



## Dynamic Behavior of Composite Floor Consisting Profiled Steel Sheet and Dry Board under Explosion Load

F. A. Gandomkar\*, S. Parsafar, V. Razavi Tosee, N. Samimifard

Department of Structure, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

**ABSTRACT:** One of the kinds of structural floor systems is consisting of profiled steel sheet and dry board which is connected by self-drilling and self-tapping screws. This research aims to study the behavior of mentioned floor under explosion load. For this purpose, effects of various parameters such as the thickness of the dry board and profiled steel sheet, kind of dry board, screw spacing, boundary conditions, floor dimensions, using of double profiled steel sheet and dry board, and also weight and distance of explosive material from the center of the floor, on the nonlinear dynamic behavior of the mentioned floor are studied. This study was performed by using the numerical finite element method taking advantage of ABAQUS software. The research results showed by varying parameters such as thickness and kind of dry board, dimensions and boundary conditions of the floor, using of double profiled steel sheet and dry board, and also distance and weight of explosive materials, significant changes are created in maximum displacement and strain energy of floor. But, varying other above-mentioned parameters did not create important changes in them. The profiled steel sheet and dry board reached their yield stresses under various conditions, though in many conditions they did not reach their yield stresses. The results of current research present great help to researchers and designers in identification effective and ineffective parameters on the behavior of studied floor under explosion load.

### Review History:

Received: Dec. 17, 2019

Revised: Feb. 01, 2020

Accepted: Mar. 10, 2020

Available Online: Apr. 03, 2020

### Keywords:

Explosion

Composite floor system

Finite element

Nonlinear dynamic analysis

PSSDB

## 1. INTRODUCTION

One of the structural composite floor systems is consisting of profiled steel sheet (PSS) and dry board (DB) which are connected by self-drilling and self-tapping screws. This system is known as profiled steel sheet dry board (PSSDB) and was introduced by Wright and Evans in 1986 [1] and also Wright *et al.* in 1989 [2]. The central core of the system is PSS and the DB is screwed to PSS in one layer or two layers [2]. In addition, this system may be made by two layers of the PSS and DB, which the recent system is known as double profiled steel sheet double dry board (DPSSDDB) [3]. Fig. 1 shows components of the PSSDB system.

In the last decades, many studies were performed about the effects of explosion load on the dynamic behavior of structures. In this case, dynamic behaviors of various floor systems under explosion load were examined. In recent studies, Iannitti *et al.* performed a study on the dynamic behavior of reinforced concrete slabs under explosion load [5]. Also, Abdel Wahab *et al.* investigated the dynamic behavior of composite V shape panels under explosion load [6]. Based on accomplished studies, no research was found on revealing the dynamic behavior of the PSSDB or DPSSDDB system under explosion load. Therefore, the main aim of this study is to investigate the dynamic behaviors of the PSSDB and DPSSDDB systems under explosion load. For this purpose,

\*Corresponding author's email: Farhad@jsu.ac.ir

effects of various parameters such as the thickness of PSS and DB, kind of DB, screw spacing, floor dimensions, boundary conditions, use of double PSS and double DB, distance, and weight of explosive materials, are evaluated on the dynamic behavior of the studied systems.

## 2. METHODOLOGY

Results of the current study were obtained from the numerical finite element method, implemented by ABAQUS software. The option of CONWEP is utilized to apply the explosion load on the surface of DB. In the current study, explosion load is applied to the system in various weights and distances from the center of DB. First, modal analysis was performed on all structural models of the studied systems, to extract their natural frequencies. Second, for all structural models, Rayleigh coefficients were calculated by the first and fourth natural frequencies of the structural models and also the damping ratio of 1.1% which was measured by Gandomkar *et al.* [7] for the studied system. Third, nonlinear dynamic time history analysis was performed on the structural models.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Due to the main objective and the sub-objectives of the study, 28 structural models were simulated to show the effects of various parameters on the dynamic behavior of the system under explosion load. These models were verified



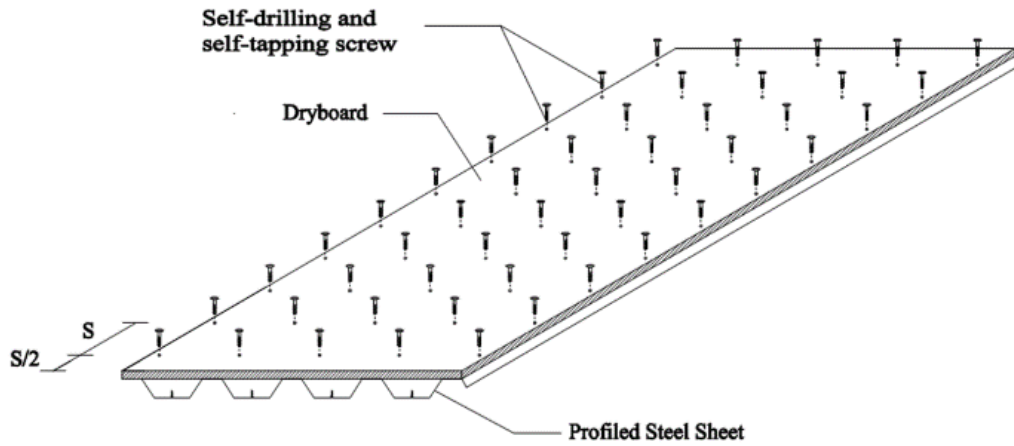


Fig. 1. PSSDB system [4]

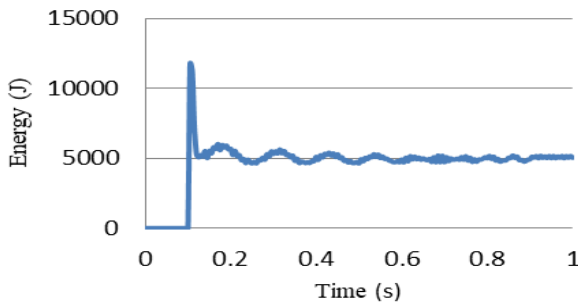


Fig. 2. Time history of strain energy in the base model

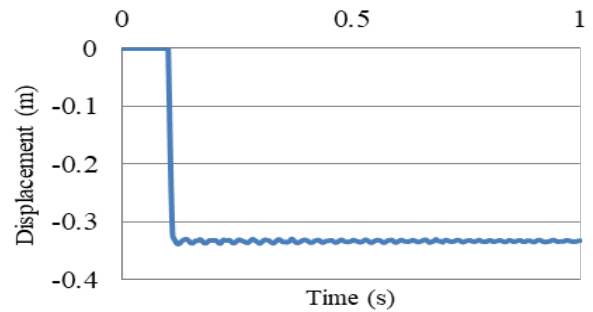


Fig. 3. Time history of displacement at the center of DB in the base model

by the study of Gandomkar *et al.* [5]. A model is considered as a base model with 0.8 mm thickness of the PSS, 18 mm thickness of the DB (Plywood), 200 mm screw spacing, 2385 mm width, 2800 mm length, and both ends simply support, under loading of 10 kg TNT as explosive material with 2 m distance of TNT from the center of DB. For this model, the time history of strain energy, the time history of displacement at the center of DB, and also Von Mises stress contour is shown in Figs. 2 to 4.

The explosion load applies to the system at a time of 0.1 sec. According to Figs. 2 and 3, it is shown a gap in time of 0.1 sec. After that, meaningful changes can be seen in strain energy and displacement time histories, and so free vibration behavior of the studied system is shown after the time of 0.1 sec. By using Fig. 4, maximum Von Mises stresses can be extracted in the PSS and DB. These stresses compare with the yield stresses of PSS and DB materials to show their yielding.

The results uncovered by decreasing thickness of Plywood as DB from 18 mm to 12 mm, maximum displacement increased by 76.35% and maximum strain energy decreased by 29.29%. In addition, by increasing the thickness of PSS from 0.8 mm to 1.0 mm, maximum displacement decreased by 5.63% and maximum strain energy increased by 0.6%. Also, the results showed varying kinds of DB changed the

maximum displacement and strain energy of the system, greatly. Furthermore, by reducing screw spacing from 200 mm to 100 mm maximum displacement of the system decreased by 2.69%. Also, by increasing screw spacing from 200 mm to 300 mm, the maximum displacement of the floor system increased by 2.29%. Moreover, when screw spacing increased from 200 mm to 300 mm, the maximum strain energy of the system reduced by only 1.78%. The results revealed by increasing the width of the system from 795 mm to 3975 mm, maximum displacement decreased by 22.14%, and maximum strain energy increased by 364.13%. Also, by increasing the length of the system from 2000 mm to 3200 mm, maximum displacement and strain energy increased by 62.37% and 41.27%, respectively. The results showed varying supports of the system from Pin-Pin in two sides of the system (perpendicular on length of system) to Pin-Roller, maximum displacement and strain energy increased by 165.48% and 13.21%, respectively. On the other hand, by changing supports from Pin-Pin to four-pin supports in four sides of the system, maximum displacement decreased by 30.56%, and maximum strain energy increased by 61.44%. In addition, by converting the PSSDB system to the DPSSDDB system, maximum displacement not changed much, but maximum strain energy was reduced by 45.63%. Also, by

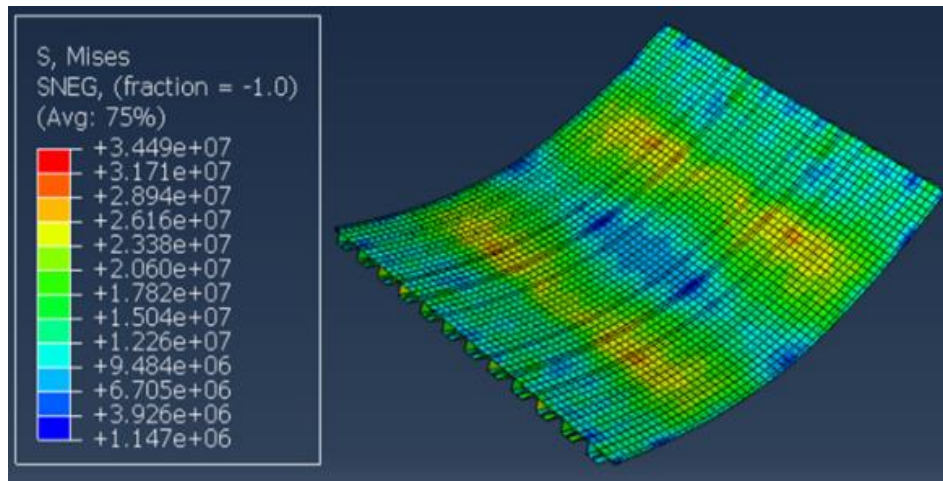


Fig. 4. Von Mises stress contour in the base model

varying supports in both ends of the DPSSDDB system, maximum displacement and strain energy changed by 36.28% and 23.02%, respectively. Furthermore, it was shown by changing the distance of TNT from the center of DB from 2 m to 14 m, when the weight of TNT was constant and equal to 10 kg, maximum displacement decreased by 77.08%, and maximum strain energy-reduced manifold. In the end, the results revealed by the increasing weight of TNT from 10 kg to 30 kg, when the distance of TNT from the center of DB was constant and equal to 2 m, maximum displacement and strain energy increased by 253.86% and 33.34%, respectively.

By comparing the Von Mises stresses of PSS and DB with their yield stresses, it was uncovered unknown effects of studied parameters on conditions of yielding PSS and DB.

#### 4. CONCLUSION

This paper investigates nonlinear dynamic behaviors of the PSSDB and DPSSDDB systems under explosion load by using the numerical finite element method. The results are extracted from ABAQUS software. Effects of changing various parameters such as the thickness of DB and PSS, kind of DB, screw spacing, boundary conditions, floor dimensions, distance and weight of the explosive load, and also using of double PSS and double DB, were investigated on mentioned behaviors. The results of the study showed changing the thickness of DB, kind of DB, floor dimensions, boundary conditions, weight and distance of explosive load, and also using of double PSS and double DB, had considerable effects on varying displacement and strain energy of the system. On the other hand, changing screw spacing and thickness of PSS had not much effect on their changes. Based on the sub-objectives of this study, the PSS and DB reached their yield

stresses in some of the conditions but did not reach in some other conditions.

#### REFERENCES

- [1] H. Wright, H. Evans, Profiled steel sheeting for the replacement of timber flooring in building renovation, SERC Grant GR/D/76875, in, United Kingdom, 1986.
- [2] H. Wright, H. Evans, C. Burt, Profiled steel sheet/dry boarding composite floors, *Structural Engineer*, 67 (1989) 114-120.
- [3] F. Sharafi, F.A. Gandomkar, Fundamental natural frequency in structural composite floor constructed of two profiled steel sheet and two dry board, in: 4th International Congress of Civil, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University, Iran, 2016 (in Persian).
- [4] F.A. Gandomkar, Determining comfort level of profiled steel sheeting dry board floor system, Ph.D. Thesis, National University of Malaysia, 2012.
- [5] G. Iannitti, N. Bonora, G. Curiale, S. De Muro, S. Marfia, A. Ruggiero, E. Sacco, S. Scafati, G. Testa, Analysis of reinforced concrete slabs under blast loading, *Procedia Structural Integrity*, 9 (2018) 272-278.
- [6] M. Abdel Wahab, S. Mazek, M. Abada, M. Abdel Shafy, Blast hazard impact on V-shape composite panel performance, *Journal of Engineering Science and Military Technologies*, 2(2) (2018) 90-99.
- [7] F.A. Gandomkar, W.H. Wan Badaruzzaman, S.A. Osman, A. Ismail, Experimental and numerical investigation of the natural frequencies of the composite profiled steel sheet dry board (PSSDB) system, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 55(1) (2013) 11-21.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

F. A. Gandomkar, S. Parsafar, V. Razavi Tosee, N. Samimifard, *Dynamic Behavior of Composite Floor Consisting Profiled Steel Sheet and Dry Board under Explosion Load*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 633-636.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17546.6595](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17546.6595)





## رفتار دینامیکی سقف مرکب متشکل از پروفایل فولادی تاخورد و صفحه تخت تحت بار انفجار

فرهاد عباس گندمکار\*، سعید پارسافر، سید وحید رضوی طوسی، نگار صمیمی فرد

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

### کلمات کلیدی:

انفجار

سیستم سقف مرکب

اجزاء محدود

آنالیز دینامیکی غیرخطی

PSSDB

**خلاصه:** یکی از انواع سیستم سقف‌های سازه‌ای تشکیل شده است از ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت که به وسیله پیچ‌های خودکار به هم متصل شده‌اند. هدف از تحقیق حاضر بررسی رفتار سقف مذکور تحت بار انفجار است. برای این منظور، تأثیر پارامترهای مختلفی چون: ضخامت صفحه تخت و ورق فولادی تاخورد، نوع صفحه تخت، فاصله پیچ‌های خودکار، شرایط مرزی، ابعاد سقف، دابل کردن صفحات مذکور و همچنین وزن و فاصله ماده منفجره از مرکز سقف، بر رفتار دینامیکی غیرخطی سقف مذکور مطالعه شد. این بررسی با استفاده از روش عددی اجزا محدود و با بهره گرفتن از نرم‌افزار آباکوس انجام گردید. نتایج تحقیق نشان دادند که با تغییر پارامترهایی چون ضخامت و نوع صفحه تخت، ابعاد و شرایط مرزی سقف، دابل کردن عناصر اصلی و همچنین فاصله و وزن مواد منفجره تغییرات زیادی در تغییر مکان حداکثر و انرژی کرنشی سقف ایجاد می‌گردد، ولی تغییر سایر پارامترهای فوق‌الشاره تغییرات زیادی در آنها ایجاد نمی‌کنند. تحت شرایط مختلف سازه‌ای و بارگذاری سقف، در بعضی مدل‌ها ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت به تنش تسلیم رسیدند، هرچند آنها در بسیاری از موارد به تنش تسلیم خود نمی‌رسند. نتایج تحقیق حاضر کمک شایانی به محققین و طراحان سازه در شناسایی پارامترهای مؤثر و غیرمؤثر بر رفتار سقف مورد مطالعه تحت بار انفجار می‌نماید.

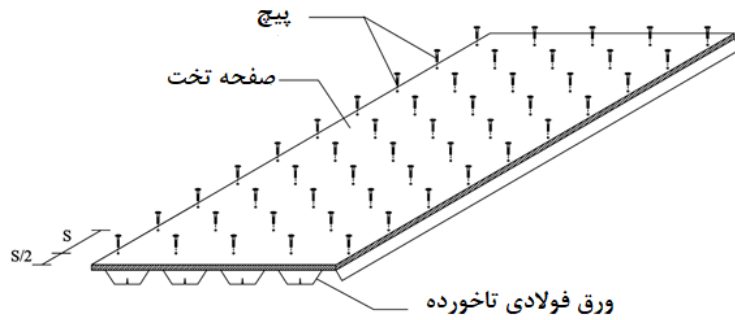
### ۱- مقدمه

یکی از سقف‌های سازه‌ای تشکیل شده است از ورق فولادی تاخورد ((Profiled Steel Sheet (PSS)) و صفحه تخت (Dry Board (DB)) که به وسیله پیچ‌های خودکار (Self drilling and Self tapping) به هم متصل شده‌اند. این سقف بنام ((Profiled Steel Sheet Dry Board (PSSDB)) شناخته شده و توسط Wright و Evans در سال ۱۹۸۶ و همچنین Wright و همکاران در سال ۱۹۸۹ به عنوان یک سیستم مرکب سقف سازه‌ای ابداعی مطابق شکل ۱ معرفی گردید. هسته مرکزی این سیستم ورق فولادی تاخورد بوده و صفحه تخت در یک لایه شکل ۱ و یا دو لایه در بالا و پایین آن پیچ می‌گردد [۱، ۲]. همچنین این سیستم می‌تواند از دو لایه ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت همانند شکل ۲ تشکیل گردد

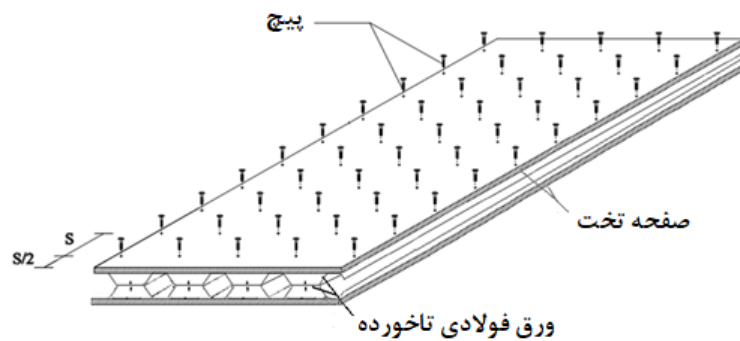
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@jsu.ac.ir

که سیستم اخیر به نام DPSSDDB معروف است [۳]. ورق‌های فولادی تاخورد مورد استفاده در سقف مورد مطالعه با نام Peva۴۵ با عرض کامل ۷۹۵ میلی‌متر و ضخامت‌های مختلفی در کارخانه تولید می‌شوند که معمولاً جهت ساختمان‌های مسکونی ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و ساختمان‌های تجاری ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرند و در صورت بروز موارد خاص از قبیل تفاوت زیاد در دهانه‌های تیرهای چشمه دال می‌توان از ضخامت‌های دیگری با توجه به طراحی‌های صورت گرفته استفاده کرد. همچنین این ورق‌ها برای هر دهانه ستون‌گذاری شده محدودیتی ندارند، لذا در این سیستم جهت اجرا در دهانه‌های مختلف، با تعبیه تیر فرعی در فواصل محاسباتی لازم مشکل خدمت‌پذیری آیین‌نامه‌ای آن رفع می‌گردد. همچنین جهت تأمین عرض مورد نیاز سقف، چند شیت Peva۴۵ را می‌توان در کنار هم قرار داد. انواع مختلف صفحه تخت عبارتند





شکل ۱. سقف PSSDB با یک لایه DB [۴]  
Fig. 1. PSSDB floor with one layer DB



شکل ۲. نمایی از سقف DPSSDDB [۳]  
Fig. 2. View of the DPSSDDB floor

TNT معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می‌شود. زمانی که ماده منفجره از نوع TNT نباشد، معادل آن را می‌توان با استفاده از ضرایب قید شده در جداول به دست آورد [۵]. از مشخصه های اساسی یک انفجار که باعث وارد شدن نیرو بر سازه می‌شود، می‌توان به اتفاقی بودن موقعیت انفجار، دینامیکی و گذرا بودن نیروها و زمان اثر کم (بین چند میلی ثانیه تا چند ثانیه) اشاره کرد. هنگامی که یک انفجار صورت می‌گیرد، انرژی به صورت ناگهانی آزاد می‌شود. اثر این آزاد شدن انرژی را می‌توان به دو بخش تشعشعات حرارتی و انتشار امواج در زمین و هوا تقسیم کرد که در این تحقیق فقط بخش دوم مورد توجه قرار می‌گیرد. امواجی از انفجار که در هوا منتشر می‌شوند، عامل اصلی تخریب سازه هستند. این امواج با سرعتی بیش از سرعت صوت حرکت کرده و به سازه برخورد می‌کنند. در اثر بازتاب این امواج بر روی سطح سازه، فشار حاصل از آنها افزایش می‌یابد. همچنین بخشی از امواج هوایی از طریق درها، پنجره و بازشوها به داخل سازه نفوذ کرده و اعضای داخلی سازه را

از: Plywood, Chipboard, Block board, Fibre board و Wood-Cement board سیستم مورد مطالعه در دهانه‌های معمول جهت استفاده تجاری جواگوست و ارائه عدد مشخص جهت دهانه بسیار دشوار است، زیرا محاسبه سختی این سیستم مرکب با روابط بسیار پیچیده ریاضی یا مطالعات آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. این روابط تابع سختی ورق فولادی و صفحه تخت و همچنین اندرکنش بین آنهاست که این خود تابع مستقیم فواصل پیچ‌هاست. مزایای استفاده از انواع سقف‌های مورد مطالعه عبارتند از: کاهش در زمان ساخت و ساز، سبکی و استفاده از مصالح کمتر جهت ساخت، نصب و راه اندازی آسان، عدم نیاز به نیروی کارگری ماهر، عدم نیاز به قالب بندی جهت اجرا، یکپارچگی بیشتر سقف، مقاومت مناسب در برابر آتش سوزی و حرارت، عایق مناسب صوتی، سازگار با محیط زیست و دوام بیشتر نسبت به سایر سقف‌ها [۴].

انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. واحد

پانل‌های تقویت شده با GFRP به طور کلی بهتر از پانل‌های بدون تقویت است. نشان داده شد که در محدوده نسبتاً نزدیک، فشار انفجار به علت مقادیر مختلف مواد انفجاری و فواصل مختلف آنها از سازه می‌تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد و در نتیجه سطوح مختلفی از آسیب تولید می‌گردد [۱۰]. در سال ۲۰۰۷، Jiang و همکاران یک روش طراحی جهت سازه‌های کامپوزیت در خصوص حفاظت از انفجار بیان کردند. نتایج تحقیق نشان دهنده رفتار شبیه‌سازی شده عددی جهت کامپوزیت (BTR (Biomimetic Tendon-Reinforced) تحت یک واقعه انفجار است. سیستم شبیه‌سازی و طراحی در برابر انفجار می‌تواند پیش بینی، طراحی و نمونه سازی سازه‌های کامپوزیت مقاوم در برابر انفجار را برای طیف وسیعی از سناریوهای آسیب در حوادث مختلف انفجار، انجام دهد [۱۱]. در سال ۲۰۰۸، Tekalur و همکاران به بررسی مقاومت در برابر انفجار مواد کامپوزیتی لایه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن لایه پلوراسیون بر روی سطح مواد کامپوزیت به طور قابل توجهی مقاومت در برابر انفجار را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مواد ساندویچی تهیه شده با لایه پلوراسیون بین دو پوسته کامپوزیت، بهترین مقاومت در برابر انفجار را نسبت به صفحات کامپوزیت تنها داشتند [۱۲]. در سال ۲۰۰۹، Wang و همکاران به بررسی مقاومت در برابر انفجار کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته درجه بندی شده مرحله‌ای پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که مقاومت در برابر انفجار پیکربندی ساخته شده از فوم‌های با چگالی کم / متوسط / بالا نسبت به مقاومت در برابر انفجار پیکربندی فوم‌های با ضخامت متوسط / کم / زیاد بهبود یافته است. انرژی‌های برآورد شده برای هر دو پیکربندی محاسبه شد و مشخص گردید که اختلاف انرژی کل بین حادثه و انرژی منعکس شده تقریباً یکسان بود [۱۳]. در سال ۲۰۱۰، Shen و همکاران آزمایشاتی روی پانل‌های ساندویچی منحنی تحت بار انفجار انجام دادند. داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند که انحنا ی اولیه پانل ساندویچی منحنی می‌تواند مود تغییر مکان / تخریب را با یک تغییر مکان زیاد خمشی تغییر دهد [۱۴]. در سال ۲۰۱۳، Jing و همکاران به بررسی پاسخ دینامیکی پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای فلزی با هسته فوم تحت بارگذاری انفجار به روش شبیه‌سازی عددی پرداختند. شبیه‌سازی عناصر با استفاده از عناصر المان محدود با نرم‌افزار LS-DYNA انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر شکل، شکست، پاسخ خیز و جذب انرژی

تحت تأثیر قرار می‌دهند. در حین این جریان، انکسار امواج نیز در گوشه‌های سازه رخ می‌دهد که می‌تواند سبب کاهش یا افزایش فشار حاصل از موج گردد. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که همه محیط قابل دسترسی سازه تحت اثر فشار موج قرار گیرد. از طرف دیگر، امواجی که با زمین برخورد می‌کنند، در مسیر حرکت خود، مولکول‌های هوا را فشرده کرده و یک فشار کلی محیطی (فشار اتفاقی) ایجاد می‌نمایند [۶]. مطالعات مختلفی بر تعیین رفتار انواع سازه‌ها تحت بار انفجار صورت پذیرفت. از آن جمله Xue و Hutchinson در سال ۲۰۰۳ یک ارزیابی اولیه روی صفحات ساندویچ در معرض بارهای انفجار انجام دادند. با استفاده از حل عددی دینامیکی اجزا محدود به تجزیه و تحلیل پاسخ صفحات پرداختند. آنها پاسخ دینامیکی یک صفحه صلب را با پاسخ دینامیکی صفحات ساندویچی با هسته خریابی تترگونال مقایسه کردند. پتانسیل مقاومت اجزا در برابر انفجار و همچنین ظرفیت جذب انرژی صفحات ساندویچی با صفحات صلب با همان جرم مقایسه شد. نتایج نشان دادند که در خصوص هردو یعنی مقاومت و ظرفیت جذب انرژی در برابر بار انفجار، سقف مورد مطالعه برجسته‌تر از سقف صلب است [۷]. در سال ۲۰۰۳، Lawver و همکاران به شبیه‌سازی پاسخ سقف دال کامپوزیتی بتن مسلح در معرض بار انفجار پرداختند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد المان محدود FLEX Weidinger Associates برای محاسبات پاسخ دینامیکی انجام شد. برای تولید فشار انفجار از مدل دینامیکی محاسباتی سیال از کد CFD استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها نشان داد که فیبر مسلح کامپوزیت تقویت شده می‌تواند خیز را کاهش دهد. نتایج نشان دادند که استفاده ترکیبی از کد FLEX با کد CFD می‌تواند پاسخ سازه را به طور مناسب پیش‌بینی کند. همچنین نتایج نشان دادند که تقویت کامپوزیت می‌تواند به عنوان طرح مقاوم سازی در برابر انفجار تلقی گردد [۸]. در سال ۲۰۰۵، Balden و Nurick یک شبیه‌سازی عددی از خرابی صفحات فولادی تحت بارگذاری انفجار انجام دادند. نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سازه‌های تحت بار انفجار استفاده شد. از کد AUTOUDYN برای معرفی پارامترهای فشار انفجار موضعی، زمان و تاریخچه طیف انفجار استفاده شده است [۹]. در سال ۲۰۰۷، رزاق پور و همکاران به بررسی پاسخ پانل‌های بتنی مسلح تقویت شده با ورق‌های GFRP در برابر انفجار پرداختند. مشخص شد که

انواع سازه‌ها تحت بار انفجار، مشخص گردید که تاکنون هیچ گونه بررسی و مطالعه‌ای در خصوص تأثیر بار انفجار بر رفتار دینامیکی سازه متشکل از هر نوع سقفی از ترکیب‌های ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت مربوط به سقف مورد مطالعه در این تحقیق صورت نپذیرفته است، لذا هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی تأثیر بار انفجار بر رفتار دینامیکی سقف مذکور می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، اثر تغییر پارامترهایی چون: ضخامت صفحه تخت و نوع آن، ضخامت ورق فولادی تاخورد، فاصله بین پیچ‌های خودکار، ابعاد (طول و عرض) سقف، شرایط مرزی و همچنین استفاده کردن از دو ورق فولادی تاخورد و دو صفحه تخت به طور همزمان و بالاخره تأثیر فاصله و مقدار مواد منفجره، بر رفتار دینامیکی غیر خطی سقف مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق بار دینامیکی انفجار بر سازه مورد مطالعه اعمال می‌گردد. در حالت کلی می‌توان گفت هنگامی که یک انفجار رخ می‌دهد، امواج ضربه‌ای آن را می‌توان مطابق شکل ۳ شبیه‌سازی نمود [۲۰].

در شکل ۳،  $t_d$ ، زمان صرف شده بعد از انفجار برای رسیدن فشار انفجار به یک نقطه با فاصله مشخص از مرکز انفجار است. همچنین،  $P_{S0}$ ، مقدار مثبت حداکثر فشار موج انفجاری نسبت به فشار محیطی ( $P_0$ )، در یک فاصله مشخص از مرکز انفجار می‌باشد. از آنجایی که یک انفجار می‌تواند توسط انواع مختلفی از مواد منفجره و در فواصل مختلفی از هدف رخ دهد، قوانین مقیاس بندی جهت شناسایی یا ارزیابی مشخصات امواج انفجار، براساس وزن خرج انفجاری و فاصله مرکز انفجار تا نقطه مورد نظر (فاصله رویارویی) بیان می‌شوند. یکی از این قوانین پرکاربرد، قانون مقیاس بندی هاپکینسون-کرنز است که معمولاً با نام مقیاس بندی ریشه سوم شناخته می‌شود و در مقیاس بندی موج انفجار بیشترین کاربرد را دارد. رابطه و پارامترهای قانون هاپکینسون-کرنز به شرح زیر می‌باشند [۲۰]:

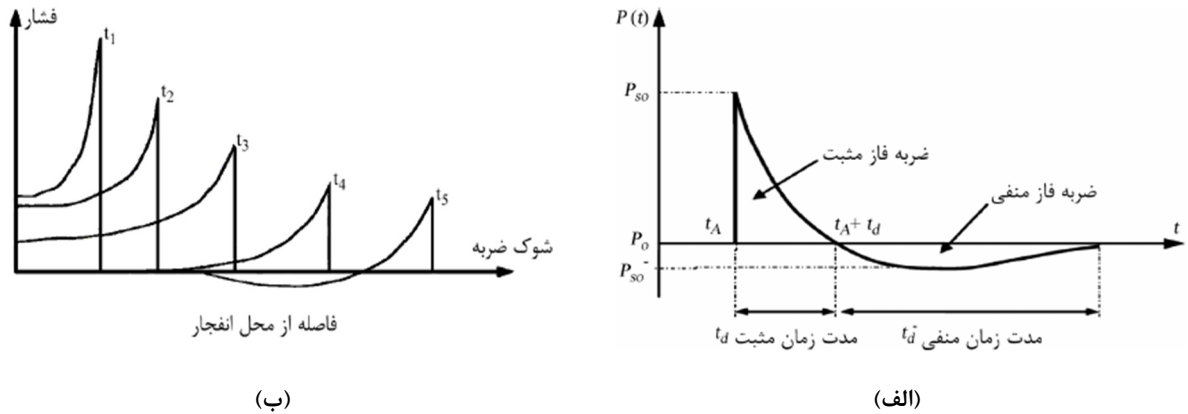
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $Z$ ، فاصله مقیاس شده برحسب  $(m/kg^{1/3})$

پوسته‌های ساندویچی به شدت به پیکربندی هندسی حساس هستند [۱۵]. در سال ۲۰۱۵، Li و همکاران یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی از دال‌های بتنی با مقاومت بالا تحت بارهای انفجار انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها اثربخشی دال‌های بتنی با عملکرد مقاومت بالا در برابر بارهای انفجاری را تأیید کرد. مدل‌های عددی در LS-DYNA برای صحت‌سنجی آنها با آزمایش‌های انفجار در دال‌های UHPC ایجاد شد [۱۶]. در سال ۲۰۱۵، Chen و همکاران به بررسی عملکرد یک صفحه کامپوزیت متشکل از دو صفحه فلزی با هسته پلی استایرن در معرض بار انفجار پرداختند. نتایج تحقیق نشان دادند که مقاومت در برابر انفجار و همچنین تغییر مکان صفحه می‌توانند به ترتیب به میزان زیادی تا ۷۵ درصد افزایش جهت مقاومت و تا ۷۸ درصد کاهش جهت تغییر مکان، با افزایش ضخامت صفحه از ۰/۴۲ میلی‌متر به ۰/۷۵ میلی‌متر و یا با افزایش مقاومت تسلیم فلز از ۳۳۰ مگاپاسکال به ۵۵۰ مگاپاسکال تغییر کنند [۱۷]. در سال ۲۰۱۸، Iannitti و همکاران به تجزیه و تحلیل دال‌های بتنی مسلح تحت بار انفجار پرداختند. نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود LS-DYNA مورد بررسی قرار گرفت. در این کار، شبیه‌سازی‌های عددی با هدف بررسی چگونگی وجود عناصر پارتیشن بر آسیب ناشی از انفجار به دال‌های مورد استفاده برای ساختمان‌های مهندسی انجام شد. دو جهت گیری متفاوت پارتیشن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای هر دو مورد، افزایش آسیب نسبت به پیکربندی بدون پارتیشن تخمین زده شد. در سقف بدون پارتیشن افزایش آسیب ناشی از انقباض موج انفجار است، در حالی که در سقف با پارتیشن به دلیل انتشار آبی موج انفجار است. نتیجه اصلی کار شناسایی مکانیزم‌هایی بود که باعث ایجاد خسارت می‌شدند [۱۸]. در سال ۲۰۱۸، Wahab و همکاران به بررسی اثر انفجار بر روی عملکرد رفتاری پانل کامپوزیت ۷ شکل پرداختند. آنها مدل عددی سه بعدی با استفاده از روش اجزا محدود غیرخطی ارائه دادند. نتایج نشان داد که رفتار سازه‌های با پانل کامپوزیت ۷ شکل عملکرد بر اساس مواد مختلف منفجره با میزان TNT مختلف تحت زوایای متفاوت شیب سازه مذکور تغییر زیادی می‌یابد [۱۹].

با بررسی‌های انجام شده بر مطالعات پیشین در خصوص کارهای تحقیقاتی و مطالعاتی صورت پذیرفته بر بار انفجار و ماهیت فیزیکی آن و همچنین نحوه تأثیر آن بر سازه‌ها و از طرفی رفتار سنجی





شکل ۳. الف. مشخصات موج انفجار-موج ضربه و ب. افت فشار نسبت به فاصله از محل انفجار [۲۰]

Fig. 3. (a) Explosion wave-Impact wave characteristics, and (b) Pressure drop relative to distance from the explosion site

است. جهت ارائه مشخصات سازه‌ای ترکیبات موجود در سقف‌های فوق اشاره می‌توان گفت که مطابق استاندارد AISC [۲۲] مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی فولاد یکسان می‌باشند. در تحقیق حاضر از دو نوع صفحه تخت استفاده می‌گردد، یکی Plywood و دیگری (Fiber Cement Board) FCB. Plywood از محصولات چوب است و Bos & Bos Casagrande [۲۳] اظهار داشتند که مدول الاستیسیته دینامیکی کلیه محصولات چوب حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از مدول الاستیسیته استاتیکی آن است. با توجه به اینکه Plywood قابل مدل‌سازی به صورت یک ورق ایزوتروپیک می‌باشد [۴] و همچنین با توجه به مدول الاستیسیته استاتیکی آن و با افزایش ۱۰ درصدی مدول مذکور، مدول الاستیسیته دینامیکی آن حاصل می‌شود (جدول ۱). از طرفی با توجه به اینکه FCB از مشتقات بتن می‌باشد، لذا بنابر توصیه AISC [۲۲] جهت محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی آن می‌بایست ۳۵ درصد به مدول الاستیسیته استاتیکی آن اضافه کرد. در این تحقیق از چهار نوع FCB استفاده شده است که مشخصات مکانیکی آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

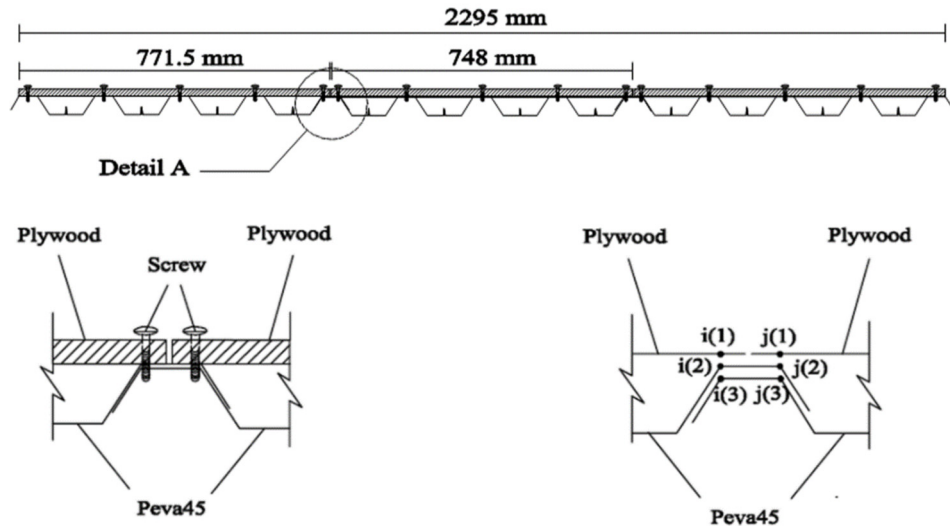
همچنین رابطه تنش و کرنش در Plywood و انواع FCBها و همچنین Peva۴۵ به قرار اشکال ذیل می‌باشند. لازم به ذکر است که مدل تنش-کرنش ورق فولادی با استفاده از یک مدل الاستیک-پلاستیک کامل با توجه به تنش جاری شدن آن ارائه گردیده است [۲۵، ۲۶].

فاصله رویارویی برحسب  $(m)$  و وزن خرج انفجار یک روی معادل TNT برحسب  $(kg)$  می‌باشد [۲۰].

جهت اعمال بار انفجار بر سیستم مورد مطالعه در این تحقیق از گزینه CONWEP استفاده شده است. همچنین جهت بررسی رفتار دینامیکی سیستم مورد مطالعه تحت بار انفجار، با توجه به طبیعت فیزیکی بار مذکور از روش آنالیز دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی استفاده گردیده است. در تحقیق حاضر بار انفجار در مقدار (وزن TNT) و فاصله مشخص نسبت به مرکز سطح سقف مورد مطالعه اعمال گردیده است. ابتدا تمامی مدل‌ها با توجه به ریز اهداف تحقیق تحلیل مودال گردیدند تا فرکانس‌های ارتعاشی آنها حاصل گردد. سپس با توجه به درصد استهلاک ۱/۱ درصد جهت سیستم [۲۱] و فرکانس مود اول و چهارم، ضرایب رایلی به عنوان استهلاک سازه در مدل‌سازی لحاظ گردیده و سپس مدل‌ها آنالیز دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی شدند.

### ۳- مدل سازه‌ای

همان‌گونه که بیان شد مدل سقف مورد مطالعه به شکل ۱ می‌باشد که اگر از دو ورق فولادی تاخورد و دو صفحه تخت استفاده گردد، مدل سازه‌ای به شکل ۲ ارائه می‌گردد. همچنین با توجه به عرض کم Peva۴۵ به عنوان ورق فولادی تاخورد، لذا جهت داشتن عرض واقعی می‌بایست چند شیت از آن در کنار هم قرار گیرند. در شکل ۴ مدل مورد مطالعه با سه شیت به عنوان نمونه ارائه شده



شکل ۴. سقف PSSDB با ۳ شیت [۲۱]  
Fig. 4. PSSDB floor with three sheets

جدول ۱. مشخصات مصالح سقف مورد مطالعه [۲۴، ۴]  
Table 1. Material properties of studied floor

اجزا سقف	$\nu$	$E_{static} (N/mm^2)$	$E_{dynamic} (N/mm^2)$	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Plywood	۰/۲	۷۱۶۴	۷۸۸۰	۶۰۰
FCB	تیپ ۱	۸۰۰۰	۱۰۸۰۰	۱۳۰۰
	تیپ ۲	۷۶۲۰	۱۰۲۸۷	۱۳۸۸
	تیپ ۳	۸۰۸۰	۱۰۹۰۸	۱۳۳۲
	تیپ ۴	۷۷۶۰	۱۰۴۷۶	۱۴۶۸
PSS	۰/۳	۲۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۷۸۵۰

مدول الاستیسیته آن مشخص می‌گردد (رابطه ۲) [۲۸].

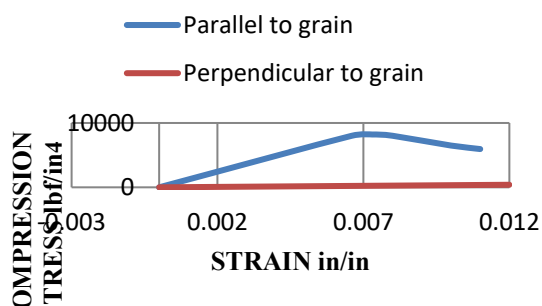
$$E = \frac{2 \times K_s \times h(1 + \nu)}{S \times t} \quad (2)$$

در این رابطه:  $E$ : مدول الاستیسیته Dummy plate بر حسب  $MPa$ ،  $K_s$ : سختی پیچ‌های خودکار،  $h$ : ارتفاع بر حسب میلی‌متر،  $S$ : فاصله بین پیچ‌ها بر حسب میلی‌متر،  $t$ : ضخامت بر حسب میلی‌متر،  $\nu$ : ضریب پواسون پیچ‌های خودکار (فولاد). ورق معادل در ایده Dummy plate به قرار شکل ۸ ارائه شده است.

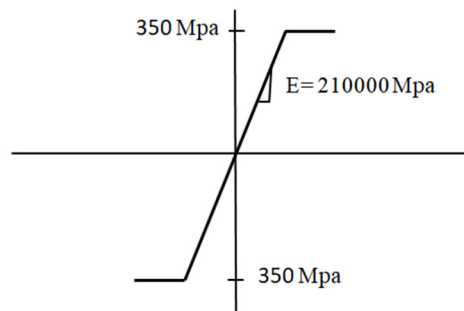
با توجه به توضیحات فوق‌الذکر و اینکه در تحقیق حاضر از ایده Dummy Plate جهت مدل‌سازی فنرهای انتقالی جایگزین پیچ‌های خودکار استفاده گردیده است، لذا جهت مدل‌سازی ورق

#### ۴- مدل‌سازی کامپیوتری

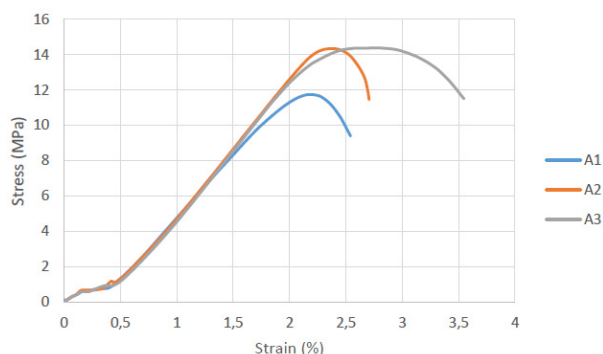
با توجه به ریزاهداف تحقیق، مدل‌سازی کامپیوتری سقف مورد مطالعه با استفاده از المان C8 جهت هر دو ورق موجود در آن انجام گردید. همچنین جهت مدل‌سازی پیچ‌های خودکار در حالت واقعی می‌بایست از فنر انتقالی در سه جهت استفاده گردد. سختی این فنرها با استفاده از آزمایش Push-out بدست می‌آیند. از طرفی جهت سهولت مدل‌سازی Ahmed و Wan Badaruzzaman در سال ۲۰۰۵ ایده Dummy Plate را ارائه کردند که در این مطالعه از آن استفاده می‌گردد. در این ایده با توجه به فاصله پیچ‌ها از هم و سختی بدست آمده برای فنر جایگزین پیچ خودکار از نتایج آزمایش Push-out بین ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت، همچنین انتخاب ارتفاع و ضخامت Dummy plate و با توجه به نسبت پواسون فولاد [۲۸].



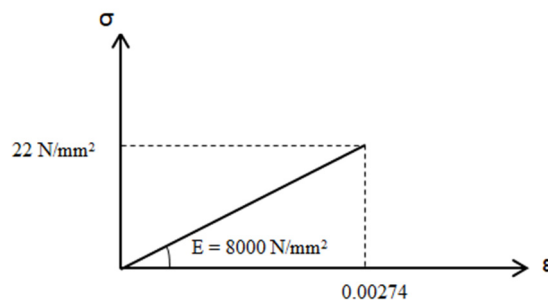
شکل ۶. نمودار تنش-کرنش Plywood [۲۷]  
Fig. 6. Stress-strain diagram of Plywood



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش Peva45 [۲۵، ۲۶]  
Fig. 5. Stress-strain diagram of Peva45

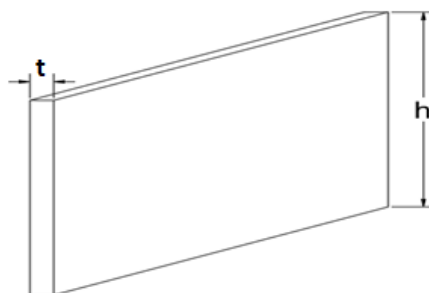


(ب)



(الف)

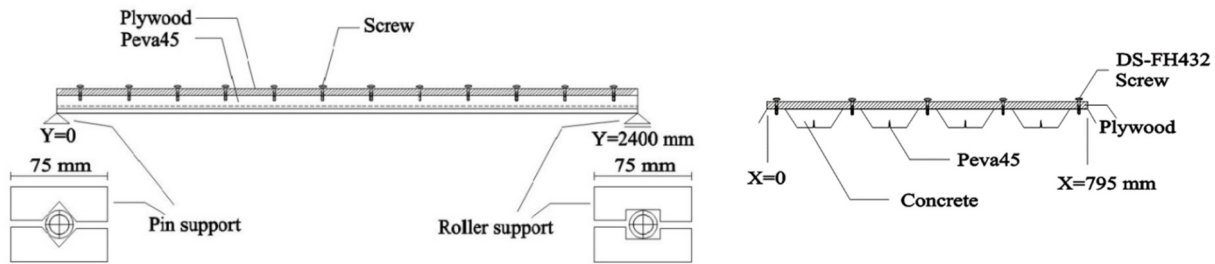
شکل ۷. دیاگرام تنش-کرنش FCB: الف. تیپ ۱ و ب. تیپ ۲، ۳، ۴ [۲۴]  
Fig. 7. Stress-strain diagram of FCB; (a) Type 1, and (b) Type 2, 3 and 4



شکل ۸. ورق جایگزین پیچ‌های خودکار (Dummy plate)  
Fig. 8. Replacing plate of self-drilling and self-tapping screws (Dummy plate)

Nordin و همکاران [۲۹]، سختی فنر در دو جهت پلان سقف ۶۱۰ نیوتن بر میلی‌متر و همچنین این سختی در جهت قائم  $10^5$  نیوتن بر میلی‌متر [۲۱] فرض می‌گردد. همچنین اتصال  $i(2)$  به  $i(3)$  و  $j(2)$  به  $j(3)$  که در واقع اتصال دو ورق فولادی تاخوردگی می‌باشد، می‌بایست مطابق مطالعه انجام شده توسط Wright & Evans [۳۰] انجام گردد. در این مطالعه آنها بیان کردند که گره‌های فوق‌الذکر با سختی

Dummy Plate نیز از المان C8 استفاده شده است. بدین ترتیب تمامی اجزای سقف مورد مطالعه با استفاده از ورق و همچنین المان C8 مدل‌سازی گردیده و سپس به یکدیگر Merge شدند. در جایی که سقف بیش از دو شیت ورق فولادی تاخوردگی دارد، اتصال صفحه تخت به ورق مذکور همانند شکل ۴ در واقع توسط اتصال  $i(1)$  به  $i(2)$  و  $j(1)$  به  $j(2)$  می‌باشد. با توجه به مطالعه



شکل ۹. مدل سازه‌ای مورد آزمایش توسط Gandomkar و همکاران [۲۱]  
 Fig. 9. Structural model tested by Gandomkar et al. [21]

فنر و همچنین مدل‌سازی آنها با ایده Dummy Plate جهت تعیین صحت نتایج عددی با ایده مذکور، مقایسه شدند. از طرفی با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از سقف با یک، سه و پنج شیت ورق فولادی تاخورد استفاده گردیده است و همچنین با توجه به اینکه اتصال دو ورق مذکور مطابق شکل ۴ با سختی انتقالی فنرهای خطی صورت می‌پذیرد [۴]، لذا نتایج مدل‌سازی با ایده Dummy Plate با نتایج مدل‌سازی توسط فنرهای خطی جهت تعیین صحت نتایج مدل‌سازی با ایده Dummy Plate مقایسه شدند. با انجام دو صحت‌سنجی فوق‌الشاره می‌توان به صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی سقف با یک یا چند شیت ورق فولادی تاخورد با استفاده از ایده Dummy Plate اطمینان کرد.

Gandomkar و همکاران [۲۱] در مطالعه خود یک سقف PSSDB با ابعاد مشخص شده در شکل ۹ را در نظر گرفتند. در این سقف ورق فولادی تاخورد Peva45 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و صفحه تخت استفاده شده Plywood با ضخامت ۱۸ میلی‌متر و پیچ‌های خودکار با فاصله ۲۰۰ میلی‌متر فرض شدند.

مشخصات مکانیکی مصالح و همچنین نوع المان استفاده شده جهت مدل‌سازی اعضای سقف در بخش‌های قبل توضیح داده شده‌اند. از طرفی با توجه به رابطه (۲)، مدول الاستیسیته Dummy Plate با فرض ۰/۵ میلی‌متر ضخامت و ارتفاع ۹ میلی‌متر (فاصله محور گذرنده از مرکز سطح صفحه تخت تا محور گذرنده از مرکز سطح ورق فولادی تاخورد) [۲۸] و همچنین سختی فنر معادل ۶۱۰ نیوتن بر میلی‌متر [۲۹]، ۱۴۲/۷۴ نیوتن بر میلی‌متر مربع بدست آمد. نسبت پواسون آن نیز ۰/۳ فرض گردید. با انجام آنالیز مودال جهت دو حالت موردنظر عددی، نتایج فرکانس‌های ۴ مود اول در جدول

فنر انتقالی در جهت طولی برابر صفر و همچنین سختی فنر دورانی برابر صفر به همدیگر متصل گردند. به عبارت دیگر در جهت مذکور هیچ اتصالی بین گره‌های مذکور نیست. همچنین آنها بیان کردند که سختی فنر انتقالی در جهت عمودی و عرضی بسیار بالا فرض شود که به بیان دیگر اتصال کامل در آن جهات برقرار شود.

## ۵- نتایج تحقیق

با توجه به هدف اصلی تحقیق حاضر که بررسی اثر انفجار بر رفتار دینامیکی سقف مرکب PSSDB می‌باشد، لذا جهت بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر رفتار دینامیکی سقف مذکور با روش عددی اجزا محدود، ابتدا می‌بایست نسبت به صحت نتایج بدست آمده از نرم‌افزار استفاده شده اطمینان حاصل نمود. جهت این امر در بخش اول، صحت‌سنجی مدل سقف مورد مطالعه در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است و سپس نتایج حاصل از آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با توجه به ریزاهداف تعریف شده در تحقیق ارائه شده‌اند.

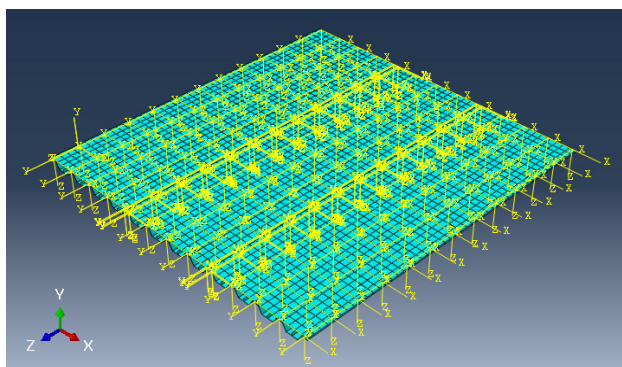
### ۵-۱- صحت سنجی نتایج

جهت تعیین صحت نتایج عددی با استفاده از روش اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس از مطالعه آزمایشگاهی Gandomkar و همکاران [۲۱] استفاده شده است. با توجه به اینکه در مدل حاضر از ایده Dummy Plate به عنوان جایگزین فنرهای خودکار استفاده گردیده است و از طرفی مدل‌سازی واقعی پیچ‌های مذکور با استفاده از فنرهای خطی می‌باشد، لذا نتایج مطالعه آزمایشگاهی مذکور با نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی پیچ‌های خودکار با ایده

جدول ۲. مقایسه نتایج عددی با دو روش مدل سازی پیچ های خودکار و مطالعه آزمایشگاهی Gandomkar و همکاران [۲۱]

Table 2. Comparing numerical results with two modeling methods of self-drilling and self-tapping screws and experimental study of Gandomkar et al. [21]

درصد اختلاف ایده Dummy plate و ایده فنر	درصد اختلاف ایده و Dummy plate نتایج آزمایشگاهی	درصد اختلاف روش آزمایشگاهی و ایده عددی فنر	FNF (HZ)		مطالعه آزمایشگاهی Gandomkar و همکاران	مود
			اجزا محدود با ایده Dummy Plate جهت پیچ خودکار	اجزا محدود با ایده فنر جهت پیچ خودکار		
۳/۴۸	۹/۱۵	۵/۴۸	۱۹/۱۰۲	۱۸/۴۵۹	۱۷/۵۰	اول
۴/۰۸	۷/۸۹	۳/۶۷	۲۲/۹۸۱	۲۲/۰۸۱	۲۱/۳۰	دوم
۲/۷۱	۰/۴۱	۳/۰۴	۴۶/۱۱۰	۴۴/۸۹۱	۴۶/۳۰	سوم
۲/۸	۷/۶۶	۴/۷۳	۵۹/۸۶۱	۵۸/۲۳۱	۵۵/۶	چهارم



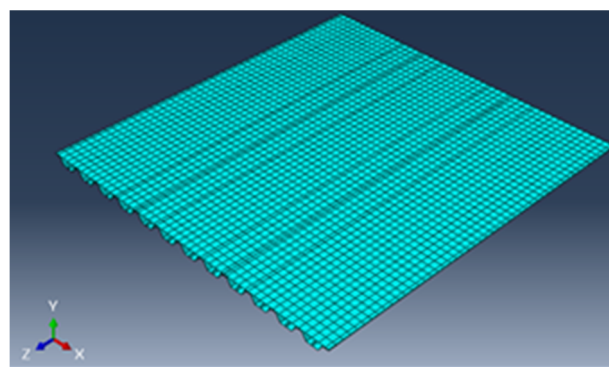
شکل ۱۱. مدل سازی PSSDB با ۳ شیت با ایده Dummy plate

Fig. 11. Modeling of PSSDB with three sheets with dummy plate idea

فنر و Dummy Plate با توجه به مشخصات مکانیکی اشاره شده قبل جهت اتصال صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی مدل سازی شد (شکل های ۱۰ و ۱۱). از طرفی در خصوص اتصال دو ورق فولادی تاخوردگی با استفاده از ورق Dummy Plate، مدول الاستیسیته ۱۹/۸۳ نیوتون بر میلی متر مربع و نسبت پواسون ۰/۳ با توجه به فرض ارتفاع ۵ میلی متر و ضخامت ۲ میلی متر استفاده گردید.

نتایج FNF جهت ۴ مود اول ارتعاشی جهت دو حالت فوق الذکر به قرار جدول ۳ می باشند.

مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می دهد که مدل سازی سقف با عرض بیش از یک شیت ۴۵ Peva با استفاده از فنر با توجه به مطالعه Wright & Evans [۳۰] در مقایسه با مدل سازی با ایده Dummy plate به نتایج نزدیک به هم منجر می گردند.



شکل ۱۰. مدل سازی PSSDB با ۳ شیت با ایده فنر

Fig. 10. Modeling of PSSDB with three sheets with spring idea

۲ ارائه شده اند.

با توجه به نتایج حاصل مشخص گردید که درصد اختلاف نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی و روش عددی با مدل سازی پیچ های خودکار توسط فنر و همچنین مدل سازی پیچ های خودکار با ایده Dummy Plate اندک می باشند. از طرفی اختلاف بین نتایج عددی روش فنر و ایده Dummy Plate نیز بسیار کم است، لذا اطمینان از نتایج مدل سازی با ایده مذکور وجود دارد.

در بخش دیگری از صحت سنجی رفتار ایده Dummy Plate جایگزین اتصال دو ورق فولادی تاخوردگی در زمانی که سقف بیش از یک شیت از ورق فولادی تاخوردگی را دارا می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت صحت سنجی در این بخش، سقف PSSDB با ۳ شیت ورق فولادی تاخوردگی به قرار شکل ۴ با استفاده از ایده

جدول ۳. مقایسه نتایج عددی فرکانس‌ها با ۳ شیت با ایده فنر و Dummy plate  
Table 3. Comparing numerical results of frequencies with three sheets with spring and dummy plate idea

درصد اختلاف ایده Dummy plate و ایده فنر	FNF (HZ)		مود
	ایده Dummy Plate در مدل‌سازی عددی	ایده فنر در مدل‌سازی عددی	
۶/۷۴	۲۰/۰۱۸	۱۸/۷۵۳	اول
۷/۲۹	۲۱/۸۰۳	۲۰/۳۲۵	دوم
۲/۵۸	۲۸/۶۵۷	۲۷/۹۳۵	سوم
۳/۹۵	۴۳/۱۰۱	۴۱/۴۶۳	چهارم

تحقیق، نتایج مطالعه به قرار ذیل می‌باشند:

صحت‌سنجی‌های ارائه شده در خصوص مدل‌سازی سقف مورد مطالعه با ایده Dummy plate به عنوان جایگزین پیچ‌های خودکار چه جهت عرض یک شیت Peva۴۵ و چه جهت عرض‌های بیش از یک شیت نشان دادند که نتایج تحقیق با مدل‌سازی توسط روش فوق‌الذکر جهت پیچ‌های خودکار منجر به ارائه نتایج صحیح می‌گردند و لذا در مجموع نوع المان استفاده شده، اندازه المان و نحوه اتصال صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی مورد تأیید قرار می‌گیرند.

۵-۲-۱- اثر ضخامت و نوع صفحه تخت و ضخامت ورق فولادی تاخوردگی بر رفتار دینامیکی سیستم سقف مورد مطالعه

جهت تعیین اثرات مربوط به تغییر ضخامت ورق فولادی تاخوردگی و صفحه تخت و همچنین تغییر نوع صفحه تخت بر رفتار دینامیکی سیستم مورد مطالعه، مدل M۹ با مدل مبنا یعنی مدل M۶ در خصوص تغییر ضخامت صفحه تخت از ۱۸ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر و مدل M۸ با مدل M۶ در جهت تغییر ضخامت ورق فولادی تاخوردگی از ۰/۸ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر و در نهایت مدل‌های M۱۲، M۱۳، M۱۴ و M۱۵ با مدل M۶ در خصوص تغییر نوع صفحه تخت از Plywood به انواع مختلف Cemboard مقایسه شدند. نتایج مربوط به تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز سقف، تاریخچه زمانی انرژی کرنشی و همچنین کانتور تنش فون مایسز مربوط به مدل M۶ به عنوان مدل مبنا به قرار اشکال ۱۲ تا ۱۴ می‌باشند.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص گردیده است در زمان اعمال بار انفجار در زمان ۰/۱ ثانیه به صورت CONWEP بر صفحه تخت، سقف به طور ناگهانی تغییر مکان می‌دهد و پس از آن با توجه به زمان کوتاه اعمال بار انفجار بر سازه، تاریخچه زمانی تغییر مکان در ادامه به صورت ارتعاش آزاد می‌باشد. با توجه به استهلاک کم سیستم (۱/۱ درصد) در نمودار به وضوح کاهش تغییر مکان پس از طی زمان محسوس دیده نمی‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۳ مشخص

۵-۲-۲- مدل‌های مطالعه شده و نتایج آنها

با توجه به هدف اصلی و ریز اهداف تحقیق جهت بررسی تمام پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار مودال و دینامیکی غیر خطی سقف مورد مطالعه، تعداد ۲۸ مدل در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی گردید که این مدل‌ها در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. این مدل‌ها به گونه‌ای تعیین شدند که تأثیر تمامی پارامترهای مرتبط با ابعاد و شرایط مرزی سازه و همچنین بار اعمالی، بر رفتار سقف مورد مطالعه مشخص گردند. با توجه به عرض یک شیت Peva۴۵ (۷۹۵ میلی‌متر)، تأثیر افزایش عرض و همچنین افزایش طول اجزائی آن در مدل‌ها مدنظر قرار گرفتند. همچنین جهت بیان اثر تغییر وزن و فاصله مواد منفجره بر نتایج تحقیق، پس از تعیین رفتار سقف مورد مطالعه با تغییر زیاد وزن‌ها و فواصل مواد منفجره، سه وزن مختلف و سه فاصله متفاوت (جهت بیان فواصل نزدیک، میانی و دور) انتخاب شدند. با توجه به مدل‌های ارائه شده در جدول فوق و ریزاهداف موردنظر

جدول ۴. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه  
Table 4. Characteristics of studied models

نام مدل	عرض (mm)	طول (mm)	ضخامت PSS (mm)	ضخامت DB (mm)	فاصله پیچ‌های خودکار (mm)	جنس DB	حالت شرایط مرزی*			مقدار TNT (kg)	فاصله TNT از مرکز سقف (m)
							I	II	III		
M1	۷۹۵	۲۴۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood	*			۱۰	۲
M2	۷۹۵	۲۴۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M3	۳*۷۹۵	۲۴۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M4	۵*۷۹۵	۲۴۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M5	۳*۷۹۵	۲۰۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M6	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M7	۳*۷۹۵	۳۲۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M8	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۱	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M9	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۲	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M10	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۱۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M11	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۳۰۰	Plywood		*		۱۰	۲
M12	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Cemboard Type 1		*		۱۰	۲
M13	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Cemboard Type 2		*		۱۰	۲
M14	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Cemboard Type 3		*		۱۰	۲
M15	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Cemboard Type 4		*		۱۰	۲
M16	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood	*			۱۰	۲
M17	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood			*	۱۰	۲
M18	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۱</sup>		۱۰	۲
M19	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۲</sup>		۱۰	۲
M20	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۳</sup>		۱۰	۲
M21	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۴</sup>		۱۰	۲
M22	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۵</sup>		۱۰	۲
M23	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		* <sup>۶</sup>		۱۰	۲

ادامه جدول ۴. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه  
Continued Table 4. Characteristics of studied models

نام مدل	عرض (mm)	طول (mm)	ضخامت PSS (mm)	ضخامت DB (mm)	فاصله پیچ‌های خودکار (mm)	جنس DB	حالت شرایط مرزی*			مقدار TNT (kg)	فاصله TNT از مرکز سقف (m)
							I	II	III		
M24	۳*۷۹۵ دوبل	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*	۷	۱۰	۲
M25	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۸
M26	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۱۰	۱۴
M27	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۲۰	۲
M28	۳*۷۹۵	۲۸۰۰	۰/۸	۱۸	۲۰۰	Plywood		*		۳۰	۲

\*شرایط مرزی: I نشان‌دهنده تکیه‌گاه یک طرف مفصل و یک طرف غلطک، II نشان‌دهنده تکیه‌گاه دو طرف مفصل، III نشان‌دهنده تکیه‌گاه چهارطرف مفصل می‌باشد.

<sup>۱</sup> تمام قسمت‌های PSS به صورت مفصلی است.

<sup>۲</sup> DB پایین فقط مفصلی است.

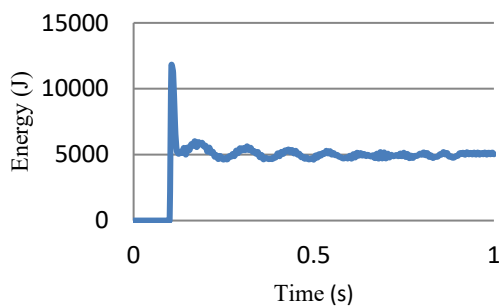
<sup>۳</sup> DB پایین و تراز پایین PSS پایین فقط مفصلی است.

<sup>۴</sup> DB پایین و تراز پایین PSS پایین و تراز بالای PSS بالا فقط مفصلی است.

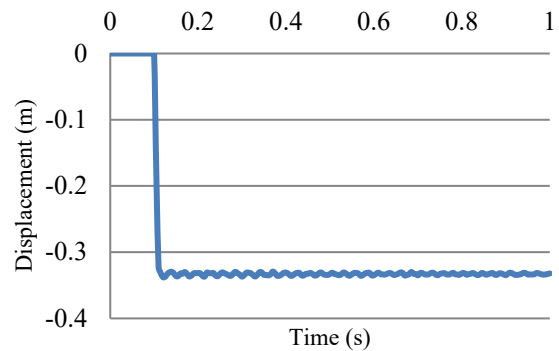
<sup>۵</sup> DB بالا و پایین و تراز بالا و پایین PSS بالا و پایین مفصلی است.

<sup>۶</sup> تمام قسمت‌های PSS پایین مفصلی است.

<sup>۷</sup> تمام قسمت‌های PSS پایین و بالا مفصلی است.



شکل ۱۳. تاریخچه زمانی انرژی کرنشی مدل شماره ۶  
Fig. 13. Strain energy time history of model number 6

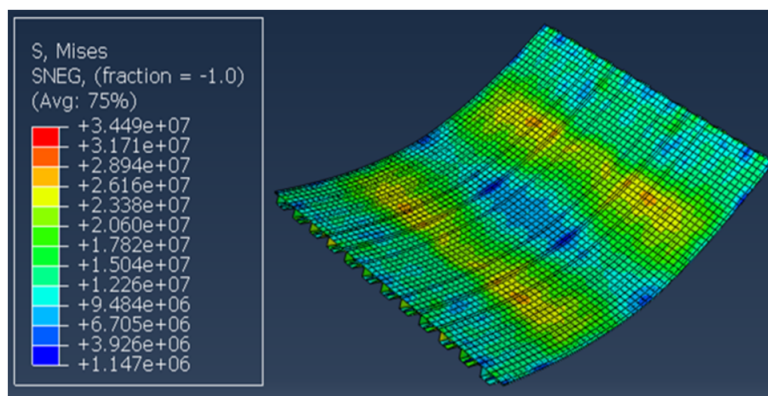


شکل ۱۴. تاریخچه زمانی تغییرمکان مدل شماره ۶  
Fig. 12. Displacement time history of model number 6

تنش فون مایسز در کل سیستم چقدر می‌باشد. جهت تمام اجزاء اصلی سقف یعنی صفحه تخت و ورق فولادی تاخورد، به تفکیک کانتور تنش فون مایسز ترسیم گردید و حداکثر تنش در اجزاء مذکور بدست آمد.

می‌گردد که همانند تغییرمکان در زمان اعمال انفجار، انرژی کرنشی به یکباره افزایش پیدا می‌کند و پس از آن کاهش معنی‌داری در آن ایجاد می‌گردد و سپس به صورت سینوسی تا رسیدن به ثبات ادامه می‌یابد. علاوه بر این در شکل ۱۴ مشخص گردیده است که حداکثر





شکل ۱۴. کانتور تنش فون مایسز مدل شماره ۶  
**Fig. 14. Von Mises stress contour of model number 6**

جدول ۵. بیشینه تغییرمکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف اول  
**Table 5. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of first sub objective**

مدل شماره		۶	۸	۹	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
بیشینه تغییرمکان (m)	مقدار	۰/۳۴۴۲	۰/۳۲۴۸	۰/۶۰۷۰	۰/۲۷۴۸	۰/۴۱۴۰	۰/۴۱۶۵	۰/۴۱۸۸
	تغییر نسبت به مبنا (%)	۰	-۵/۶۳	۷۶/۳۵	-۲۰/۱۶	۲۰/۲۸	۲۱/۰۰	۲۰/۵۱
بیشینه انرژی کرنشی (J)	مقدار	۱۱۷۶۴	۱۱۸۳۸	۸۳۱۸/۵	۵۱۶۵/۱۴	۱۶۰۷/۶۳	۱۵۹۲/۴۷	۱۶۱۸/۴۹
	تغییر نسبت به مبنا (%)	۰	۰/۶	-۲۹/۲۹	-۵۶/۱۷	-۸۶/۳۳	-۸۶/۴۶	-۸۶/۲۴
بیشینه تنش فون مایسز (N/m <sup>2</sup> )	PSS	۳/۴۴۹e۷	۳/۷۱۱e۷	۳/۴۴۶e۷	۲/۱۹۹e۷	۸/۸۱e۶	۸/۷۹۷e۶	۸/۸e۶
	DB	۲/۵۲e۷	۲/۵۲e۷	۱/۸۷۷e۷	۱/۱۶۶e۷	۷/۵۶e۶	۷/۴۹e۶	۷/۵۴e۶

جای Plywood استفاده شده است. تعداد چهار نوع FCB در این خصوص معرفی گردید که همان‌گونه که بیان شده است در نوع مواد تشکیل‌دهنده و الیاف متفاوت می‌باشند و بالطبع نمودار تنش-کرنش آنها نیز متفاوت و در نتیجه پاسخ دینامیکی غیرخطی آنها نیز تحت اثر یک بار ثابت نیز متفاوت خواهد بود. نتایج ارائه شده در جدول فوق نشان می‌دهند که با تغییر صفحه تخت از Plywood به هر نوعی از FCB به جز نوع اول، تغییرمکان سقف افزایش می‌یابد. نوع اول FCB باعث کاهش تغییرمکان نسبت به Plywood می‌شود؛ لذا گزینه ارجحی جهت استفاده می‌باشد. علت اصلی آن افزایش مدول الاستیسیته آن در مواجهه با بار دینامیکی است. از طرفی در FCB نوع ۲، ۳ و ۴ تغییر در میزان تغییرمکان بسیار کمتر است. نتایج فوق بهترین صفحه تخت را به ترتیب Primaflex و Plywood معرفی می‌کنند. این در حالی است که FCBهای تیپ ۲، ۳ و ۴

نتایج نشان می‌دهند که با کاهش ضخامت صفحه تخت Plywood در مدل مبنا از ۱۸ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، تغییرمکان به میزان ۷۶/۳۵ درصد افزایش می‌یابد. لذا در جهت کاهش تغییرمکان سقف مورد مطالعه تحت بار انفجار می‌توان از Plywoodهای با ضخامت بیشتر استفاده کرد، زیرا تأثیر آن در کاهش تغییرمکان بسیار زیاد است. از طرفی افزایش ضخامت ورق فولاد تاخوردۀ از ۰/۸ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر، میزان تغییرمکان را ۵/۶۳ درصد کاهش می‌دهد. این کاهش خیلی قابل توجه نیست. از طرفی ساخت Peva۴۵ در کارخانه فقط با دو ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر انجام می‌گردد و لذا ضخامت دیگری جهت کنترل این آیتم وجود ندارد و در مجموع می‌توان گفت که آیتم تغییر ضخامت ورق فولادی تاخوردۀ تأثیر زیادی بر تغییر دادن سختی و در نتیجه تغییرمکان سقف ندارد. در بخش بعدی یعنی کنترل تأثیر تغییر جنس صفحه تخت بر نتایج تحقیق، از FCB به

جدول ۶. بیشینه تغییرمکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف دوم  
Table 6. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of second sub objective

مدل شماره	۶	۱۰	۱۱	
بیشینه تغییرمکان (m)	۰/۳۴۴۲	۰/۳۳۵۱	۰/۳۵۲۱	
بیشینه انرژی کرنشی (J)	۱۱۷۶۴	۱۱۹۲۱	۱۱۵۵۴	
بیشینه تنش فون مایسز	PSS	۳/۴۱۷e۷	۳/۴۵۸e۷	۳/۴۱۷e۷
(N/m <sup>2</sup> )	DB	۲/۴۹e۷	۲/۵۳e۷	۲/۴۹e۷

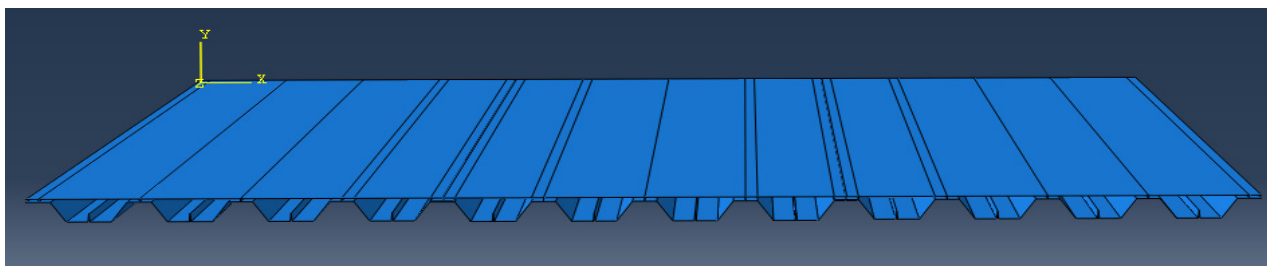
#### ۵-۲-۲- بررسی اثر فاصله بین پیچ‌های خودکار بر رفتار دینامیکی

##### سیستم سقف مورد مطالعه

استفاده از تعداد بهینه پیچ‌های خودکار تأثیر مستقیم بر زمان ساخت و در نتیجه اقتصاد سقف مورد مطالعه دارد. از بعد زمانی و اقتصادی که بگذریم، فاصله بین پیچ‌ها تأثیر مستقیم بر سختی سقف مورد مطالعه دارند به گونه‌ای که هرچه فاصله پیچ‌ها کمتر شود، سختی سقف به علت اتصال بیشتر صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی نیز افزایش می‌یابد، ولی این فاصله تا حدی قابل کاهش است، به گونه‌ای که کمتر از آن تأثیر معنی‌داری در سختی سقف دیده نمی‌شود. عموماً فاصله بین پیچ‌های خودکار طبق تحقیقات گذشته [۴] بین ۱۰۰ میلی‌متر تا ۳۰۰ میلی‌متر فرض می‌گردد، لذا در این بخش فاصله بین پیچ‌های خودکار از ۲۰۰ میلی‌متر به ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر تغییر داده می‌شود و بر اساس آن آنالیز مودال و دینامیکی غیرخطی انجام می‌گردد. نتایج جدول ذیل نشان می‌دهند که با کاهش فاصله پیچ‌های خودکار از ۲۰۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر و افزایش فاصله پیچ‌های خودکار از ۲۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر، به ترتیب تغییرمکان حداکثر سقف ۲/۶۹ درصد کاهش و ۲/۲۹ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج حاکی از آن است که تغییر در فاصله پیچ‌های خودکار تغییر معنی‌داری در تغییر دادن تغییرمکان ندارد. این بدان معنی است که میزان اتصال کافی در مسأله اندرکنش صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی توسط حداکثر فاصله پیچ‌های خودکار نیز برقرار می‌گردد و لذا از نظر زمانی و مالی در خصوص ساخت سقف مذکور لزومی به طراحی فاصله کم پیچ‌های خودکار وجود ندارد.

با کاهش فاصله پیچ‌های خودکار از ۲۰۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر، انرژی کرنشی فقط ۱/۳۳ درصد افزایش و با افزایش فاصله آنها از ۲۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر، انرژی کرنشی فقط ۱/۷۸

نتایج ضعیفی را جهت رفتار در برابر بار انفجار از خود نشان دادند. همچنین، نتایج حاصل در خصوص انرژی کرنشی سازه بیان‌کننده این واقعیت است که با کاهش ضخامت صفحه تخت از ۱۸ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر، انرژی کرنشی به میزان ۲۹/۲۹ درصد کاهش می‌یابد که نشان از تغییر زیادی در انرژی کرنشی سیستم دارد. همچنین با افزایش ضخامت ورق فولادی تاخوردگی از ۰/۸ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر، انرژی کرنشی سیستم به میزان ۰/۶ درصد افزایش می‌یابد که نشان از تغییر ناچیزی در آن است. از طرفی تغییر صفحه تخت از Plywood به انواع FCBها باعث شده است که انرژی کرنشی جهت Primaflex به میزان ۵۶/۱۷ درصد کاهش و جهت سایر FCBها به میزان متوسط ۸۶/۳۳ درصد کاهش نشان دهد. این موضوع همانند تغییرمکان، نشان از تأثیر زیاد نوع صفحه تخت بر نتایج تحقیق دارد. لذا بر خلاف تصور اولیه مبنی بر تأثیر کم آن بر نتایج تحقیق، موضوع حاکی از تأثیر زیاد آن بر نتایج است، هر چند در این بین تفاوت عمده‌ای بین انواع FCBها نیز وجود دارد و FCB نوع اول رفتار بهتری نسبت به بقیه آنها از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، تنش تسلیم در Peva۴۵ معادل ۷e۳۵ نیوتن بر مترمربع و در Plywood معادل ۳/۷e۴۵ نیوتن بر مترمربع و جهت FCB تیپ یک، دو، سه و چهار به ترتیب ۲/۷e۲، ۰/۷e۹۸، ۱/۷e۲۷ و ۱ نیوتن بر مترمربع می‌باشند. با توجه به اینکه در مدل‌های M۶، M۸ و M۹ از Plywood استفاده شده است و مدل‌های M۱۲، M۱۳، M۱۴ و M۱۵ به ترتیب FCB تیپ یک، دو، سه و چهار دارا هستند و با توجه به تنش تسلیم بیان شده، لذا هیچ کدام از صفحات تخت به تنش تسلیم خود نمی‌رسند. این در حالی است که بعضی از آنها به تنش تسلیم نزدیک هستند. همچنین در تمام مدل‌ها فولاد فاصله زیادی تا تسلیم دارد.



شکل ۱۵. سقف PSSDB با ۳ شیت Peva۴۵  
Fig. 15. PSSDB floor with three sheets Peva45

جدول ۷. بیشینه تغییرمکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف سوم  
Table 7. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of third sub objective

مدل شماره	۲	۳	۴	۵	۶	۷
بیشینه تغییرمکان (m)	۰/۳۴۲۴	۰/۲۹۱۳	۰/۲۶۶۶	۰/۲۳۹۲	۰/۳۴۴۲	۰/۳۸۸۴
بیشینه انرژی کرنشی (J)	۳۷۹۷/۰۵	۱۱۲۵۹/۶	۱۷۶۲۳/۴	۹۰۵۹/۱۱	۱۱۷۶۴	۱۲۷۹۸/۳
بیشینه تنش فون مایسز (N/m <sup>2</sup> )	PSS	۲/۸۶۳e۷	۳/۴۴۸e۷	۳/۱۴۶e۷	۳/۴۲۸e۷	۳/۴۴۹e۷
	DB	۱/۸۷۷e۷	۱/۹۲۱e۷	۱/۹۰۷e۷	۲/۷۹۳e۷	۲/۵۲e۷

که تکیه‌گاه‌ها بر آن عمود است و بعد عرضی آن در راستای تکیه‌گاه می‌باشند. تغییر در هر دو عامل با تغییر در مشخصات دینامیکی سقف (مودال) و رفتار دینامیکی آن تحت بار انفجار ارتباط دارد، ولی مسلماً تأثیر هر دو عامل نمی‌تواند به یک اندازه بروز کند. در این بخش با افزایش و کاهش طول و همچنین تغییر عرض نسبت به بررسی تأثیر آنها بر رفتارهای فوق‌الذکر عمل شده است.

در اجرا، اتصال دو Peva۴۵ توسط همان پیچ‌های خودکار انجام می‌گردد. با در نظر گرفتن ۳ شیت و ۵ شیت Peva۴۵ کنار همدیگر، سه عرض مختلف به میزان ۷۹۵ میلی‌متر، ۳\*۷۹۵ میلی‌متر و ۵\*۷۹۵ میلی‌متر ایجاد خواهد گردید. همچنین طول ۲۴۰۰ میلی‌متر به عنوان مبنا جهت مقایسه نتایج فرض گردید. سقف در جهت عرضی بر تیرهای عرضی و در جهت طولی خود بر تیرهای طولی یا باربر تکیه می‌کند. نحوه افزایش عرض با ۳ شیت Peva۴۵ به عنوان نمونه در شکل ۱۵ ارائه شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۷ ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عرض سقف با طول ثابت، میزان تغییرمکان کاهش می‌یابد. این کاهش با تبدیل یک شیت عرض از سقف به سه و پنج شیت، به ترتیب به میزان ۱۴/۹۲ درصد و ۲۲/۱۴ درصد می‌باشند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که به

درصد کاهش می‌یابد. این تغییر همانند تغییر در تغییرمکان بسیار ناچیز است؛ ولی نکته‌ای که در اعداد فوق نهفته است این است که با افزایش فاصله پیچ‌های خودکار کاهش انرژی کرنشی بیشتری نسبت به افزایش آن ناشی از کاهش فاصله پیچ‌های خودکار ایجاد می‌شود. این عامل می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که فاصله پیچ‌های خودکار از حدی نباید بیشتر باشد. همچنین، مقایسه تنش‌های مذکور در جدول فوق با تنش تسلیم فولاد (۳۵e۷ N/m<sup>2</sup>) و Plywood (۳/۵۵e۷ m<sup>2</sup>) نشان از عدم ورود عناصر مذکور به تسلیم می‌باشد. این مقادیر تابع مستقیم شرایط مرزی، ضخامت‌های ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت، فاصله پیچ‌های خودکار و همچنین وزن و فاصله TNT دارد که به نظر می‌رسد عامل اخیر و همچنین شرایط مرزی تأثیر بیشتری بر تنش‌های مذکور دارد و فاصله پیچ‌ها تأثیر چشمگیری ندارد.

#### ۵-۲-۳- واری اثر ابعاد (طول و عرض) سقف بر رفتار دینامیکی

##### سیستم سقف مورد مطالعه

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار استاتیکی، دینامیکی و مودال سقف، ابعاد آن می‌باشد. بعد طولی آن در جهتی فرض می‌گردد

جدول ۸. بیشینه تغییرمکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف چهارم

Table 8. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of fourth sub objective

مدل شماره	۶	۱۷	۱۸	۱۹
بیشینه تغییرمکان (m)	۰/۳۴۴۲	۰/۹۱۳۸	۰/۲۳۹۰	۰/۲۱۶۵
بیشینه انرژی کرنشی (J)	۱۱۷۶۴	۱۳۳۱۸	۱۸۹۹۱/۷	۱۵۸۳۷/۳
بیشینه تنش فون مایسز (N/m <sup>2</sup> )	PSS	۳/۴۴۹e۷	۲/۸۳۳e۷	۳/۴۳۰e۷
	DB	۲/۵۲e۷	۳/۴۵e۷	۱/۴۶۲e۷

یکی از تکیه‌گاه‌های سقف مورد مطالعه، تغییرمکان حداکثر به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد. درصد این افزایش ۱۶۵/۴۸ می‌باشد که نشان از مؤثرترین پارامتر بر تغییرمکان سقف است. با فرض تکیه‌گاه چهار طرف مفصل به جای دو طرف مفصل، تغییرمکان ۳۰/۵۶ درصد کاهش می‌یابد که باز هم تأثیر زیاد بر تغییرمکان را نشان می‌دهد. اگر با تکیه‌گاه دو طرف مفصل به دو حالت Peva۴۵ را به تیر اصلی متصل کنیم، دو پاسخ متفاوت بدست می‌آید. در حالت اول Peva۴۵ بر روی تیر اصلی بنشینند و در حالت دوم Peva۴۵ در دل تیر اصلی و به جان آن جوش گردد. با توجه به اینکه در حالت اول تمام مقطع شامل تکیه‌گاه نمی‌باشد. لذا با تبدیل حالت اول به دوم تغییرمکان ۳۷/۱ درصد کاهش می‌یابد که باز هم تأثیر زیاد تبدیل تکیه‌گاه را بر نتایج نشان می‌دهد. تمام نتایج ذکر شده در جدول ذیل تأثیر بسیار زیاد تکیه‌گاه را بر سختی و بالطبع آن تغییرمکان را نشان می‌دهند. نتایج تغییرات حداکثر انرژی کرنشی در اثر تغییر در تکیه‌گاه‌ها حاکی از افزایش آن در صورت تبدیل تکیه‌گاه دو سر مفصل به تکیه‌گاه مفصلی-غلطکی می‌باشد که این افزایش ۱۳/۲۱ درصد محاسبه گردید. از طرفی با تبدیل تکیه‌گاه دو طرف مفصل به چهارطرف مفصل انرژی کرنشی به میزان ۶۱/۴۴ درصد افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن تکیه‌گاه در تمام خطوط Peva۴۵ به صورت جوش در جان تیر اصلی (همان‌گونه که قبلاً بیان شد)، نسبت به حالتی که Peva۴۵ روی تیر اصلی قرار گیرد، انرژی کرنشی به میزان ۳۴/۶۲ درصد افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل نشان می‌دهد که نوع تکیه‌گاه اثرات مختلفی بر انرژی کرنشی دارد و کاهش یا افزایش میزان گیرداری تکیه‌گاه اثری بر رفتار مشخص افزایشی یا کاهش انرژی کرنشی ندارد. همچنین، نتایج نشان دادند که از بین تمام مدل‌های جدول فوق، صفحه تخت در مدل M۱۶ به حالت تسلیم رسیده است، این در حالی است که

علت وجود همپوشانی دو شیت Peva۴۵ سختی در آن محل‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش به سختی کل سقف منجر می‌شود و لذا تغییرمکان حداکثر به میزان معنی‌داری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تغییر در تغییرمکان سقف با تغییر در طول سقف با مدل‌های M۶، M۵ و M۷ سنجیده شده است. با افزایش طول از ۲۰۰۰ میلی‌متر به ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۲۰۰ میلی‌متر، میزان افزایش تغییرمکان به ترتیب ۲۱/۷۸ درصد، ۴۳/۹۰ درصد و ۶۲/۳۷ درصد می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عرض، انرژی کرنشی سقف به میزان زیادی افزایش می‌یابد. با تبدیل سقف با یک شیت Peva۴۵ به سقف با ۳ و ۵ شیت به ترتیب انرژی کرنشی به میزان ۱۹۶/۵۳ درصد و ۳۶۴/۱۳ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش طول سقف با عرض ثابت و تغییر طول از ۲۰۰۰ میلی‌متر به ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب انرژی کرنشی به میزان ۲۴/۲۹ درصد، ۲۹/۸۶ درصد و ۴۱/۲۷ درصد افزایش می‌یابد. پس افزایش عرض نسبت به طول تأثیر فوق‌العاده بیشتری در افزایش انرژی کرنشی سیستم دارد. از طرفی، با مقایسه تنش‌های جدول فوق با تنش‌های تسلیم ورق فولادی تاخورد و صفحه تخت مشخص می‌گردد که کماکان تنش‌های مذکور به تنش تسلیم نرسیده‌اند.

۵-۲-۴- بررسی تأثیر شرایط مرزی بر رفتار دینامیکی سیستم سقف مورد مطالعه

جهت بررسی تأثیر تکیه‌گاه‌های اطراف سقف مورد مطالعه، ابتدا سقف به صورت یک طرف مفصل و یک طرف غلطک فرض گردید و پس از آن با حذف لغزش در تکیه‌گاه غلطکی به صورت دو سر مفصل فرض گردید. سپس سقف با چهارطرف تکیه‌گاه مفصلی فرض شد. نتایج آنالیز انجام شده بر مدل‌های مرتبط به قرار جدول ۸ می‌باشند. نتایج جدول ذیل نشان می‌دهند که در صورت وجود لغزش در

جدول ۹. بیشینه تغییرمکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف پنجم

Table 9. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of fifth sub objective

مدل شماره	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	
بیشینه تغییرمکان (m)	۰/۵۶۰۴	۰/۴۴۳۲	۰/۳۷۴۹	۰/۳۵۷۱	۰/۴۵۹۲	۰/۳۷۹۱	
بیشینه انرژی کرنشی (J)	۵۳۷۲/۰۱	۶۳۹۶/۳۵	۶۵۸۴/۳۳	۶۶۰۸/۴۹	۶۲۳۲/۳۱	۶۵۴۶/۲۸	
بیشینه تنش فون مایسز (N/m <sup>2</sup> )	PSS	۳/۳۶۸e۸	۴e۸	۳/۳۹۴e۸	۱/۰۶۲e۸	۴e۸	۳/۹۹۷e۸
	DB	۲/۵۰۷e۸	۲/۵۱۵e۸	۲/۳۱۵e۸	۲/۴۶۵e۸	۳/۱۹۲e۸	۱/۵۹۷e۸

۵-۲-۶- تأثیر فاصله و مقدار مواد منفجره بر رفتار دینامیکی سقف مورد مطالعه

با تغییر فاصله TNT از مرکز سقف و همچنین وزن آن، نتایج حاصل از آنالیز مدل مینا به قرار جدول ۱۰ حاصل گردیدند. نتایج نشان می‌دهند جهت وزن ثابت TNT به میزان ۱۰ کیلوگرم و با تغییر فاصله آن از مرکز سقف از ۲ متر به ۸ متر و ۱۴ متر به ترتیب تغییرمکان به میزان ۶۸/۷۹ درصد و ۷۷/۰۸ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی با فرض ثابت بودن فاصله TNT از مرکز سقف به میزان ۲ متر و تغییر وزن TNT از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم، تغییرمکان به ترتیب به میزان ۹۵/۰۶ درصد و ۲۵۳/۸۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. نتایج تحقیق در این بخش ثابت می‌کند که وزن TNT و فاصله آن از مرکز سقف به عنوان دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در کنار تکیه‌گاه‌ها در تغییر رفتار دینامیکی سقف مورد مطالعه می‌باشند. هرچند در مقایسه‌ی دو پارامتر بررسی شده در این بخش، وزن TNT اثر بسیار بیشتری بر تغییر رفتار سقف مورد مطالعه نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند جهت وزن ثابت TNT به میزان ۱۰ کیلوگرم و با تغییر فاصله آن از مرکز سقف از ۲ متر به ۸ متر و ۱۴ متر، انرژی کرنشی چند برابر کاهش می‌یابد. از طرفی با فرض ثابت بودن فاصله TNT از مرکز سقف به میزان ۲ متر و تغییر وزن TNT از ۱۰ به ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم، انرژی کرنشی به ترتیب ۲۶/۶۰ درصد و ۳۳/۳۴ درصد افزایش نشان می‌دهد. نتایج تحقیق در این بخش ثابت می‌کنند که وزن TNT و فاصله آن از مرکز سقف به عنوان دو پارامتر تأثیرگذار بر انرژی کرنشی سقف مورد مطالعه می‌باشند هرچند در مقایسه‌ی دو پارامتر بررسی شده،

صفحه تخت در بقیه مدل‌ها و همچنین ورق فولادی تاخورد در تمام مدل‌ها به تسلیم نمی‌رسند.

۵-۲-۵- تأثیر تقویت سقف مورد مطالعه با دو ورق فولادی تاخورده و دو صفحه تخت بر رفتار دینامیکی آن در این حالت فرض گردید که دو ورق فولادی تاخورده و دو صفحه تخت در سقف مورد مطالعه استفاده گردیده است (شکل ۲). این سقف با دو تکیه‌گاه مفصلی در جهت طولی و با حالت‌های مختلف جهت آن تکیه‌گاه در نظر گرفته شد. شرح تکیه‌گاه‌های مذکور در پی‌نویس جدول ۴ موجود است. نتایج آنالیز مدل‌های مرتبط به قرار جدول ۹ می‌باشند.

جدول فوق تأثیر نوع تکیه‌گاه را بر کاهش تغییرمکان حداکثر سقف مورد مطالعه به صورت DPSSDDB نمایش می‌دهد. این تأثیر در بیشترین حالت ممکن تبدیل تکیه‌گاه مدل M۱۹ به M۲۲ می‌باشد که تغییرمکان حداکثر را ۳۶/۲۸ درصد کاهش می‌دهد. مجدداً همانند تغییرمکان حداکثر، انرژی کرنشی نیز با توجه به نوع تکیه‌گاه تغییر می‌یابد. در بیشترین تغییر و افزایش آن، در اثر تبدیل تکیه‌گاه مدل M۱۹ به مدل M۲۲، انرژی کرنشی به میزان ۲۳/۰۲ درصد افزایش از خود نشان می‌دهد که این بیشترین درصد افزایش آن در اثر تغییر تکیه‌گاه است. مجدداً دیده می‌شود که تأثیر تغییر تکیه‌گاه بر پارامتری چون انرژی کرنشی نیز زیاد نمی‌باشد. از طرفی، با توجه به تنش تسلیم Peva۴۵ (۳۵ N/m<sup>۲</sup>) و Plywood (N) با توجه به تنش تسلیم (۳/۷e۴۵ m<sup>۲</sup>) مشخص می‌گردد که در تمام مدل‌ها صفحه تخت وارد ناحیه تسلیم می‌گردد. همچنین در مدل‌های M۲۰، M۲۳ و M۲۴ نیز ورق فولادی تاخورده وارد ناحیه تسلیم می‌گردد.

جدول ۱۰. بیشینه تغییر مکان و انرژی کرنشی و تنش فون مایسز مدل‌های ریز هدف ششم

Table 10. Maximum displacement, strain energy and von Mises stress for models of sixth sub objective

مدل شماره	۶	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸
بیشینه تغییر مکان (m)	۰/۳۴۴۲	۰/۱۰۷۴	۰/۰۷۸۹	۰/۶۷۱۴	۱/۲۱۸۰
بیشینه انرژی کرنشی (J)	۱۱۷۶۴	۴۲۸۲/۳۷	۲۲۴۹/۱۱	۱۴۸۹۳/۵	۱۵۶۸۶
بیشینه تنش فون مایسز (N/m <sup>2</sup> )					
PSS	۳/۴۵۳e۷	۳/۴۴۹e۷	۳/۴۱۱e۷	۳/۴۵۱e <sup>7</sup>	۳/۴۵۳e۷
DB	۳/۴۵۱e۷	۱/۷۶۵e۷	۲/۵۵۷e۷	۱/۷۱۱e۷	۳/۴۵۱e۷

- [2] H. Wright, H. Evans, C. Burt, Profiled steel sheet/dry boarding composite floors, Structural Engineer, 67 (1989) 114-120.
- [3] F. Sharafi, F.A. Gandomkar, Fundamental natural frequency in structural composite floor constructed of two profiled steel sheet and two dry board, in: 4th International Congress of Civil, Architecture and Urban Development, Shahid Beheshti University, Iran, 2016 (in Persian).
- [4] F.A. Gandomkar, Determining comfort level of profiled steel sheeting dry board floor system, Ph.D. Thesis, National University of Malaysia, 2012.
- [5] National Building Regulations of Iran-Subject 21-Passive Defense, in, Ministry of Roads & Urban-Deputy of Housing and Building, 2012 (in Persian).
- [6] A. Mohtashamy, S. Sinaee, A. Shoushtary, Assessment behavior of steel frame against explosion loads, in: 05th National Congress on Civil Engineering, Mashhad Ferdowsi University, Iran, 2010 (in Persian).
- [7] Z. Xue, J.W. Hutchinson, Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads, International Journal of Mechanical Sciences, 45(4) (2003) 687-705.
- [8] D. Lawver, R. Daddazio, G. Jin Oh, C.K.B. Lee, A.B. Pifko, M. Stanley, Simulating the response of composite reinforced floor slabs subjected to blast loading, in: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Washington DC, USA, 2003.
- [9] V. Balden, G. Nurick, Numerical simulation of the post-failure motion of steel plates subjected to blast loading, International Journal of Impact Engineering, 32(1-4)

فاصله TNT اثر بیشتری بر تغییر آن دارد. همچنین، با توجه به نتایج تنش فون مایسز مشخص گردید که در هیچ کدام از مدل‌ها، ورق فولادی تاخوردگی به تسلیم نمی‌رسد، این در حالی است که در مدل M28، صفحه تخت به تسلیم می‌رسد.

#### ۶- نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه رفتار دینامیکی غیرخطی تحت بار انفجار را جهت سقف PSSDB و DPSSDDB با روش عددی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی کرد. تأثیر پارامترهای مختلف از جمله: تغییر ضخامت صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی، نوع صفحه تخت، فاصله پیچ‌های خودکار، شرایط مرزی، ابعاد سقف، دابل کردن ورق فولادی تاخوردگی و صفحه تخت و همچنین تغییر فاصله و وزن مواد منفجره بر رفتار مذکور بررسی گردید. نتایج تحقیق نشان دادند که تغییر ضخامت صفحه تخت، تغییر نوع صفحه تخت، ابعاد سقف، تغییر شرایط مرزی، دابل کردن ورق فولادی تاخوردگی و صفحه تخت و همچنین فاصله و وزن مواد منفجره تأثیر چشمگیری در تغییر مکان و انرژی کرنشی سقف دارند. این در حالی است که تغییر فاصله پیچ‌های خودکار و ضخامت ورق فولادی تاخوردگی تأثیر زیادی بر تغییر آنها ندارند. طبق نتایج حاصله در بعضی از شرایط، متناسب با ریزاهداف تحقیق، صفحه تخت و ورق فولادی تاخوردگی به تسلیم رسیدند و در بسیاری از موارد آن دو تسلیم نشدند.

#### مراجع

- [1] H. Wright, H. Evans, Profiled steel sheeting for the replacement of timber flooring in building renovation, SERC Grant GR/D/76875, in, United Kingdom, 1986.

- and columns strengthening methods, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(1) (2017 (in persian)).
- [21] F.A. Gandomkar, W.H. Wan Badaruzzaman, S.A. Osman, A. Ismail, Experimental and numerical investigation of the natural frequencies of the composite profiled steel sheet dry board (PSSDB) system, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 55(1) (2013) 11-21.
- [22] AISC Steel Design Guide Series 11-Floor Vibration Due to Human Activity, in: A.I.o.S. Construction (Ed.), 1997.
- [23] F. Bos, S.B. Casagrande, On-line non-destructive evaluation and control of wood-based panels by vibration analysis., *Journal of Sound and Vibration*, 2(268) (2003) 403-412.
- [24] A.M. Soydan, A.K. Sari, B. Duymaz, R. Akdeniz, B. Tunaboylu, Characterization of fiber-cement composites reinforced with alternate cellulosic fibers, *Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 19(3) (2018) 721-731.
- [25] Asia Roofing Industries Sdn. Bhd. . Ajiya Building Materials, Ajiya Peva45., in, 1996.
- [26] W.H.M. Wan Mohtar, B.V. Lim, A.A. Mutalib, W.H. Wan Badaruzzaman, Numerical prediction of moment-rotation behavior of profiled steel sheeting in the composite continuous floor system, in: Fifth international conference on thin-walled structures, Brisbane. Australia, 2008.
- [27] W.T. Curry, R.F.S. Hearmon, The strength properties of timber, Medical & technical publishing Co. Ltd, Leonard's House, Lancaster, England, 1974.
- [28] E. Ahmed, W. Wan Badaruzzaman, H. Finite element prediction on the structural performance of profiled steel sheet dry board structural composite system proposed as a disaster relief shelter, *Construction and Building Materials*, 19(4) (2005) 285-295.
- [29] N. Nordin, W. Wan Badaruzzaman, H. H. Awang, Connector stiffness of 'Peva-Cemboard' screwed connection in profiled steel sheet dry board (PSSDB) panel, in: Fifth International Conference on Construction (2005) 14-34.
- [10] A.G. Razaqpur, A. Tolba, E. Contestabile, Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 38 (2007) 535-546.
- [11] D. Jiang, Y. Liu, C. Qi, Z.D. Ma, B. Raju, W. Bryzik, Innovative composite structure design for blast protection, SAE International, (2007) 60-67.
- [12] S.A. Tekalur, A. Shukla, K. Shivakumar, Blast resistance of polyurea based layered composite materials, *Composite Structures*, 84(3) (2008) 271-281.
- [13] E. Wang, N. Gardner, A. Shukla, The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores, *International Journal of Solids and Structures*, 46(18-19) (2009) 3492-3502.
- [14] J. Shen, G. Lu, Z. Wang, L. Zhao, Experiments on curved sandwich panels under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37(9) (2010) 960-970.
- [15] L. Jing, Z. Wang, L. Zhao, Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading—numerical simulations, *Composite Structures*, 99 (2013) 213-223.
- [16] J. Li, C. Wu, H. Hao, An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads, *Materials & Design*, 82 (2015) 64-76.
- [17] W. Chen, H. Hong, S. Chen, F. Hernandez, Performance of composite structural insulated panel with metal skin subjected to blast loading, *Materials & Design*, 84 (2015) 194-203.
- [18] G. Iannitti, N. Bonora, G. Curiale, S. De Muro, S. Marfia, A. Ruggiero, E. Sacco, S. Scafati, G. Testa, Analysis of reinforced concrete slabs under blast loading, *Procedia Structural Integrity*, 9 (2018) 272-278.
- [19] M. Abdel Wahab, S. Mazek, M. Abada, M. Abdel Shafy, Blast hazard impact on V-shape composite panel performance, *Journal of Engineering Science and Military Technologies*, 2(2) (2018) 90-99.
- [20] G. Havaee, A. Bayat, Progressive collapse consequent of explosion load effect in reinforced concrete buildings

profiled steel sheeting in composite floor construction,  
Thin-walled structures, 5(1) (1987) 21-37.

in 21st Century (CITC-V), Istanbul, Turkey, 2009.  
[30] H. Wright, H. Evans, A folded plate method of analysis for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. A. Gandomkar, S. Parsafar, V. Razavi Tosee, N. Samimifard, Dynamic Behavior of Composite Floor Consisting Profiled Steel Sheet and Dry Board under Explosion Load, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 2889-2908.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17546.6595](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17546.6595)

