

Introducing a New Relation for Calculating the Explosion Wave Decay Coefficient

S. A. Hosseini^{1*}, H. Salimi Mozafarabadi², M. H. Najafi Alamoti³

1- Assistant Professor, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2- Master's Degree, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3- Master's Degree, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Today, due to the increase in terrorist attacks and the need to protect structures and infrastructure against these threats, especially explosive threats, the issue of analyzing the response of structures against these loads is one of the topics of the day. One of the important parameters in analyzing the response of structures is the nature and mode of the impact of the explosive load. This can be seen in the relation presented for explosive pressure in theoretical analyzes. According to the Friedlander relation, the blast pressure decreases exponentially over time, and various relations are proposed to calculate the decay coefficient of the exponential function (such as the Kinney-Graham method, the Ismail-Murray method, the Karlos- Solomosand method, etc). This coefficient indicates how the slope rate of the explosion wave time pressure graph decreases. In this paper, by examining other existing methods for calculating the decay parameter, a new relationship for the explosion pressure reduction parameter in the near and far range is presented; A comparison is also made between the relationship observed in this study and other relationships presented for the blast wave decay coefficient. The results showed that the decay parameter presented in this study with high accuracy can calculate the actual explosion pressure and this leads to a better analysis of structures against explosive threats. In this research, the high accuracy of the calculated relationships for the decay coefficient has been investigated in three ways: A) Based on the regression coefficient of fitted graphs, the value of R^2 is close to one; B) by the comparison between the values of the calculated decay coefficient with other existing relations; C) Based on the actual blast pressure calculated in two numerical examples.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 May 2021

Revise Date: 15 June 2021

Accept Date: 07 July 2021

Keywords:

Blast
Decay Coefficient
Friedlander Equation
Decay Coefficient Relations
Shape Coefficient
The slope of Pressure-Time
Diagram

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.286856.2460>

*Corresponding author: S. A. Hosseini.

Email address: hoseini@mut.ac.ir

ارائه رابطه جدید برای محاسبه ضریب کاهش موج انفجار

سید احمد حسینی^{۱*}، حسین سلیمی مظفرآبادی^۲، محمدحسن نجفی الموتی^۳

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، تهران، ایران

چکیده

امروزه به دلیل افزایش حملات تروریستی و ضرورت حفاظت سازه‌ها و تأسیسات زیربنایی در برابر این تهدیدات، بالأخص تهدیدات انفجاری، موضوع تحلیل پاسخ سازه‌ها در برابر این بارها جزء موضوعات روز می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل پاسخ سازه‌ها، ماهیت و نحوه اثر بار انفجاری می‌باشد. این مهم، در رابطه ارائه شده برای فشار انفجاری در تحلیل‌های تئوریک به‌وضوح قابل مشاهده است. طبق رابطه فریدلندر، فشار انفجار به‌صورت نمایی با زمان کاهش می‌یابد و روابط مختلفی برای محاسبه ضریب کاهش تابع نمایی ارائه شده است (مانند روش کینی - گراهام، روش اسماعیل - موری، روش کارلوس - سولوموس و ...). این ضریب نشانگر چگونگی کاهش نرخ شیب نمودار فشار - زمان موج انفجار است. در این مقاله، با بررسی سایر روش‌های مطرح موجود برای محاسبه پارامتر کاهش، رابطه‌ای جدید برای پارامتر کاهش فشار انفجار در محدوده‌ی نزدیک و دور ارائه شده است؛ همچنین به مقایسه میان رابطه احصا شده در این تحقیق و سایر روابط ارائه شده برای ضریب کاهش موج انفجار پرداخته شده است. نتایج نشان داد که پارامتر کاهش ارائه شده در این تحقیق با دقت بالا، قادر به محاسبه فشار واقعی انفجار می‌باشد و این امر موجب تحلیل بهتر سازه‌ها در برابر تهدیدات انفجاری می‌شود. در این تحقیق از سه طریق به بررسی دقت بالا روابط احصا شده برای ضریب کاهش پرداخته شده است: الف) بر اساس ضریب رگرسیون نمودارهای برازش شده که مقدار R^2 نزدیک به یک می‌باشد؛ ب) مطابق با مقایسه‌ی بین مقادیر ضریب کاهش محاسبه شده با سایر روابط موجود؛ ج) بر اساس فشار واقعی انفجار که در دو مثال عددی محاسبه شده است.

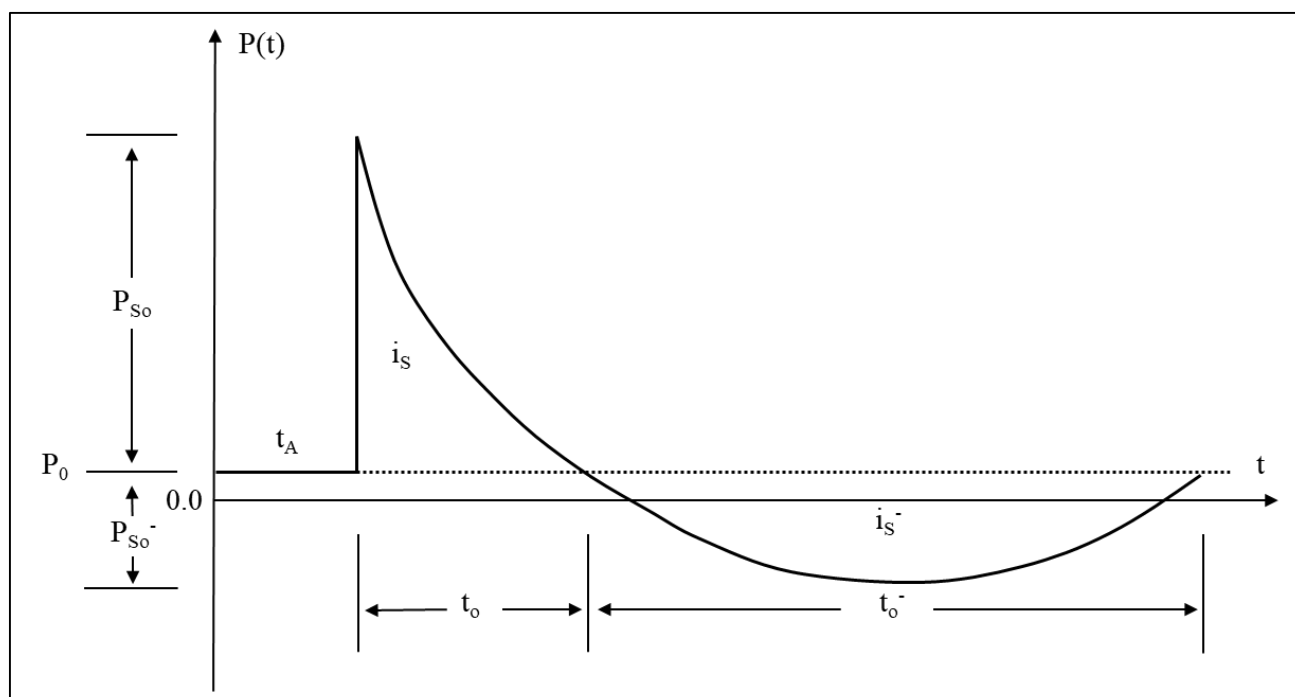
کلمات کلیدی: انفجار، ضریب کاهش، رابطه فریدلندر، روابط ضریب کاهش، شیب نمودار فشار - زمان، ضریب شکل.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.286856.2460	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.286856.2460	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۴۰۰/۰۴/۱۶	۱۴۰۰/۰۴/۱۶	۱۴۰۰/۰۳/۲۵	۱۴۰۰/۰۲/۲۸
سید احمد حسینی hoseini@mut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

۱-۱- ضریب کاهش ریابطه نمای فشار انفجار

با پیشرفت فناوری، ماهیت تهدیدات نیز پیشرفت و توسعه یافته است و ضرورت دارد تا جهت مقابله مناسب در برابر این تهدیدات، شناخت کافی از این تهدیدات صورت گیرد. از جمله این تهدیدات، تهدیدات انفجاری می باشد که به صورت حملات تروریستی، هوایی و ... می تواند صورت گیرد. برای تحلیل و طراحی ایمن سازه ها در برابر چنین تهدیداتی، روش های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش ها، روش تحلیل تئوریک می باشد. در این روش، بارگذاری و سازه، به صورت ریاضی مدل شده و پاسخ سازه، با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل به دست می آید. طبق آزمایش ها و نتایج مشاهده شده از انفجارهای واقعی و تست های آزمایشگاهی، فشار انفجار در یک نقطه خاص، به صورت نمایی با زمان کاهش می یابد. جهت ارائه ریابطه ریاضی برای این کاهش فشار، روابط مختلفی ارائه شده است که یکی از مهم ترین این روابط، ریابطه فریدلندر می باشد [۱ و ۲]. طبق ریابطه فریدلندر، فشار انفجار به صورت نمایی با زمان کاهش می یابد (مطابق شکل ۱ و ریابطه ۱):



شکل ۱: رفتار موج انفجار ایده آل بعد از انفجار در هوا [۱ و ۳]

$$P(t) = P_0 + P_{S_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

در ریابطه ۱ و شکل ۱:

i_s : میزان ایمپالس فاز مثبت انفجار

i_s^- : میزان ایمپالس فاز منفی انفجار

$P(t)$: میزان کل فشار استاتیک نقطه مورد نظر در هر لحظه

P_0 : فشار هوای محیط اطراف

P_{So} : حداکثر فشار (بیش فشار) ناشی از انفجار در فاز مثبت

P_{So}^- : حداکثر فشار (بیش فشار) ناشی از انفجار در فاز منفی

t_o : مدت زمان فاز مثبت انفجار

t_o^- : مدت زمان فاز منفی انفجار

t_A : زمان رسیدن موج انفجار به نقطه مورد نظر

b : یک ضریب بدون بعد است که نرخ کاهشی شیب نمودار فشار - زمان را نشان می‌دهد.

برای محاسبه ایمپالس فاز مثبت انفجار از معادله دیفرانسیل زیر استفاده می‌شود که مربوط به سطح زیر منحنی فشار - زمان می‌باشد (رابطه‌ی ۲):

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_o} P(t) dt = P_{So} * t_o \left[\frac{1}{b} - \frac{(1 - e^{-b})}{b^2} \right] \quad (2)$$

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در این رابطه، ضریب کاهشی b می‌باشد. ضریب کاهشی در واقع شکل موج را توصیف می‌کند. این پارامتر به‌عنوان فاکتوری قابل تنظیم انتخاب می‌شود تا بتواند مقدار ایمپالس مناسبی را با توجه به نمودار فشار - زمان برای موج انفجار ارائه کند. مقدار این ضریب بدون بعد بر اساس فشارهای بازتابی یا همان فشار رویداد متفاوت خواهد بود. روابط مختلفی برای محاسبه ضریب کاهشی تابع نمایی ارائه شده است. کینی و گراهام مقادیر ضریب کاهشی موج را بر اساس نسبت لحظه‌ای فشار به حداکثر فشار رویداد فاز مثبت انفجار، محاسبه نمودند. همچنین آن‌ها به ارائه رابطه‌ای برای ضریب کاهشی تابع نمایی پرداختند که در این رابطه، ضریب کاهشی با شدت انفجار رابطه مستقیم دارد و از ایمپالس فاز مثبت انفجار برای محاسبه ضریب کاهشی موج استفاده می‌نماید [۴]. تحقیقات دیگری توسط محققین مختلف برای محاسبه این ضریب کاهشی انجام شده است که از این میان می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط اسماعیل و موری، لام، لارچ، تیک و گیکن، گرزاس و ارل، کارلوس و سولوموس اشاره کرد [۵-۱۰]. علاوه بر تحقیقات مذکور، تأثیر استفاده از این ضریب کاهشی، در مطالعات مختلف بررسی شده است که از جمله می‌توان به تحقیقات کینگری و بولماش، بروگرس و وانتوم، مانموهان داس گول و همکاران، شیربهات و گول، علیم اولاه و همکاران اشاره نمود [۱۱-۱۵]. اما بهترین این روش‌ها استفاده از مساحت زیر نمودار فشار - زمان موج انفجار می‌باشد. روش کار بدین صورت است که با مساوی قرار دادن مساحت زیر نمودار فشار - زمان ارائه شده توسط رابطه فریدلندر با ایمپالس واقعی انفجار (i_s)، ضریب کاهشی b به دست می‌آید.

همان‌طور که بیان شد روش‌های مختلفی برای محاسبه ضریب کاهشی فشار انفجار ارائه شده است منتها مقایسه بین این روش‌ها و دقت هر کدام از روش‌های فوق مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین در این تحقیق، با بررسی روش‌های مختلف مذکور، به ارائه یک روش جدید پرداخته می‌شود تا بیشترین تطابق رابطه ریاضی با فشار واقعی انفجار، جهت تحلیل‌های دقیق ریاضی و محاسباتی، به دست آید.

نوآوری اصلی این مقاله ارائه رابطه‌ای دقیق برای محاسبه ضریب کاهشی b به‌منظور محاسبه هر چه دقیق‌تر فشار ناشی از انفجار می‌باشد. در ادامه رابطه به‌دست آمده با سایر روابط موجود مقایسه شده است. همچنین به شرح و مقایسه مختصر سایر روابط نیز پرداخته شده است.

۲-۱- روابط ارائه شده برای محاسبه ضریب کاهش موج انفجار

تاکنون، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص یافتن رابطه‌ای دقیق برای محاسبه ضریب کاهش موج انفجار صورت گرفته است که در قالب جدول (۱) آورده می‌شود [۴-۱۰].

جدول ۱: روابط ارائه شده برای ضریب کاهش موج انفجار

ردیف	سال	عنوان رابطه	روابط ارائه شده برای ضریب کاهش موج انفجار
۱	۱۹۸۵	رابطه کینی-گراهام	$\frac{I}{A} = P_{So} * t_o \left[\frac{1}{b} - \frac{(1 - e^{-b})}{b^2} \right]$ (۳)
۲	۱۹۹۳	رابطه اسماعیل - موری	$b = 2.3 \left(\frac{t_o}{t} \right) \log \left(\frac{P_{So}}{P} \right)$ (۴)
۳	۲۰۰۴	رابطه لگاریتمی لام	$\ln \left(b \left \frac{P_{smin}}{P_{smax}} \right \right) + b + 1 = 0$ (۵)
۴	۲۰۰۴	رابطه چند درجه‌ای لام	$b = Z^2 - 3.7 Z + 4.2$ (۶)
۵	۲۰۰۶	رابطه لارچ	$b = 5.2777 Z^{-1.1975}$ (۷)
۶	۲۰۱۰	رابطه تیک - گیبن	$b = 1.52 Z^{-0.38} \quad (0.1 < Z < 30)$ (۸)
۷	۲۰۱۰	رابطه گزاس - ارل	$b = \sum_{i=1}^6 C_i Z^{i-1} \quad (0.3 \leq Z \leq 500)$ (۹)
۸	۲۰۱۶	رابطه کارلوس و سولوموس	$Y = C_0 + C_1 U + C_2 U^2 + \dots + C_n U^n$ (۱۰) $U = K_0 + K_1 T$ (۱۱)

پارامترهای مورد استفاده در روابط ۳ تا ۱۱ به شرح ذیل می‌باشند:

$\frac{I}{A}$: مقدار ایمپالس در واحد سطح

Z : فاصله مقیاس شده است که واحد آن در سیستم SI ، $m/kg^{1/3}$ می‌باشد و با استفاده از رابطه ۱۲ به دست می‌آید.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (12)$$

R : فاصله بین مرکز انفجار با نقطه مورد نظر بر روی سطح سازه

W : وزن ماده منفجره برحسب TNT معادل

P_{Smin} : حداکثر فشار در فاز منفی انفجار

P_{Smax} : حداکثر فشار در فاز مثبت انفجار

C_i : یک ضریب ثابت می‌باشد که مقادیر آن مطابق با جدول (۲) است:

جدول ۲: مقادیر ضریب ثابت C_i در رابطه‌ی گرزاس و ارل [۹]

Range ($m/kg^{1/3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$0.3 \leq Z < 0.95$	3.08473e + 2	-2.14692e + 3	5.95329e + 3	-8.22603e + 3	5.68743e + 3	-1.57341e + 3
$0.95 \leq Z < 2.4$	1.76074e + 1	-2.67855e + 1	1.78607e + 1	-5.65557e + 0	6.94164e - 1	0
$2.4 \leq Z < 6.5$	4.43216e + 0	-2.71877e + 0	7.41973e - 1	-9.34132e - 2	4.46971e - 3	0
$6.5 \leq Z < 40$	7.11610e - 1	-6.26846e - 2	3.32532e - 3	-8.24049e - 5	7.61887e - 7	0
$40 \leq Z \leq 500$	2.51614e - 1	-1.76758e - 3	9.51638e - 6	-2.19712e - 8	1.79135e - 11	0

Y : لگاریتم ضریب کاهشی موج

T : لگاریتم فاصله‌ی مقیاس شده

n : درجه چندجمله‌ای

$\{C_0, \dots, C_n\}$ و K_0 و K_1 : ضرایب ثابت رابطه کارلوس و سولوموس برای حالت‌های فشار انعکاسی و هوای آزاد می‌باشند که مقادیر

این ضرایب در جدول (۳) آمده است:

جدول ۳: مقادیر ضرایب ثابت $\{C_0, \dots, C_n\}$ و K_0 و K_1 در رابطه‌ی کارلوس و سولوموس [۱۰]

Constant	Spherical free-air burst			
	$0.4 \leq Z < 2.0 m/kg^{1/3}$		$2.0 \leq Z < 40.0 m/kg^{1/3}$	
	Incident	Reflected	Incident	Reflected
K_0	-1.21918	-1.19297	0.91029	-0.81111
K_1	-1.02211	-2.1578	-1.30156	-0.79605
C_0	-48.18977	2.06997	-0.09812	36.02749
C_1	-149.9999	16.80778	1.35537	131.07634
C_2	-98.92512	72.93669	0.3035	149.9999
C_3	62.46699	149.9999	-1.25125	24.5694
C_4	30.85296	144.25099	-2.43775	-45.12465
C_5	-37.17606	32.36555	-2.88558	-1.25611
C_6	15.40019	-33.83582	6.77186	15.84096
C_7	10.37512	-4.03564	5.93303	-0.979
C_8	-9.26648	14.50199	-11.10183	-0.1457
C_9	9.01084	1.0377	7.47192	4.87916
C_{10}	1.86709	-0.74065	15.76656	2.68134
C_{11}	0.15419	4.07724	-17.02748	0.41271
C_{12}	5.08837	-2.76428	-16.90636	-
C_{13}	1.0771	0.49798	-	-
C_{14}	2.46682	-	-	-
C_{15}	3.61837	-	-	-
C_{16}	1.10167	-	-	-

لام با کمک همکاران خود (۲۰۰۴) و با استفاده از نمودار فشار ۳-۱- مقایسه روابط ارائه‌شده برای محاسبه‌ی

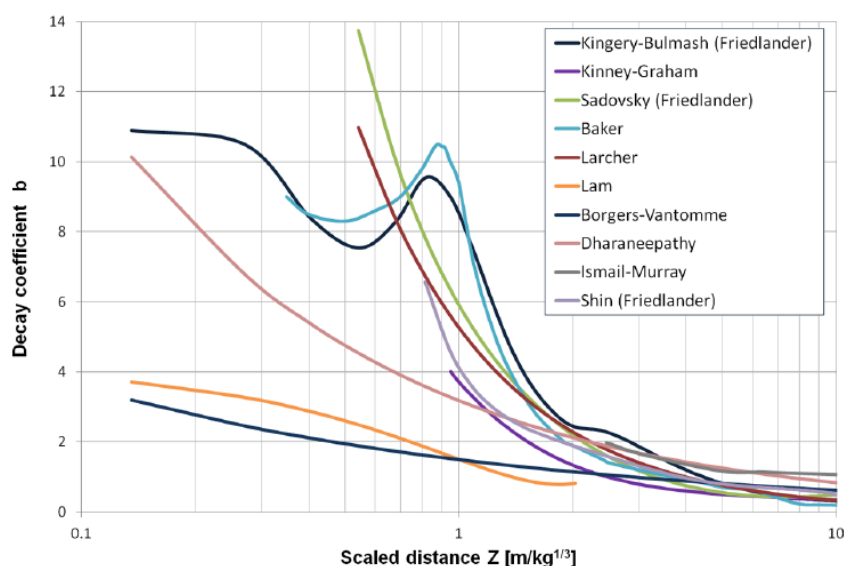
ضرایب کاهشی موج

در بخش‌های قبلی، روابط مختلفی برای محاسبه ضریب کاهشی موج مورد بررسی قرار گرفت؛ در ادامه به مقایسه این روابط با

یکدیگر در قالب شکل (۲) پرداخته شده است [۱۰]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در فاصله‌های مقیاس شده کمتر از یک ($Z < 1$)

$(m/kg^{1/3})$ ، میزان ضریب کاهشی به‌دست‌آمده از روابط مختلف، با یکدیگر اختلاف زیادی دارند و از فواصل مقیاس شده بیشتر از دو ($Z > 2$)

$(m/kg^{1/3})$ ، همپوشانی روابط افزایش می‌یابد.

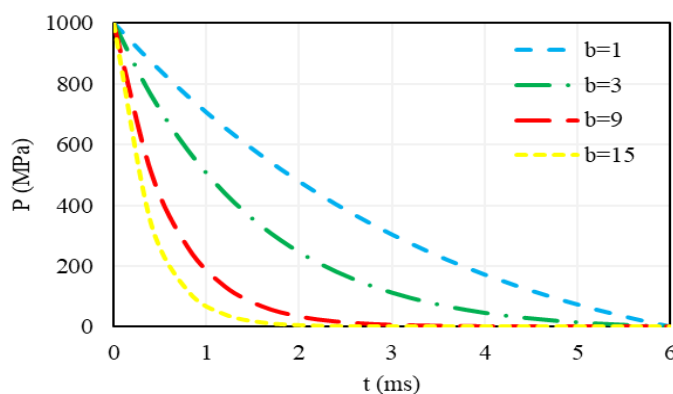


شکل ۲: تغییرات ضریب کاهشی بر اساس فاصله مقیاس شده بر مبنای روابط مختلف [۹]

۲- روش تحقیق

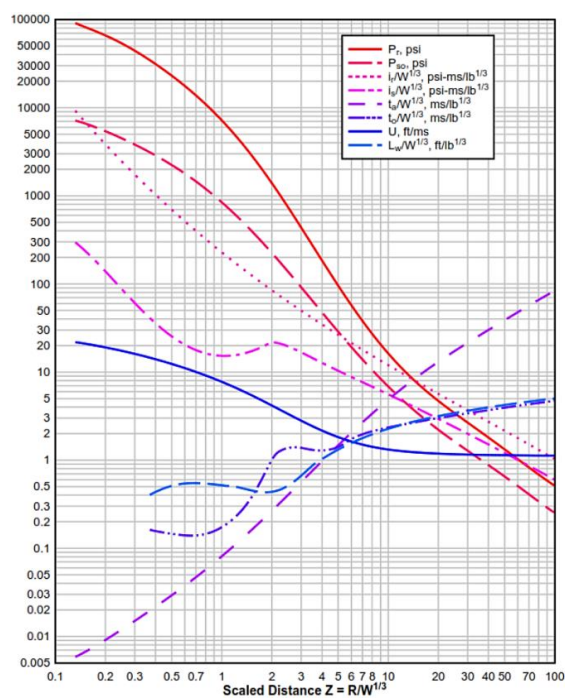
همان‌طور که قبلاً اشاره شد ضریب کاهشی یک پارامتر بدون بعد است که نرخ کاهشی شیب نمودار فشار - زمان را توصیف می‌کند. مقادیر آن تأثیر زیادی در ایمپالس و در نتیجه تغییر شکل‌های ایجاد شده در سازه دارد. به‌طور کلی با افزایش ضریب کاهشی موج انفجار، مقدار ایمپالس نسبت به حالت مثلی کاهش می‌یابد و در معادله فریدلندر (رابطه‌ی ۱) اثر این ضریب به‌صورت نمایی است.

در شکل (۳)، تأثیر مقادیر مختلف ضریب کاهشی بر روی نمودار فشار - زمان نشان داده شده است. وقتی $b=1$ می‌باشد نمودار حالت مثلی دارد و هر چه مقدار آن افزایش می‌یابد از حالت مثلی دور شده و مقدار ایمپالس کاهش خواهد یافت.

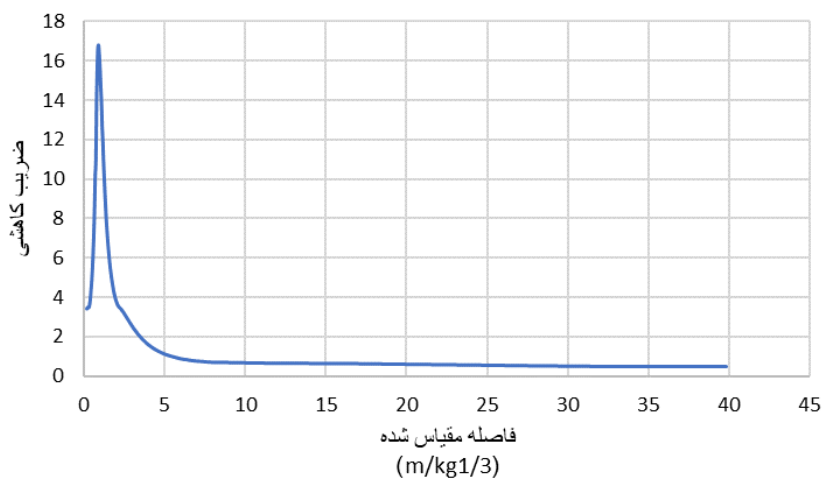


شکل ۳: مقایسه مقادیر مختلف ضریب کاهشی

برای محاسبه ضریب کاهشی b ، ابتدا مقادیر فشار، زمان و ایمپالس واقعی انفجار با استفاده از فاصله مقیاس شده از روی شکل ۴ (شکل ۷-۲ دستورالعمل *UFC 3-340-02*) به دست آورده شده، سپس با مساوی قرار دادن مقدار ایمپالس واقعی با ایمپالس به دست آمده از رابطه ۲، مقدار ضریب کاهشی به دست می‌آید؛ در نتیجه رابطه‌ای بین این ضریب و فاصله مقیاس شده ایجاد می‌شود که بر اساس این رابطه می‌توان نموداری بین فاصله مقیاس شده و ضریب کاهشی به‌صورت شکل (۵) ایجاد نمود.



شکل ۴: پارامترهای فاز مثبت موج انفجار کروی در هوای آزاد [۱]



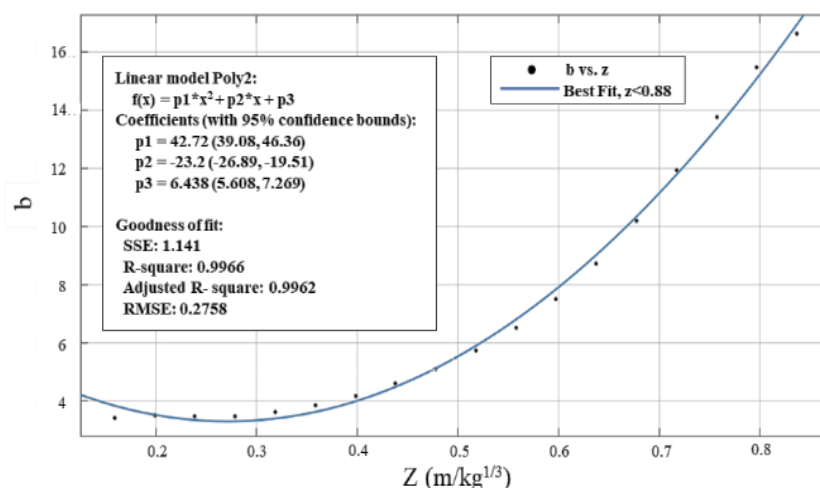
شکل ۵: نمودار ضریب کاهشی بر حسب فاصله مقیاس شده

با برازش کردن یک تابع مناسب برای هر قسمت صعودی و نزولی از نمودار شکل (۵)، می‌توان رابطه‌ای برای ضریب کاهشی b بر حسب فاصله مقیاس شده $Z (m/kg^{1/3})$ ایجاد کرد:

– قسمت صعودی نمودار

برای برازش قسمت صعودی از رابطه‌ی ۱۳ استفاده می‌شود و نمودار شکل (۶) پدید می‌آید:

$$b = 42.72 Z^2 - 23.2 Z + 6.438 \quad 0.2 < Z < 0.88 (m/kg^{1/3}) \quad (13)$$

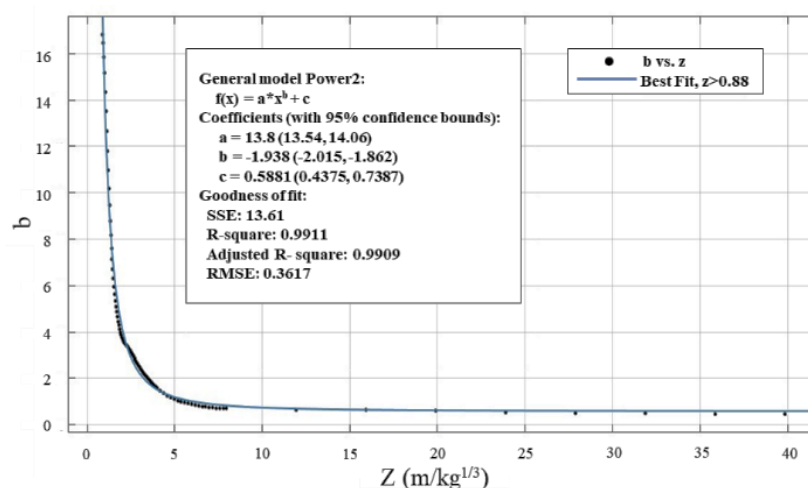


شکل ۶: نمودار برازش شده قسمت صعودی

- قسمت نزولی نمودار

برای برازش قسمت نزولی از رابطه‌ی ۱۴ استفاده شده است و نمودار شکل (۷) به دست می‌آید:

$$b = 13.8 Z^{-1.938} + 0.5881 \quad 0.88 < Z < 40 \text{ (m/kg}^{1/3}\text{)} \quad (14)$$



شکل ۷: نمودار برازش شده قسمت نزولی

مطابق با شکل (۶) و (۷)، ضریب رگرسیون (R^2) در قسمت صعودی و نزولی به ترتیب مقادیر ۰/۹۹۶۶ و ۰/۹۹۱۱ را نشان می‌دهد. مقدار بالا و نزدیک به یک ضریب رگرسیون نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که روابط ۱۳ و ۱۴ که برای محاسبه ضریب کاهشی ارائه شده‌اند از دقت بالایی برخوردار هستند.

۳- نتایج و بحث

محاسبه ضریب کاهشی با استفاده از رابطه ارائه شده در این تحقیق برای هر W و R که فاصله مقیاس شده‌ای در بازه‌ی ۰/۲ تا ۴۰ $m/kg^{1/3}$ داشته باشد امکان پذیر است. در جدول‌های (۴) و (۵) به مقایسه‌ی ضریب کاهشی به دست آمده از طریق رابطه احصا شده در این تحقیق و سایر روابط موجود برای فاصله‌ی مقیاس شده $Z = 0.5, 3 m/kg^{1/3}$ و ماده‌ی منفجره به وزن $W = 100 kg$ پرداخته شده است:

جدول ۴: مقایسه ضریب کاهشی محاسبه شده با استفاده از روابط مختلف برای $Z = 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$

ردیف	رابطه	b
۱	بر اساس UFC و معادله ایمپالس مثبت (رابطه ۲)	۵/۴۶
۲	کینی و گراهام	۱/۴۹
۳	اسماعیل و موری	۰/۳۱۴
۴	لام (لگاریتمی)	۲/۴۲۱
۵	لام (چندجمله‌ای)	۲/۶
۶	لارچ	۱۲/۱۰۴
۷	تیک و گیبکن	۱/۹۸
۸	گزراس و ارل	۱/۴۳
۹	کارلوس و سولوموس	۵/۴۲
۱۰	رابطه‌ی احصا شده در این تحقیق (رابطه ۱۲)	۵/۵۲

جدول ۵: مقایسه ضریب کاهشی محاسبه شده با استفاده از روابط مختلف برای $Z = 3 \text{ m/kg}^{1/3}$

ردیف	رابطه	b
۱	بر اساس UFC و معادله ایمپالس مثبت (رابطه ۲)	۲/۴۸
۲	کینی و گراهام	۰/۸۳۸
۳	اسماعیل و موری	۱/۵۱
۴	لام (لگاریتمی)	۰/۸۷۸
۵	لام (چندجمله‌ای)	۲/۱
۶	لارچ	۱/۴۲
۷	تیک و گیبکن	۱/۰۰۱
۸	گزراس و ارل	۰/۷۹۷
۹	کارلوس و سولوموس	۲/۴۸
۱۰	رابطه‌ی احصا شده در این تحقیق (رابطه ۱۳)	۲/۲۳

با توجه به جدول‌های (۴) و (۵)، این نتیجه برداشت می‌شود که روابط احصا شده در این تحقیق از دقت بالایی برای محاسبه‌ی ضریب کاهشی در فاز مثبت موج انفجار برخوردار هستند. رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب در حدود ۹۹ و ۸۹ درصد نسبت به دستورالعمل UFC و در حدود ۹۸ و ۸۹ درصد نسبت به رابطه کارلوس و سولوموس برای محاسبه ضریب b همپوشانی دارند. همچنین روابط به دست آمده بسیار ساده هستند، زیرا تنها عامل مؤثر در آن‌ها فاصله‌ی مقیاس شده می‌باشد که این امر سرعت انجام محاسبات را افزایش می‌دهد. به‌طور کلی در خصوص سایر روابط نیز می‌توان گفت که از دقت مطلوبی برخوردار نمی‌باشند.

در ادامه تأثیر پارامتر کاهش‌ی احصا شده برای محاسبه‌ی فشار واقعی انفجار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای محاسبه‌ی فشار واقعی در زمان رسیدن موج انفجار (t_A) که فشار بیشینه هست از معادله‌ی فریدلندر (رابطه ۱) استفاده می‌شود. همچنین مقادیر پارامترهای مورد نیاز در معادله‌ی فریدلندر (P_{So} و t_o) و t_A از شکل (۸) به دست می‌آید.

الف) هنگامی که $Z = 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ و $t = t_A = 0.7152 \text{ ms}$ باشد:

• با استفاده از b رابطه ۱۲:

$$P(0.7152) = 0.1013 + 30.3555 \times \left(1 - \frac{0.7152}{1.4843}\right) \times e^{-5.52 \left(\frac{0.7152}{1.4843}\right)} = 1.2021 \text{ MPa}$$

• بر اساس ضریب کاهش UFC :

$$P(0.7152) = 0.1013 + 30.3555 \times \left(1 - \frac{0.7152}{1.4843}\right) \times e^{-5.46 \left(\frac{0.7152}{1.4843}\right)} = 1.1548 \text{ MPa}$$

ب) هنگامی که $Z = 3 \text{ m/kg}^{1/3}$ و $t = t_A = 18.5068 \text{ ms}$ باشد:

• با استفاده از b رابطه ۱۲:

$$P(18.5068) = 0.1013 + 0.2155 \times \left(1 - \frac{18.5068}{12.4596}\right) \times e^{-2.23 \left(\frac{18.5068}{12.4596}\right)} = 0.0975 \text{ MPa}$$

• بر اساس ضریب کاهش UFC :

$$P(18.5068) = 0.1013 + 0.2155 \times \left(1 - \frac{18.5068}{12.4596}\right) \times e^{-2.48 \left(\frac{18.5068}{12.4596}\right)} = 0.0987 \text{ MPa}$$

از بررسی و مقایسه‌ی دو حالت برای محاسبه‌ی فشار واقعی انفجار نتایج ذیل برداشت می‌شود:

۱- در حالت الف، فشار واقعی انفجار محافظه‌کارانه‌تری نسبت به دستورالعمل UFC به دست می‌آید که این فشار تنها ۴ درصد بیشتر از فشار محاسبه‌شده بر اساس UFC می‌باشد.

۲- در حالت ب، فشار واقعی انفجار تقریباً برابر است با فشاری که بر اساس دستورالعمل UFC محاسبه‌شده است و اختلاف آن‌ها در حدود ۱ درصد می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان در طراحی سازه‌های تحت بار انفجاری، محاسبه‌ی دقیق بارهای ناشی از انفجار بر سازه می‌باشد. از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در محاسبه این بار انفجاری بر سازه، ضریب کاهش موج انفجار است که بر اساس رابطه فریدلندر در مقدار فشار مؤثر می‌باشد. مهندسین طراح برای محاسبه‌ی ضریب b با چالش انتخاب رابطه‌ی مناسب مواجه هستند زیرا اگر میزان فشار محاسبه‌شده وارد بر سازه زیاد باشد طراحی محافظه‌کارانه و غیراقتصادی می‌شود و اگر هم میزان این بارها کمتر از مقدار واقعی محاسبه شود سازه از استحکام کافی در برابر بارهای انفجاری برخوردار نخواهد بود. نتایج حاصل از تحقیق صورت گرفته به شرح زیر می‌باشد:

۱- در بین روابط موجود برای محاسبه‌ی ضریب کاهش، رابطه‌ی کارلوس و سولوموس در فاز مثبت موج انفجار جواب مطلوبی دارد که می‌توان از آن استفاده نمود.

۲- در این تحقیق برای محاسبه‌ی ضریب کاهش b ، رابطه‌های دقیق زیر به دست آورده شده است:

$$b = 42.72 Z^2 - 23.2 Z + 6.438 \quad 0.2 < Z < 0.88 \text{ (m/kg}^{1/3}\text{)}$$

$$b = 13.8 Z^{-1.938} + 0.5881 \quad 0.88 < Z < 40 \text{ (m/kg}^{1/3}\text{)}$$

۳- در این تحقیق از سه طریق به بررسی دقت بالا روابط احصا شده برای ضریب کاهشی b پرداخته شده است: الف) بر اساس ضریب رگرسیون نمودارهای برازش شده که مقدار R^2 نزدیک به یک می باشد؛ ب) مطابق با مقایسه‌ی بین مقادیر ضریب b محاسبه شده با سایر روابط موجود؛ ج) بر اساس فشار واقعی انفجار که در دو مثال عددی محاسبه شده است.

پیشنهادها

استفاده از تابع مثلثی برای محاسبه‌ی فشار ناشی از انفجار مناسب نخواهد بود لذا توصیه می‌شود تحقیقات با استفاده از تابع نمایی که در آن ضریب کاهشی مؤثر است انجام شود.

مراجع

- [1] U.S. Department of Defense. (2014). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. UFC 3-340-02.
- [2] Smith, P. D., Hetherington, J. G. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Butterworth-Heinemann.
- [3] Zamani, J., Mousavi, M.W. (2015). *Explosion mechanics, hydrocodes and numerical analysis*. Tehran. K.N. Toosi University Press.
- [4] Kinney, G. F., Graham, K. J. (2013). *Explosive Shocks in Air*. Springer.
- [5] Ismail, M. M., Murray, S. G. (1993). *Study of the Blast Wave Parameters from Small Scale Explosions*. Prop. Exp. Pyro. 18(1). 11-17.
- [6] Lam, N., Mendis, P., Ngo, T. (2004). *Response Spectrum Solutions for Blast Loading*. Electron. J. Struct. Eng. 4(4). 28-44.
- [7] Larcher, M., Herrmann, N., Stempniewski, L. (2006). *Explosions Simulation Leichter Hallenhüllkonstruktionen*. Bauingenieur. 81(6). 271-277.
- [8] Teich, M., Gebbeken, N. (2010). *The Influence of the Underpressure Phase on the Dynamic Response of Structures Subjected to Blast Loads*. Int. J. Prot. Struct. 1(2). 219-233.
- [9] Guzas, L., Earls, J. (2010). *Air Blast Load Generation for Simulating Structural Response*. Steel Compos. Struct. 10(5). 429-455.
- [10] Karlos, V., Solomosand, G., Larcher, M. (2016). *Analysis of the Blast Wave Decay Coefficient Using the Kingery–Bulmash Data*. Int. J. Prot. Struct. 7(3). 409-429.
- [11] Kingery, C. N., Bulmash, G. (1984). *Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. U.S. Army Armament and Development Center. Ballistics Research Laboratory.
- [12] Borgers, J., Vantomme, J. (12-14 August 2008). *Improving the Accuracy of Blast Parameters Using a New Friedlander Curvature α* . In DoD Explosives Safety Seminar.
- [13] Goel, M. D., Matsagar, V. A., Gupta, A. K., Marburg, S. (2012). *Review of Blast Wave Parameters*. Def. Sci. J. 62(5). 300-306.
- [14] Shirbhate, P. A., & Goel, M. D. (2021). *A critical review of blast wave parameters and approaches for blast load mitigation*. Archives of Computational Methods in Engineering, 28(3), 1713-1730.
- [15] Ullah, A., Ahmad, F., Jang, H. W., Kim, S. W., & Hong, J. W. (2017). *Review of analytical and empirical estimations for incident blast pressure*. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(6), 2211-2225.