicy, wówczas będzie miało miejsce niedoszacowanie wartości *EES*, ponieważ oczekiwana będzie sztywność mniejsza niż ta, która ową część pojazdu rzeczywiście charakteryzuje.

Jeżeli biegły decyduje się dokonać obliczeń *EES* w module „CRASH3 – obliczenie EBS” programu symulacyjnego *PC-Crash*, to powinien podchodzić do obliczeń z dużą ostrożnością, bowiem nawet po dokonaniu wyboru odpowiedniego typu pojazdu z bazy danych, nierzadko zdarza się, że w bazie tej dane wejściowe, niezbędne do obliczeń, są niekompletne lub błędne. Należy zatem sprawdzić, czy na zakładce „Baza danych NHTSA” są wypełnione pola:

- „EBS z testu vt”,
- „Szer. odkształcenia Lt”,
- „Masa pojazdu testowego mt”,
- „Głębokość wgniecenia C1 do C6” oraz
- „Stała granicznych odkształceń b₀”.

Jeśli któraś z tych danych jest błędna lub niepełna, wtedy również obliczone na ich podstawie parametry A, B i G będą błędne lub nie zostaną obliczone w ogóle (patrz ryc. 9). Jeżeli zatem w bazie danych parametry A, B i G są równe zero lub nawet ujemne, to biegły powinien być ostrożny i upewnić się co do poprawności danych wejściowych.

CRASH3 - obliczenie EBS

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

AUDI Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...
40922	4092	AUDI	A4	2002	FOUR DOOR SEDAN	1883.0	2.648	4.575	1.77
42861	4286	AUDI	A4	2002	FOUR DOOR SEDAN	1820.0	2.645	4.571	1.93
65191	6519	AUDI	A4	2009	FOUR DOOR SEDAN	1968.0	2.812	4.651	1.81
65202	6520	AUDI	A4	2009	FOUR DOOR SEDAN	1973.0	2.812	4.651	1.81

EBS z testu vt: 56.3 km/h

Szer. odkształcenia Lt: 0 m

Masa pojazdu testowego mt: 1820 kg

Głębokość wgniecenia

Liczba punktów pomiaru wgniecenia:

n = 2 n = 4 n = 6

C1 0.292 C2 0.408 C3 0.483 C4 0.489 C5 0.432 C6 0.314 m

Średnia głębokość wgniecenia:

$$C_{\text{Avr t}} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + C_n}{n-1} : 0.423 \text{ m}$$

Stala granicznych odkształceń b0 : 12 km/h

Stala sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{\text{Avr t}}} : 1.05 \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : 0 \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : 0 \text{ N/m}^2$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : 0 \text{ N}$$

OK Anuluj Apply Help

Ryc. 9. Przykład braku parametrów w bazie danych NHTSA.

CRASH3 - obliczenie EBS

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

AUDI Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...	CO...	S...	PDOF [deg]
16402	1640	AUDI	5000	1982	FOUR DOOR SEDAN	1235.0	2.687	4.801	1.773	0.993	0.0	315.0
16412	1641	AUDI	5000	1982	FOUR DOOR SEDAN	1235.0	2.680	4.801	1.758	0.000	0.0	315.0
16422	1642	AUDI	5000	1982	FOUR DOOR SEDAN	1235.0	2.667	4.796	1.656	0.000	0.0	315.0
16432	1643	AUDI	5000	1982	FOUR DOOR SEDAN	1235.0	2.578	4.740	1.435	0.000	0.0	315.0

EBS z testu vt: 10.6 km/h

Szer. odkształcenia Lt: 0.508 m

Masa pojazdu testowego mt: 1235 kg

Głębokość wgniecenia

Liczba punktów pomiaru wgniecenia:

n = 2 n = 4 n = 6

C1 0 C2 0.02 C3 0.064 C4 0.127 C5 0.084 C6 0 m

Średnia głębokość wgniecenia:

$$C_{\text{Avr t}} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + C_n}{n-1} : 0.059 \text{ m}$$

Stala granicznych odkształceń b0 : 12 km/h

Stala sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{\text{Avr t}}} : -0.24 \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : -53453.6 \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : 105777.7 \text{ N/m}^2$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : 13506.1 \text{ N}$$

OK Anuluj Apply Help

Ryc. 10. Przykład danych dla zderzenia bocznego w bazie danych NHTSA.

z problemów rekonstrukcji wypadków i opiniowania



Ryc. 11. Test zderzeniowy – zderzenie boczne samochodu Audi A4 z 2009 r. z odkształcalną, ruchomą barierą [14].



Ryc. 12. Zderzenie boczne samochodu VW Jetta z 2005 r. ze sztywnym słupem (ang. Pole Test) [14].

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

VOLKSWAGEN Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...
54081	5408	VOLK...	JETTA	2005	FOUR DOOR SEDAN	1641.0	2.580	4.513	1.75
54431	5443	VOLK...	JETTA	2005	FOUR DOOR SEDAN	1577.0	2.018	4.561	1.75
54772	5477	VOLK...	JETTA	2005	FOUR DOOR SEDAN	1661.0	2.578	4.544	1.98
54822	5482	VOLK...	JETTA	2005	FOUR DOOR SEDAN	1710.0	2.575	4.565	1.64
54822	5482	VOLK...	JETTA	2005	FOUR DOOR SEDAN	1710.0	2.575	4.565	1.64

EBS z testu vt: 32.3 km/h

Szer. odkształcenia Lt: 3.75 m

Masa pojazdu testowego mt: 1641 kg

Głębokość wgniecenia

Liczba punktów pomiaru wgniecenia:

n = 2 n = 4 n = 6

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0	0	0.094	0.271	0.022	0

Srednia głębokość wgniecenia:

$$C_{AveT} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + C_n}{n-1} : 0.077 \text{ m}$$

Stala granicznych odkształceń

b0 : 12 km/h

Stala sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{AveT}} : 2.62 \text{ km/h/cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : 106269.5 \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : 2322643 \text{ N/m}^2$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : 2431.1 \text{ N}$$

OK Anuluj Apply Help

Ryc. 13. Dane dla zderzenia boczego samochodu VW Jetta 2005 w bazie danych NHTSA.

Powyższe mogłoby sugerować, że jeżeli biegły, korzystając z programu *CRASH3*, ograniczy się tylko do zderzeń czołowych (czyli do pojazdów z bazy danych, przy których podano PDOF = 0°) oraz zwróci uwagę na brak podstawowych danych wejściowych, to przy obliczaniu *EES* nie może popełnić błędu. Tymczasem jest odwrotnie, co można wykazać na dwóch poniższych przykładach.

Pierwszym przykładem będzie samochód Subaru Legacy z 2000 r. (ryc. 14), którego parametry z testu zderzenia czołowego podano na rycinie 15.



Ryc. 14. Test zderzenia czołowego samochodu Subaru Legacy – uderzenie w odkształcalną barierę [14].

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

SUBARU Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...
34671	3467	SUB...	LEGACY	2000	FOUR DOOR SEDAN	1664.0	2.653	4.667	1.71
36651	3665	SUB...	LEGACY	2000	FOUR DOOR SEDAN	1726.0	2.650	4.680	1.73
39071	3907	SUB...	LEGACY	2000	FOUR DOOR SEDAN	1725.0	2.650	4.681	1.73
35391	3539	SUB...	LEGACY	2001	FOUR DOOR SEDAN	1782.0	99...	99...	0.00
41421	4142	SUB...	LEGACY	2001	FOUR DOOR SEDAN	1737.0	2.650	4.680	1.74

EBS z testu vt: km/h <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov>
<http://www.ncac.qsu.edu>
 Szer. odkształcenia Lt: m Stała granicznych odkształceń
 Masa pojazdu testowego mt: kg b0 : km/h

Głębokość wgniecenia
 Liczba punktów pomiaru wgniecenia:
 n = 2 n = 4 n = 6
 C1 C2 C3 C4 C5 C6
 m

Średnia głębokość wgniecenia:

$$C_{Ave t} = \frac{\frac{C_1}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + \frac{C_n}{2}}{n-1} : \text{ m}$$

Stała sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{Ave t}} : \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : \text{ N/m^2}$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : \text{ N}$$

Ryc. 15. Zderzenie czołowe samochodu Subaru Legacy z 2000 r. w bazie danych NHTSA.

z problemów rekonstrukcji wypadków i opiniowania

Przy $PDOF = 0^\circ$ (w widoku podstawowym niewidoczne) wszystkie parametry wejściowe są wypełnione sensownymi danymi, a zatem na pierwszy rzut oka może się wydawać, że wszystko jest w porządku. Po dokładniejszym zbadaniu danych z testu zderzeniowego można jednak zauważyć, że nie jest to test zderzenia czołowego o pełnym pokryciu ze sztywną nieodkształcalną barierą, lecz test zderzenia czołowego mimośrodowego, z barierą odkształcalną przy pokryciu 40% (patrz ryc. 15). Ponadto, szerokość strefy deformacji, na której mierzono głębokości deformacji, nie wynosiła 1,143 m, jak podano na rycinie 14, lecz w rzeczywistości głębokości deformacji (C1 do C6) były mierzone na szerokości 0,855 m lewej części pojazdu (C1 do C3) oraz na szerokości 0,57 m prawej części pojazdu (C4 do C5), gdzie lewą i prawą część pojazdu dzieli jego oś podłużna. Całkowita szerokość pomiaru deformacji wynosiła więc faktycznie 1,425 m. W tym przypadku był to prawdopodobnie tylko błąd powstały podczas przetwarzania danych wejściowych, był to jednak błąd mający wpływ na obliczenie *EES*, a przecież wartość *EES* stanowi „kamień węgielny” dla rekonstrukcji przebiegu wypadku w ramach ekspertyzy, która ma decydować o losie uczestników wypadku. Jednakże błąd w podanej szerokości deformacji nie jest jeszcze błędem najpoważniejszym. Problematyczne jest to, że dane stanowiące parametry wejściowe programu *CRASH3* pochodzą z testu czołowego zderzenia z odkształcalną barierą – a zatem przy jednakowej prędkości uderzenia dochodzi do mniejszego odkształcenia niż miałyoby to miejsce w przypadku zderzenia ze sztywną barierą. Prowadzi to do przeszacowania sztywności, a w konsekwencji – do przeszacowania obliczonej wartości *EES*.

Drugim przykładem jest samochód Dodge Grand Caravan z roku 1999 (ryciny 16 i 17).



Ryc. 16. Test czołowego zderzenia stojącej Hondy Accord z jadącym z przeciwka Dodge Grand Caravan [14].



Ryc. 17. Konfiguracja testu zderzenia samochodów Honda Accord z 2004 r. i Dodge Grand Caravan z 1999 r. [14].

Parametry tego testu, zawarte w bazie danych NHTSA, są pokazane na rycinie 18. Przy $PDOF = 0^\circ$, wszystkie parametry wejściowe są wypełnione, toteż na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że wszystko jest przygotowane do obliczeń.

Po dokładniejszym zbadaniu danych stwierdzono jednak, że nie jest to test zderzenia czołowego z pełnym pokryciem, lecz test czołowego uderzenia samochodu Dodge Grand Caravan z prędkością około 101 km/h w stojący samochód Honda Accord z roku 2004, przy 50% pokryciu przedniej części (patrz ryciny 16 i 17). Już na podstawie uszkodzeń pojazdów pokazanych na rycinie 18 widać, że nie było to czołowe zderzenie ze sztywną barierą przy prędkości około 100 km/h, podczas gdy takie założenie program *CRASH3* przyjmuje do dalszych obliczeń. Prowadzi to znów do skrajnego wzrostu sztywności, a w efekcie – do skrajnego przeszacowania wartości *EES*. Dość zabawne jest to, że jeśli w bazie danych NHTSA odnajdziemy ten drugi samochód, z którym zderzył się Dodge Grand Caravan, tj. Hondę Accord, to jako prędkość uderzenia podczas testu będzie ona miała podaną wartość 0 km/h (ryc. 20). Jest to rzeczywista prędkość przedzderzeniowa. Wypada przypomnieć, że chodzi tu o podstawę algorytmu *CRASH3*, który, dla sporządzenia charakterystyki sztywności pojazdu, wprowadza prędkość uderzenia oraz odpowiadającą jej deformację (zależność liniową F od C). Zatem takie testy zderzeniowe zawarte w bazie danych NHTSA są błędne i dla biegłego mylące.

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

DODGE Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...
51161	5116	DOD...	CARAVAN	1999	VAN	2015.0	3.036	5.055	1.92
32161	3216	DOD...	CARAVAN	2000	MINIVAN	1661.0	2.895	4.727	1.95
32492	3249	DOD...	CARAVAN	2000	MINIVAN	1859.0	2.883	4.695	1.91
32841	3284	DOD...	CARAVAN	2000	VAN	1814.0	2.896	99...	0.00

EBS z testu	vt:	<input type="text" value="100.9"/>	km/h
Szer. odkształcenia	Lt:	<input type="text" value="1.532"/>	m
Masa pojazdu testowego	mt:	<input type="text" value="2015"/>	kg

Głębokość wgniecenia

Liczba punktów pomiaru wgniecenia:

n = 2 n = 4 n = 6

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.389	0.363	0.319	0.223	0.114	0.045

Srednia głębokość wgniecenia:

$$C_{Ave\ t} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + C_n}{n-1} : \text{ m}$$

<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov>
<http://www.ncac.gwu.edu>

Stała granicznych odkształceń

b_0 : km/h

Stała sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{Ave\ t}} : \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : \text{ N/m^2}$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : \text{ N}$$

Ryc. 18. Dane zderzenia czołowego samochodu Dodge Grand Caravan, z 1999 r. z bazy danych NHTSA.



a)



b)

Ryc. 19. Samochody po opisanym teście zderzeniowym: a) Dodge Caravan, b) Honda Accord [14].

Baza danych NHTSA Wgniecenie pojazdu EBS

HONDA Pokaż drugi pojazd

No.	Te...	Make	Model	Year	Body Style	Mas...	Wh...	Len...	Wi...
51162	5116	HON...	ACCORD	2004	FOUR DOOR SEDAN	1629.0	2.740	4.800	1.82
51412	5141	HON...	ACCORD	2004	FOUR DOOR SEDAN	1632.0	2.740	4.750	1.80
51422	5142	HON...	ACCORD	2004	FOUR DOOR SEDAN	1642.0	2.740	4.795	1.81
51451	5145	HON...	ACCORD	2004	FOUR DOOR SEDAN	1654.0	2.730	4.805	1.83
51462	5146	HON...	ACCORD	2004	FOUR DOOR SEDAN	1640.0	2.740	4.800	1.81

EBS z testu vt: 71.2 km/h

Szer. odkształcenia Lt: 1.536 m

Masa pojazdu testowego mt: 1629 kg

Głębokość wgniecenia

Liczba punktów pomiaru wgniecenia:

n = 2 n = 4 n = 6

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.108	0.479	0.532	0.354	0.138	0

Średnia głębokość wgniecenia:

$$C_{\text{Avr t}} = \frac{C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i + \frac{C_n}{2}}{n-1} : 0.311 \text{ m}$$

<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov>
<http://www.ncac.qwu.edu>

Stała granicznych odkształceń b0 : 12 km/h

Stała sztywności

$$b_1 = \frac{v_t - b_0}{C_{\text{Avr t}}} : 1.9 \text{ km/h / cm}$$

$$A = \frac{m_t \cdot b_0 \cdot b_1}{L_t} : 186623.3 \text{ N/m}$$

$$B = \frac{m_t \cdot b_1^2}{L_t} : 2955590.5 \text{ N/m}^2$$

$$G = \frac{A^2}{2 \cdot B} : 5891.9 \text{ N}$$

OK Anuluj Apply Help

Ryc. 20. Dane zderzenia czołowego Hondy Accord z 2004 r. w bazie danych NHTSA.

Przedstawione przykłady nie mają na celu wskazania wad algorytmu CRASH3, ale zwrócenie uwagi na problemy powstające przy bezkrytycznym stosowaniu w module „CRASH3 – obliczenie EBS” danych z bazy NHTSA, mogące skutkować poważnymi błędami obliczeń EES. Jeżeli spełnione są podstawowe założenia leżące u podstaw standardu CRASH3, to stosowanie go jest uzasadnione. Jednakże błędne dane wejściowe znacznie ograniczają możliwość jego stosowania,

a biegły nieświadomie może zostać wprowadzony w błąd, pomimo że skorzysta z bazy danych NHTSA, dołączonej do programu *PC-Crash*. Algorytm *CRASH3* opiera się bowiem na testach zderzeń pojazdów z nieruchomymi i nieodkształcalnymi barierami. W oparciu o prędkość uderzenia i odpowiadającą jej deformację pojazdu algorytm oblicza parametry wejściowe, na podstawie których obliczane jest *EES*. Jeżeli warunki testu zderzeniowego są odmienne (np. bariera deformowalna, zderzenie dwóch pojazdów, mierzenie głębokości deformacji na całej szerokości pojazdu nawet przy uszkodzeniu tylko jej części itp.), to program obliczy nieprawidłową sztywność i na jej podstawie przeprowadzi błędne obliczenie wartości *EES*.

Jeśli zatem biegły zdecyduje się na ustalanie *EES* za pomocą modułu „CRASH3 – obliczenie EBS” w programie symulacyjnym *PC-Crash*, to powinien znać stosowne algorytmy i założenia oraz przestrzegać niżej podanych podstawowych zasad, zdefiniowanych przez autora niniejszej pracy, które pomogą w wykryciu i wyeliminowaniu błędnych danych wejściowych.

4. Zasady stosowania modułu CRASH3 w programie symulacyjnym PC-Crash

1. W parametrach wejściowych żadna z pozycji v_t , L_t , m_t , C_{ave} nie może być równa zero. Nie jest jednak wykluczone, że któraś z wartości C1 do C6 będzie równa zero w przypadku zderzeń z małą prędkością, bądź zderzeń mimośrodowych. Jeśli jednak taka sytuacja wystąpi, to należy zachować dużą ostrożność, ponieważ może chodzić o jeden z testów niestandardowych (np. uderzenie w odkształcalną barierę itp.), którego dane wejściowe mogą zniekształcać obliczenie *EES*.
2. Prędkość kolizyjna podczas testu (v_t) nie może być mniejsza niż prędkość graniczna, przy której nie dochodzi jeszcze do trwałych deformacji (b_0).
3. Dla zderzenia czołowego musi zachodzić warunek $PDOF = 0^\circ$, ewentualnie 180° dla tylnej części pojazdu (trzeba także upewnić się, czy w grę wchodziło uderzenie w sztywną nieodkształcalną barierę). Oczywiście sama metoda *CRASH3* nadaje się również do zderzeń bocznych. Problem stanowią jednak parametry dostępne w bazach danych, gdyż większość testów polega na uderzeniu wózka z odkształcalnym przodem w bok stojącego pojazdu, podczas gdy przeszkoda musi być sztywna i nieodkształcalna.
4. Głębokości deformacji C1 do C6 powinny być mniej więcej symetrycznie rozmieszczone względem podłużnej osi pojazdu. Jeśli istnieje podejrzenie uszkodzenia przedniej części przy częściowym pokryciu (tj. C1 do C3 mają wartości znacząco większe niż C4 do C6), to należy zachować dużą ostrożność, ponieważ test może dotyczyć zderzenia z barierą odkształcalną.
5. Jeżeli prędkość zderzenia jest inna niż 56 km/h (która występuje przy standardowym teście zderzeniowym NHTSA – uderzenie w sztywną barierę), to należy

zachować dużą ostrożność, ponieważ może chodzić o test zderzeniowy niespełniający kryteriów metody *CRSAH3*.

6. Jeżeli, zdaniem biegłego, prędkość uderzenia podczas testu (v_i) jest zbyt duża bądź zbyt mała jak na powstałą deformację (C1 do C6), to również należy zachować ostrożność, bo może chodzić o test niespełniający kryteriów metody *CRSAH3*.

Bibliografia

1. Burg, H., Moser, A. (2009). *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*, Wydanie 2. Wiesbaden: Vieweg Teubner, s. 1032. ISBN 978-3-8348-0546-1.
2. Burg, H., Rau, H. (1981). *Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion*. Wydanie 1, Kippenheim: Verl. Information Ambs, s. 838, ISBN 38-855-0020-5.
3. Campbell, K., L. (1974). *Energy Basis for Collision Severity*. Warrendale: SAE International, DOI: 10.4271/740565.
4. Huang, M. (2002). *Vehicle crash mechanics*. Boca Raton: CRC Press, s. 481, ISBN 08-493-0104-1.
5. Hugemann, W. *et al.* (2007). *Unfallrekonstruktion*. wydanie 1, Münster: Autoren-team, s. 649–1254. ISBN 30-001-9419-3.
6. Kasanický, G. (2001). *Teória pohybu a rázu pri analýze a simulácii nehodového deja*. Žilina, Žilinská univerzita v Žilinie, s. 350. ISBN 80-710-0597-5.
7. McHenry, B., G. (2008). *Energy Correction Factor and Coefficient of Restitution* [online]. Cary: McHenry Software, Inc., s. 4, http://www.mchenrysoftware.com/forum/McHenry_ECF.pdf (dostęp w dniu 2 lutego 2014).
8. McHenry, B., G. (2001). *The algorithms of Crash* [online]. Cary: McHenry Software, Inc., s. 37, www.mchenrysoftware.com (dostęp w dniu 28 stycznia 2014).
9. *PC-CRASH 9.1* [CD-R] (2011). Linz: DSD, Dr. Steffan Datentechnik G.m.b.H.
10. Prasad, A., K. (1990). *CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collisions*, Warrendale, SAE International, DOI: 10.4271/900098.
11. Steffan, H. (2010). *PC-Crash: Technický manuál* (online). Linz: DSD, Dr. Steffan Datentechnik GmbH, <http://www.pccrash.cz/files/manualy/pcc90sk.pdf>, s. 298 (dostęp w dniu 29 stycznia 2014).
12. Strohner, C., E., Wolley, R., L., James, M., B. *et al.* (1986). *Crush energy in accident reconstruction*. Warrendale: SAE International, DOI 10.4271/860371.
13. Summers, S., Prasad A., Hollowel, W. (2001). *NHTSA's Compatibility Research Program Update*. Warrendale, SAE International, DOI 10.4271/2001-01-1167.
14. *Query Vehicle Crash Test Database* (2014). [online]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database/VSR/veh/QueryVehicle.aspx> (dostęp w dniu 1 lutego 2014).

* * *

Specificity of *EES* calculation using the “CRASH3 – EBS calculation” module in the *PC-Crash* simulation program

Abstract

The article deals with applicability of the “Crash 3 – EBS Calculation” module in the *PC-Crash* simulation software. *EES* calculation principles potential applications in forensic practise are described. The author describes each specific features of CRASH3 module together with limitations of its use, based on actual cases. Six rules are formulated to facilitate a court expert’s assessment of the suitability of “CRASH3 – EBS Calculation” module in a given type of damage. Following these rules helps a court expert to avoid some errors in their forensic reports.

Keywords

CRASH3, PC-Crash, EES, deformation energy.