

EXTENDED ABSTRACT

Modeling on Ultra-Lightweight-Concrete (PAC) Encased Cold-Formed Steel Structures (CFS) Under Seismic Loads

Bahman Farahmand Azar*, Bahman Abeshpour

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 26 December 2024; **Reviewed:** 01 February 2026; **Accepted:** 14 February 2026

Keywords:

Cold-formed steel, Ultra-lightweight concrete, Seismic load, ABAQUS software.

1. Introduction

Recent advances in cold-formed steel (CFS) structures have highlighted their significant role in lightweight construction and seismic performance. Due to their low self-weight, these structures generate reduced inertial forces during seismic events, thereby improving overall structural response. This study investigates the effectiveness of polystyrene aggregate concrete (PAC) cladding in enhancing the seismic resilience of CFS structures. The primary objective is to evaluate the influence of PAC on energy dissipation capacity, load-bearing capacity, and buckling resistance under seismic loading conditions. The results indicate that the integration of innovative materials such as PAC can substantially improve structural performance, particularly in regions prone to seismic activity.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The present study employs numerical simulations using ABAQUS software, which are validated against experimental data to ensure the accuracy and reliability of the results. Two structural configurations CFS with PAC cladding and bare CFS were analyzed under seismic excitations based on the Bam, Manjil and Tabas earthquakes. Key performance indicators, including lateral displacement and energy dissipation, were evaluated to assess and compare the structural response.

2.2. Model validation and setup

Structural models were developed to represent both bare CFS structures and configurations encased with PAC. The mechanical properties of PAC, including compressive strength, flexural strength, and elastic modulus, were incorporated into the models. Numerical analyses focused on both local and global buckling behaviors to evaluate the composite interaction between PAC and CFS elements.

2.3. Seismic load analysis

Seismic analyses were conducted using ground motion records from three major Iranian earthquakes: Bam, Manjil and Tabas. The simulations incorporated detailed seismic loading scenarios, and the structural responses were examined to quantify the contribution of PAC cladding to overall stability and energy dissipation.

3. Results and discussion

The findings of this study demonstrate significant performance improvements in CFS structures encased with PAC:

- **Enhanced Load-Bearing Capacity:** Integration of PAC markedly increases both axial and lateral load resistance.
- **Improved Energy Absorption:** The PAC cladding enhances energy dissipation during seismic events, thereby reducing the risk of catastrophic failure.
- **Controlled Lateral Displacements:** Structures exhibit reduced lateral displacements, remaining within the permissible limits defined by seismic design codes.

Moreover, PAC cladding effectively mitigates both local and global buckling, provided the structural elements are adequately restrained. This composite configuration offers practical advantages for lightweight and resilient structural designs.

3.1. Comparative analysis

Seismic performance indicators, including floor displacements, brace responses, and energy absorption, consistently showed superior results in CFS structures encased with PAC compared to unreinforced CFS models. Numerical analyses corroborate these observations, highlighting PAC's effectiveness as a reliable material for enhancing seismic resilience in lightweight steel structures.

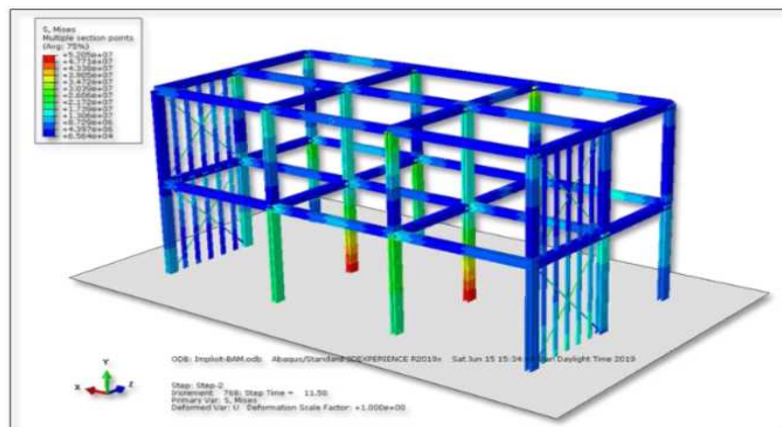


Fig. 1. The modeling of cold-formed steel structures

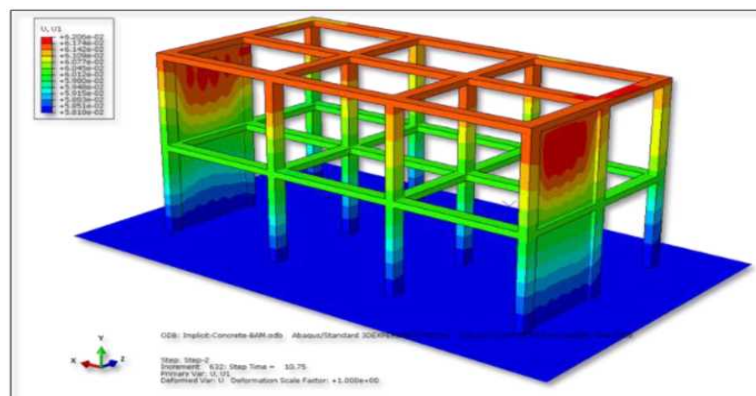


Fig. 2. The modeling of PAC encased CFS

4. Conclusions

This study demonstrates that polystyrene concrete (PAC) is an effective material for enhancing the seismic performance of cold-formed steel (CFS) structures. The key benefits of incorporating PAC include:

- Increased load-bearing and energy dissipation capacities, contributing to improved structural resilience under seismic loads.
- Enhanced stability against local and global buckling, ensuring better overall performance of CFS elements.
- Potential for widespread application in residential and low-rise buildings located in seismic-prone regions.

Future research should aim to optimize PAC formulations and expand numerical modeling approaches to accurately capture complex stability and interaction phenomena. Such efforts will strengthen PAC's applicability in modern, lightweight, and resilient structural designs.

مدل سازی سازه فولادی سردنورد شده (CFS) با پوشش بتن فوق سبک (PAC) تحت بار جانبی زلزله

بهمن فرهمندآذر^{1*}، بهمن آتش پور²

¹ استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

² کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تبریز

دریافت: 1403/10/6، بازنگری: 1404/11/12، پذیرش: 1404/11/25، نشر آنلاین: 1404/11/25

چکیده

در سال های اخیر، سازه های فولادی سردنورد شده (Cold-Formed Steel, CFS) به دلیل وزن کم، سرعت اجرا و عملکرد لرزه ای مناسب، توجه ویژه ای را در صنعت ساختمان به خود جلب کرده اند. از آنجاکه کاهش وزن سازه نقش مؤثری در کاهش نیروهای زلزله دارد، بهبود عملکرد لرزه ای این سیستم ها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش، اثر استفاده از پوشش بتن سبک پلی استایرن (Polystyrene Aggregate Concrete (PAC)) بر رفتار لرزه ای سازه های فولاد سردنورد شده (Cold Formed Steel (CFS)) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پس از صحت سنجی مدل های عددی، رفتار سازه های فولادی سردنورد شده با و بدون پوشش بتن PAC تحت بارگذاری لرزه ای تحلیل شد. تحلیل های عددی انجام شده با استفاده از نرم افزار ABAQUS نشان داد که سازه های تقویت شده با پوشش بتن PAC نسبت به سازه های فاقد این پوشش، از ظرفیت باربری بالاتر، جذب انرژی بیشتر و مقاومت به کمانش (Buckling) بهتری برخوردار هستند. همچنین نتایج حاکی از آن است که تغییر مکان نسبی جانبی این سازه ها در محدوده مجاز آیین نامه های طراحی قرار دارد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که به کارگیری بتن PAC می تواند به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود پایداری و عملکرد لرزه ای سازه های فولادی سردنورد شده مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: فولاد سردنورد شده، بتن فوق سبک پلی استایرن، بار زلزله، نرم افزار آباکوس ABAQUS.

1- مقدمه

قرار گرفته است. با این حال، رفتار ناپایداری اعضای نازک جدار فولادی، از جمله کمانش موضعی، اعوجاجی و کلی، همواره به عنوان یکی از چالش های اصلی این سیستم مطرح بوده است. به منظور بهبود عملکرد سازه های CFS، استفاده از پوشش های بتنی سبک به عنوان یک راهکار تقویتی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بتن فوق سبک پلی استایرن به دلیل وزن مخصوص کم، خواص عایق حرارتی و رطوبتی مناسب و مقاومت مطلوب در برابر حریق، گزینه ای مناسب برای ترکیب با سازه های فولادی سردنورد شده محسوب می شود. نتایج برنامه های آزمایشگاهی گزارش شده در مطالعات پیشین نشان می دهد که استفاده از پوشش بتن PAC می تواند ظرفیت باربری اعضای CFS را در برابر خمش و نیروی محوری به طور قابل توجهی افزایش دهد؛ به طوری که این افزایش، بسته به پارامترهای

در مناطق لرزه خیز، سبک سازی سازه ها به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش تقاضای لرزه ای و افزایش ایمنی ساختمان ها شناخته می شود. کاهش جرم سازه منجر به کاهش نیروهای اینرسی ناشی از زلزله شده و در نتیجه می تواند عملکرد لرزه ای سازه را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. از این رو، سبک سازی باید به صورت هم زمان در عناصر سازه ای و غیرسازه ای ساختمان مورد توجه قرار گیرد.

در این میان، سیستم سازه ای فولاد سردنورد شده به دلیل وزن کم، سرعت بالای اجرا و قابلیت صنعتی سازی، در سال های اخیر کاربرد گسترده ای در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است. این سیستم به ویژه در ایالات متحده آمریکا، به دلیل سازگاری با سیستم های چوبی و الزامات لرزه ای، مورد استقبال



به دلیل سبکی و سهولت حمل و نقل، برای پروژه‌های ساخت و ساز سریع و صنعتی گزینه‌ای مناسب به شمار می‌روند.

2-2- کمانش

کمانش پدیده‌ای ناپایداری در اعضای فشاری است که با بروز تغییر شکل جانبی ناگهانی همراه بوده و می‌تواند حتی در تنش‌هایی کمتر از تنش تسلیم ماده رخ دهد. این پدیده یکی از عوامل کنترل‌کننده ظرفیت باربری اعضای نازک‌جدار، به ویژه در سازه‌های فولادی سردنورد شده، محسوب می‌شود.

از نظر رفتار مصالح، کمانش به دو نوع الاستیک و غیرالاستیک تقسیم می‌شود. در کمانش الاستیک، تغییر شکل‌ها برگشت‌پذیر بوده و عضو پس از برداشتن بار به حالت اولیه بازمی‌گردد، در حالی که در کمانش غیرالاستیک، تغییر شکل‌های دائمی ایجاد شده و عضو وارد محدوده غیرخطی می‌شود.

بر اساس ناحیه وقوع تغییر شکل، کمانش می‌تواند به صورت کلی یا موضعی رخ دهد. کمانش کلی معمولاً در اعضای بلند و باریک مشاهده می‌شود که در آن کل عضو دچار ناپایداری می‌گردد. در مقابل، کمانش موضعی به تغییر شکل محدود در اجزای نازک عضو اطلاق می‌شود که بدون ناپایداری کلی عضو اتفاق می‌افتد. این نوع کمانش در اعضای نازک‌جدار فولادی اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین، از نظر صفحه وقوع تغییر شکل، کمانش می‌تواند در داخل صفحه یا خارج از صفحه عضو رخ دهد. شناخت دقیق این انواع کمانش، نقش اساسی در مدل‌سازی عددی، طراحی مهاربندی و انتخاب راهکارهای تقویتی مؤثر برای افزایش پایداری سازه‌های CFS دارد.

2-3- بتن سبک پلی‌استایرن

بتن سبک پلی‌استایرن (PAC) یکی از انواع بتن‌های سبک است که با جایگزینی سنگدانه‌های معمولی با گرانول‌های پلی‌استایرن منبسط‌شده تولید می‌شود. هدف اصلی از توسعه این نوع بتن، دستیابی به مصالحی با چگالی کم و خواص مکانیکی قابل قبول برای کاهش جرم سازه و بهبود عملکرد آن در برابر بارهای لرزه‌ای است.

به طور کلی، کاهش وزن بتن از طریق اصلاح طرح اختلاط و استفاده از سنگدانه‌های سبک امکان‌پذیر است. در بتن PAC، حذف شن و به کارگیری پلی‌استایرن موجب کاهش قابل توجه وزن مخصوص بتن شده و رفتار مکانیکی آن را به بتن‌های فوق‌سبک نزدیک می‌کند. خواص مکانیکی این نوع بتن، از جمله مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته، به طور عمده تابع مقدار ملات سیمانی و چگالی حجمی مخلوط بوده و با کنترل این

طراحی، بین 30 تا 190 درصد برای خمش و بین 10 تا 110 درصد برای نیروی محوری گزارش شده است. همچنین این پوشش قادر است، در صورت تأمین مهاربندی مناسب، بروز کمانش‌های کلی و اعوجاجی را در اعضای فولادی محدود کند. با وجود نتایج امیدوارکننده مطالعات آزمایشگاهی، توسعه روابط طراحی قابل اعتماد و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های CFS مجهز به پوشش بتن PAC همچنان نیازمند تحقیقات تکمیلی است.

در این پژوهش، ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط Hegyin و همکاران (2016) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS صحت‌سنجی شده‌اند. سپس رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی سردنورد شده با و بدون پوشش بتن PAC تحت اثر سه شتاب‌نگاشت واقعی زلزله‌های بم، منجیل و طیس مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیر پوشش بتن PAC بر بهبود عملکرد لرزه‌ای، ظرفیت باربری و پایداری سازه‌های CFS و ارائه نتایج قابل استفاده در طراحی مهندسی این سیستم‌ها است.

2- تعاریف و اصطلاحات

2-1- فولاد سردنورد شده (CFS)

فولاد سردنورد شده به مقاطع فولادی نازک‌جدار اطلاق می‌شود که از شکل‌دهی ورق‌های فولادی در دمای محیط و عمدتاً به روش نورد غلتکی تولید می‌شوند. این مقاطع به دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن، دقت ابعادی مناسب و قابلیت تولید صنعتی، کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های سازه‌ای سبک یافته‌اند.

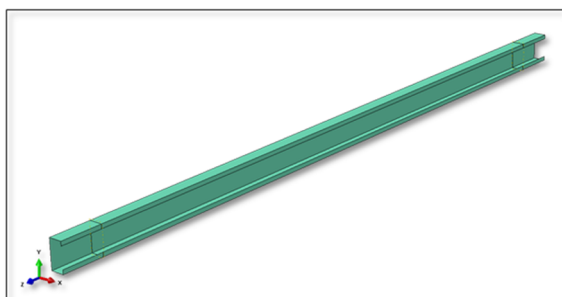
به طور کلی، فولادهای مورد استفاده در ساختمان‌سازی براساس فرآیند تولید به دو دسته فولاد گرم‌نورد شده و فولاد سردنورد شده تقسیم می‌شوند. در مقاطع سردنورد شده، ضخامت یکنواخت ورق در طول عضو و فرآیند شکل‌دهی سرد، امکان تولید مقاطع نازک‌جدار با کیفیت یکنواخت و خواص مکانیکی قابل کنترل را فراهم می‌سازد.

از جمله ویژگی‌های شاخص سازه‌های فولادی سردنورد شده می‌توان به وزن کم، سرعت بالای اجرا، کاهش ضایعات ساختمانی و قابلیت بالای بازیافت اشاره کرد. با این حال، رفتار ناپایداری اعضای نازک‌جدار، از جمله کمانش موضعی، اعوجاجی و کمانش کلی، یکی از چالش‌های اصلی در طراحی این سیستم‌ها محسوب می‌شود که نیازمند استفاده از راهکارهای تقویتی و مهاربندی مناسب است. در سازه‌های CFS، اعضای اصلی معمولاً از مقاطع فولادی نازک‌جدار با ضخامت یکنواخت ساخته می‌شوند که

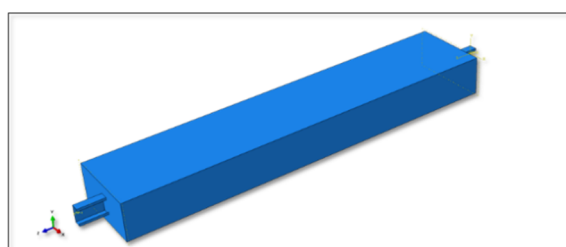
3-1- مدل سازی هندسی¹

مدل سازی هندسی المان های مورد مطالعه در محیط Part نرم افزار ABAQUS انجام شد. به منظور صحت سنجی مدل عددی، آزمایش ستون فولادی سردنورد شده با مشخصات C90-10-001 به عنوان نمونه مرجع انتخاب گردید. تحلیل ها در دو حالت شامل ستون بدون پوشش و ستون مجهز به پوشش بتن سبک پلی استایرن انجام شد (شکل های (1) و (2)).

مدل ها به صورت سه بعدی و با فرض Deformable Body ایجاد شدند. برای مدل سازی عضو فولادی سردنورد شده، از المان های پوسته ای (Shell) با روش Extrusion استفاده شد که امکان شبیه سازی دقیق رفتار نازک جدار اعضا را فراهم می سازد. پوشش بتن سبک پلی استایرن نیز به صورت یک محیط پیوسته با استفاده از المان های حجمی (Solid) و روش Extrusion مدل سازی گردید. انتخاب نوع المان ها با هدف دستیابی به دقت مناسب در شبیه سازی رفتار ناپایداری، از جمله کماتش موضعی و کلی اعضای فولادی، انجام شده است.



شکل 1- مدل سازی CFS با پوشش PAC در آباکوس



شکل 2- مدل سازی CFS در قسمت

3-2- مشخصات مصالح²

در این بخش، مشخصات مکانیکی و فیزیکی مصالح مورد استفاده در مدل سازی عددی تعریف شده است. خواص فولاد سردنورد شده مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول (1) در نظر گرفته شد. رفتار فولاد به صورت الاستیک-پلاستیک با معیار

پارامترها می توان ویژگی های نهایی بتن را متناسب با کاربرد مورد نظر تنظیم کرد.

در حال حاضر، بتن PAC عمدتاً در اجزای غیرسازه ای نظیر عایق کاری حرارتی، پرکننده ها و محافظت در برابر حریق مورد استفاده قرار می گیرد. با این حال، ویژگی هایی نظیر وزن کم، قابلیت جذب انرژی و امکان بهبود رفتار ناپایداری اعضای نازک جدار، این بتن را به گزینه ای مناسب برای استفاده به عنوان پوشش تقویتی در سازه های فولادی سردنورد شده تبدیل کرده است. از این رو، بررسی عملکرد سازه ای سیستم های CFS مجهز به پوشش بتن PAC، به ویژه تحت بارگذاری های لرزهای، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

3-3- صحت سنجی مدل

در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد سازه های فولادی سردنورد شده تقویت شده با پوشش بتن سبک پلی استایرن، یک مدل عددی سه بعدی توسعه داده شد. با توجه به اهمیت دقت مدل سازی عددی در تحلیل رفتار ناپایداری اعضای نازک جدار، صحت سنجی مدل ارائه شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود در مطالعات پیشین انجام گرفت.

در برنامه های آزمایشگاهی مرجع، رفتار خمشی و فشاری المان ها و پانل های CFS با و بدون پوشش بتن PAC مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش ها، نمونه هایی با ابعاد مختلف مورد استفاده قرار گرفتند تا حالت های مختلف گسیختگی، از جمله کماتش موضعی، اعوجاجی و کلی، شناسایی و ارزیابی شود. نتایج این مطالعات نشان داد که پوشش بتن PAC قادر است بروز کماتش کلی و اعوجاجی را در اعضای فولادی محدود کرده و در بسیاری از موارد رفتاری مشابه مهاربندی کامل ارائه دهد.

بر این اساس، نمونه ای از المان های آزمایش شده با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سازی عددی شد. مدل ها تحت بارگذاری محوری قرار گرفته و تحلیل ها در دو حالت، شامل المان های بدون پوشش و المان های مجهز به پوشش بتن PAC، انجام پذیرفت. در مدل سازی عددی، مشخصات هندسی، خواص مکانیکی مصالح و شرایط مرزی مطابق با داده های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از تحلیل های عددی با داده های آزمایشگاهی متناظر مقایسه گردید. این مقایسه شامل ظرفیت باربری نهایی، الگوی تغییر شکل و نوع مود کماتش بود. تطابق مناسب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی ارائه شده را تأیید کرده و امکان استفاده از آن را برای تحلیل رفتار لرزه ای سازه های CFS مجهز به پوشش بتن PAC فراهم می سازد.

3-3- مونتاز مدل¹

در مدل عددی، المان‌های فولادی و پوشش بتن PAC در محیط Assembly نرم‌افزار ABAQUS ترکیب شدند. برای ستون فولادی سردنورد شده بدون پوشش، یک Assembly منفرد تعریف شد که کلیه تحلیل‌ها، شامل بارگذاری و مش‌بندی²، بر روی آن اعمال گردید.

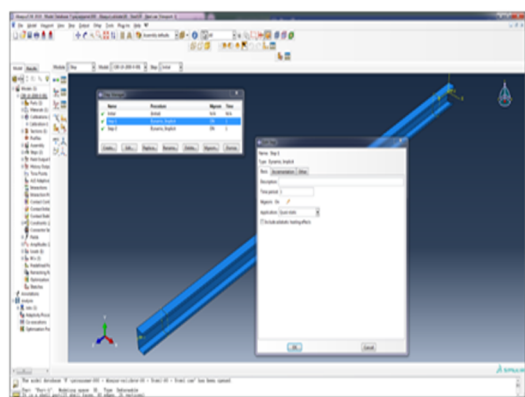
در حالت ستون فولادی مجهزه پوشش بتن PAC، دو قطعه جداگانه (عضو فولادی و بتن سبک) به‌صورت هم‌زمان مونتاز شدند. در این مدل، عضو فولادی به‌عنوان Embedded Element در داخل پوشش بتن مدفون شده است تا رفتار اتصال بین فولاد و بتن به‌طور واقعی شبیه‌سازی شود. این روش امکان انتقال نیروهای برشی و تعامل سازه‌ای بین فولاد و پوشش را فراهم می‌کند و به‌دقت مدل در پیش‌بینی رفتار ناپایداری، ازجمله کمانش موضعی و کلی، کمک می‌کند.

3-4- مراحل تحلیل³

تحلیل عددی رفتار سازه‌های CFS با و بدون پوشش بتن PAC با استفاده از ماژول Step نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. برای شبیه‌سازی پاسخ تحت بارگذاری لرزه‌ای، از تحلیل Implicit، Dynamic بهره گرفته شد که رفتار شبه‌استاتیکی و اثرات زمان-وابسته را شبیه‌سازی می‌کند.

به‌منظور دقت در پیش‌بینی تغییر شکل‌های بزرگ و ناپایداری‌های ناشی از کمانش، اثرات هندسی غیرخطی در تمامی تحلیل‌ها لحاظ گردید. تحلیل در دو مرحله انجام شد:

مرحله بارگذاری اعمال شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای به سازه
مرحله کاهش بار حذف تدریجی بار برای بررسی برگشت‌پذیری تغییر شکل‌ها و کنترل رفتار غیرخطی شکل (3)، ترتیب مراحل تحلیل و شرایط بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل 3- تنظیمات Step المان برای مدل‌سازی

تسلیم مناسب مدل‌سازی گردید تا امکان شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و پدیده‌های ناپایداری فراهم شود.

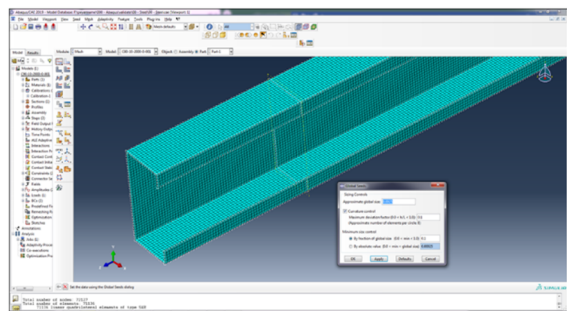
مشخصات بتن سبک پلی‌استایرن نیز بر اساس طرح اختلاط نوع A و مطابق با داده‌های ارائه‌شده در جدول (2) تعریف گردید. در مدل‌سازی بتن PAC، پارامترهای مکانیکی مؤثر شامل چگالی، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری لحاظ شد تا رفتار سازه‌ای این پوشش در تعامل با عضو فولادی به‌درستی بازتاب داده شود. انتخاب مدل‌های رفتاری مصالح و مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای انجام شده است که نتایج عددی بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در فرآیند صحت‌سنجی داشته باشند.

جدول 1- نتایج آزمایش فولاد

نمونه‌های ساختاری	استحکام کششی (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	استحکام تسلیم (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	ضخامت اسمی مربوطه (میلی‌متر)
سری اول	421	372	0/9
سری دوم	391	314	0/9
سری دوم	380	305	1/5
c90-10-2700	379	317	0/9
c90-15-2700	486	363	1/5

جدول 2- جدول نتایج بتن PAC

نام ترکیب	چگالی حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقاومت فشاری (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	مقاومت خمشی (نیوتن بر میلی‌متر مربع)	مدول یانگ (نیوتن بر میلی‌متر مربع)
"A"	403/51	0/632	0/346	115/36
"X"	285/91	0/392	0/171	70/80
WM1	231/14	0/155	0/130	100/51
WM2	213/51	0/149	0/174	105/43
WM3	203/43	0/132	0/086	43/30
WM4	247/63	0/172	0/087	83/17
WM5	181/01	0/095	0/044	90/14
WM6	236/07	0/151	0/057	36/64
WM7	232/80	0/190	0/088	48/09
WM8	253/34	0/211	0/101	79/96
WM9	242/96	0/187	0/115	85/68
WM10	251/88	0/152	0/139	113/00
WM11	265/6	0/236	0/175	81/95

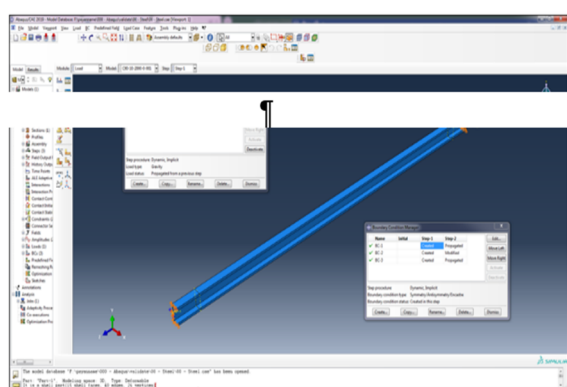


شکل 5- نحوه اعمال بار و شرایط مرزی در نرم‌افزار

3-7- مش‌بندی مدل

گسسته‌سازی مدل‌های عددی با استفاده از محیط Mesh در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. برای ستون فولادی سردنورد شده، از المان‌های پوسته‌ای چهارگوش R4S با انتگرال کاهش یافته و اندازه المان 8 میلی‌متر استفاده گردید. این انتخاب امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار نازک‌جدار فولاد و پیش‌بینی مودهای کمناش موضعی و کلی را فراهم می‌کند، برای پوشش بتن سبک پلی‌استایرن، از المان‌های حجمی سه‌بعدی C3D8R با هشت گره و انتگرال کاهش یافته استفاده شد. اندازه مش در بتن 5 سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا تعادل مناسبی بین دقت تحلیل و هزینه محاسباتی ایجاد گردد.

انتخاب نوع و اندازه المان‌ها به گونه‌ای انجام شده است که نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در صحت‌سنجی همخوانی داشته باشند و تحلیل رفتار ناپایداری، از جمله کمناش موضعی و کلی، با دقت قابل قبول انجام گیرد (شکل‌های (6) و (7)).

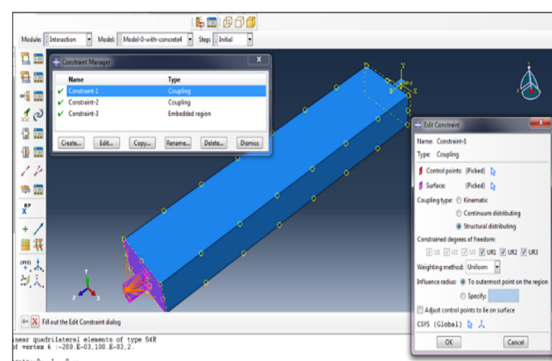


شکل 6- مش‌بندی المان CFS

انتخاب این روش تحلیل امکان بررسی دقیق رفتار ناپایداری و اثرات پوشش بتن PAC بر کمناش موضعی و کلی اعضای نازک‌جدار را فراهم می‌کند.

3-5- شرایط اتصال و عکس‌العمل مصالح¹

در مدل عددی ستون‌های فولادی سردنورد شده با پوشش بتن PAC، تعامل بین فولاد و بتن با استفاده از Embedded Region شبیه‌سازی شد؛ به طوری که عضو فولادی به طور کامل در داخل پوشش بتن مدفون است. این روش، امکان انتقال نیروهای برشی و تعامل سازه‌ای بین فولاد و بتن را فراهم می‌کند و رفتار مرکب سیستم را به صورت واقع‌گرایانه مدل می‌نماید. شرایط مرزی و قیدهای اعمال شده بر المان‌ها مطابق با شکل (4) تعریف شده‌اند تا محدودیت‌های واقعی سازه در پروژه آزمایشگاهی مرجع شبیه‌سازی شود. این تنظیمات موجب می‌شوند که اثرات کمناش موضعی و کلی و همچنین پاسخ لرزه‌ای اعضای نازک‌جدار به درستی پیش‌بینی شود.

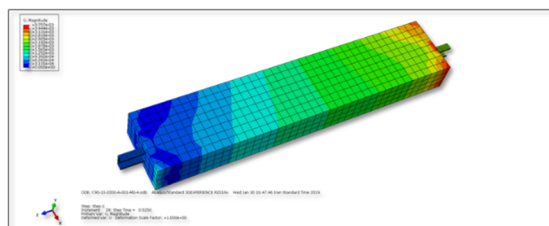


شکل 4- تنظیمات مربوط به قسمت Interaction

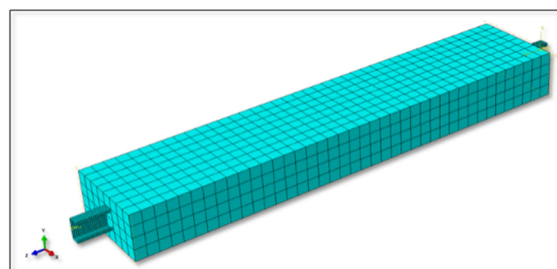
3-6- بارگذاری و شرایط مرزی²

در مدل عددی، بارگذاری تنها شامل نیروی ثقلی وارد بر ستون‌ها می‌باشد. شرایط مرزی به گونه‌ای اعمال شد که جابه‌جایی در جهت طولی المان محدود به 0/0055 متر بوده و حرکت در سایر جهات مسدود گردید. تکیه‌گاه‌ها به صورت گیردار تعریف شدند تا رفتار انتهای ستون مطابق با نمونه آزمایشگاهی مرجع شبیه‌سازی شود.

این تنظیمات شرایط مرزی و بارگذاری، همانند شکل (5) نمایش داده شده‌اند و امکان بررسی دقیق پاسخ ناپایداری، از جمله کمناش موضعی و کلی و همچنین اثر پوشش بتن PAC بر رفتار ستون‌های CFS را فراهم می‌آورند.



شکل 9- نتایج تحلیل المان CFS با پوشش PAC



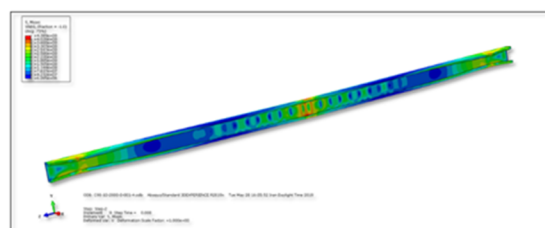
شکل 7- مش بندی المان CFS با پوشش PAC

3-7- اجرای تحلیل¹

پس از تکمیل مراحل مش بندی، تحلیل عددی مدل ها از طریق محیط Job نرم افزار ABAQUS انجام شد. در این مرحله، حل معادلات حاکم بر رفتار اعضای فولادی و پوشش بتن PAC با توجه به شرایط بارگذاری و قیدهای اعمال شده انجام گردید. محیط Job امکان پردازش تحلیل های خطی و غیرخطی، کنترل روند همگرایی و بررسی خطاهای محاسباتی را فراهم می کند. این مرحله، به طور مستقیم با صحت سنجی مدل ارتباط دارد، زیرا نتایج حاصل از Job برای مقایسه با داده های آزمایشگاهی و ارزیابی دقت پیش بینی رفتار ناپایداری، از جمله کمانش موضعی و کلی، مورد استفاده قرار می گیرد.

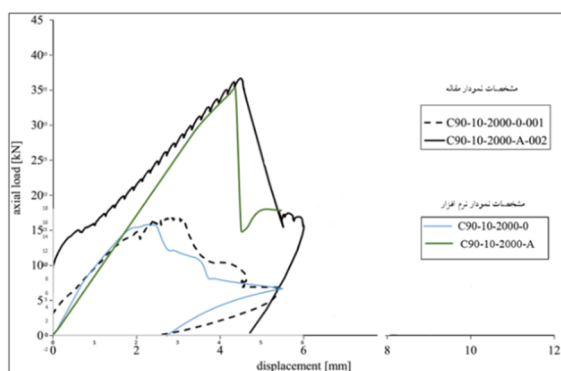
3-9- تحلیل و استخراج نتایج²

پس از اتمام تحلیل عددی، نتایج حاصل با استفاده از محیط Visualization نرم افزار ABAQUS بررسی و ارزیابی گردید. در این مرحله، توزیع تنش و کرنش، تغییر مکان ها، نیروهای وارد المان ها و سایر پارامترهای سازه ای مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار عددی ستون های CFS با و بدون پوشش بتن PAC به دقت تحلیل شود. این اطلاعات، برای ارزیابی صحت مدل و مقایسه نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی استفاده شدند. علاوه بر این، بررسی دقیق تغییر مکان ها و توزیع تنش ها امکان تحلیل پدیده های ناپایداری، از جمله کمانش موضعی و کلی و اثر پوشش PAC بر عملکرد لرزه ای سازه را فراهم می آورد.



شکل 8- نتایج تحلیل المان CFS با نرم افزار آباکوس

استفاده از تحلیل عددی المان محدود، نمودار بار- جابه جایی ستون های فولادی سردنورد شده با و بدون پوشش بتن PAC استخراج گردید. نتایج عددی حاصل از مدل سازی، برای ارزیابی دقت پیش بینی رفتار سازه، با داده های آزمایشگاهی مقایسه شدند. همان طور که در نمودار (1) نشان داده شده است، تطابق میان نتایج عددی و آزمایشگاهی قابل قبول بوده و نشان دهنده صحت مدل سازی و دقت انتخاب مصالح، شرایط مرزی و تعامل بین فولاد و پوشش بتن PAC است. این مقایسه، پایه ای برای ادامه تحلیل های رفتاری و بررسی پاسخ لرزه ای و پدیده های ناپایداری اعضای نازک جدار فراهم می آورد می آورد (شکل های (8) و (9)).



نمودار 1- منحنی بار- جابه جایی نتایج آزمایش مقاله و نتایج خروجی از نرم افزار

4- مدل سازی ساختمان

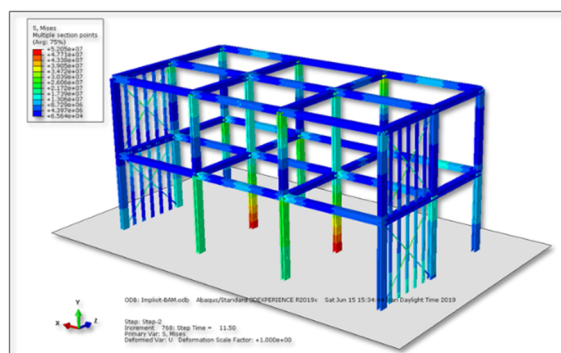
پس از انجام صحت سنجی مدل عددی، یک ساختمان دو طبقه با سیستم فولاد سردنورد شده در نرم افزار Abaqus مدل سازی شد. سازه علاوه بر بارهای ثقلی، تحت اثر زلزله های طیس، منجیل و بم مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر پوشش بتن سبک پلی استایرن، تحلیل ها در دو حالت با پوشش بتن و بدون پوشش بتن انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

جدول 4- مشخصات مکانیکی PAC و CFS

ماده	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول یانتگ (پاسکال)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (پاسکال)
فولاد				
سردنورد شده	7850	2E +11	0/3	3/23E +08
بتن سبک پلی استایرن	403/51	1/15 E+8	0/21	6/32E+05

2-4- بارگذاری

بارگذاری ساختمان شامل بارهای ثقیلی و بار زلزله به صورت تحلیل تاریخیچه زمانی برای سه زلزله ایران شامل طیس، بم و منجیل در نظر گرفته شد. بارهای ثقیلی شامل بار مرده و زنده کف طبقه اول به میزان 635 کیلوگرم بر مترمربع، کف بام 585 کیلوگرم بر مترمربع و بار مرده دیوارهای پیرامونی 300 کیلوگرم بر مترمربع لحاظ گردید. ترکیب بارگذاری ثقیلی مطابق آیین نامه استاندارد 2800 و به صورت $1/2 D+L$ اعمال شد. بار زلزله با استفاده از شتابنگاشت های واقعی استخراج شده از پایگاه داده PEER و پس از مقیاس بندی در نرم افزار SeismoSignal، مطابق نمودار (4) تا (6) به مدل عددی در نرم افزار Abaqus اعمال گردید. پس از مدل سازی و اعمال مشخصات مکانیکی مصالح و بارگذاری ثقیلی، شتابنگاشت ها با استفاده از نرم افزار SeismoSignal اصلاح و مقیاس بندی شده و بیشترین اثر شتابنگاشت ها در تحلیل ها لحاظ گردید (شکل 11)).

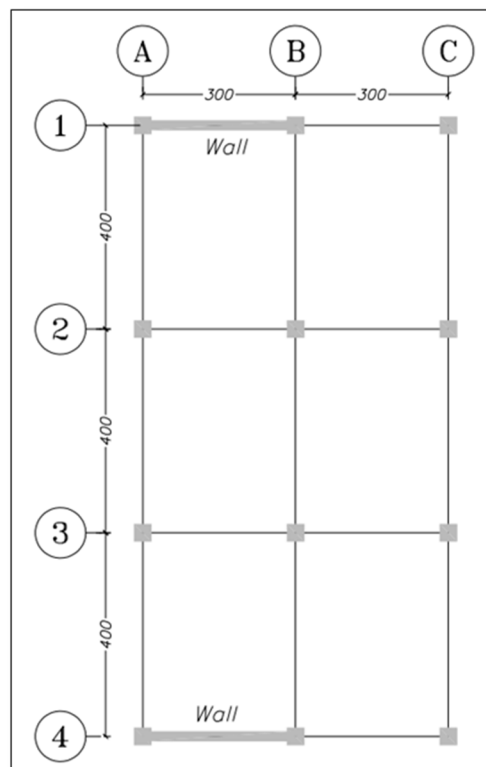


شکل 11- مدل سازی ساختمان فولاد سردنورد شده

5-4- انرژی داخلی

نتایج مربوط به انرژی داخلی سازه های فولاد سردنورد شده و سازه های فولاد سردنورد شده با پوشش بتن سبک پلی استایرن به شرح نمودارهای (2) تا (7) ارائه شده است:

پلان ساختمان تقریباً مستطیلی بوده و مطابق آیین نامه 2800 منظم محسوب می شود. مساحت هر طبقه 72 مترمربع و ارتفاع طبقات 3 متر در نظر گرفته شده است (شکل 10)).



شکل 10- پلان ساختمان مدل سازی شده

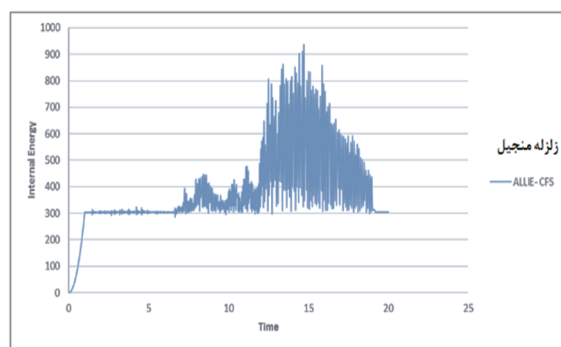
1-4- مشخصات مکانیکی مواد

پروفیل های مورد استفاده در مدل سازی ستون ها و تیرها و دیوار برشی به صورت جدول (3) می باشد:

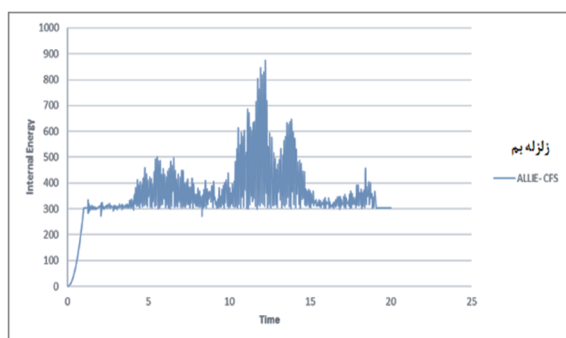
جدول 3- پروفیل های مورد استفاده در مدل سازی

عضو	پروفیل
ستون	2I 160-160-50-8
تیر	2I 200-120-50-15
دیوار برشی	C140-41-13-10
تسمه دیوار برشی	Belt 50*1

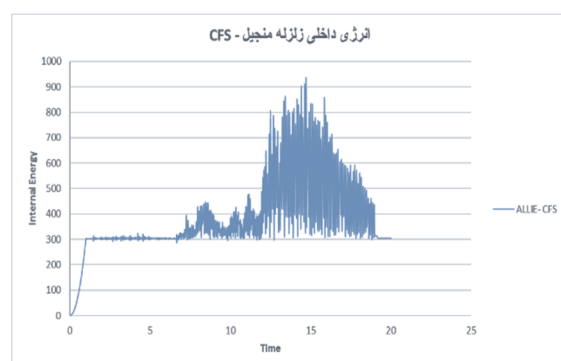
به منظور مهار پروفیل ها، بتن سبک پلی استایرن با طرح اختلاط A به کار گرفته شد و ابعاد پوشش بتن مطابق با مدل های آزمایشگاهی در نظر گرفته گردید. مشخصات فولاد سردنورد شده و بتن سبک پلی استایرن مطابق با جدول (4) در مدل اعمال شده است.



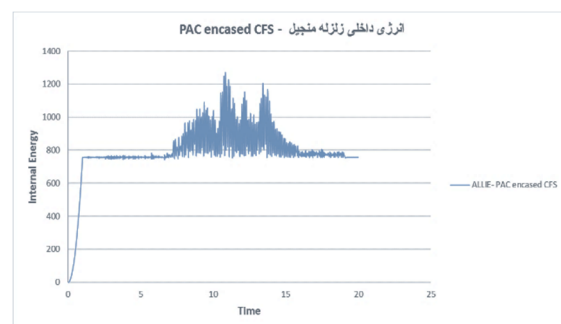
نمودار 2- انرژی داخلی زلزله بم برای سازه CFS



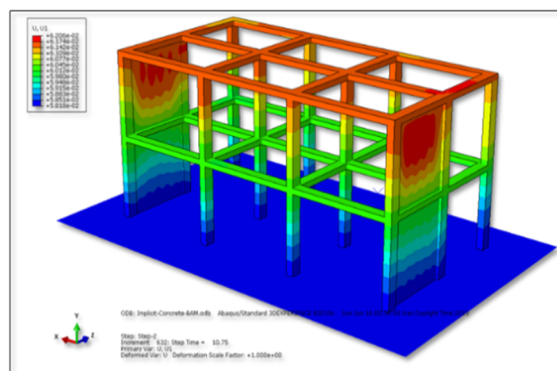
نمودار 3- انرژی داخلی زلزله بم برای سازه CFS با پوشش PAC



نمودار 4- انرژی داخلی زلزله منجیل برای سازه CFS



نمودار 5- انرژی داخلی زلزله منجیل برای سازه CFS با پوشش PAC



شکل 12- مدل سازی ساختمان فولاد سردنورد شده با پوشش بتن سبک پلی استایرن

4-6- جابه جایی نسبی طبقات

جابه جایی نسبی طبقات برای سه شتاب نگاشت مختلف مطابق جداول (5) تا (7) می باشد:

4-3- مش بندی

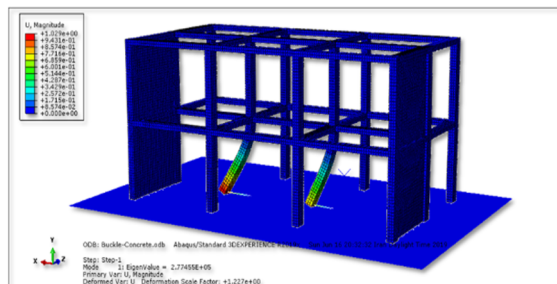
برای مش بندی اعضای ساختمان براساس مش بهینه استخراج شده از مرحله صحت سنجی انجام گردید. در این راستا، برای اعضای فولاد سردنورد شده از المان پوسته ای R4S با اندازه مش 8 میلی متر و برای بتن سبک پلی استایرن از المان سه بعدی C3D8R با اندازه مش 5 سانتی متر استفاده شد. این انتخاب به منظور دستیابی به دقت مناسب نتایج و هم زمان حفظ کارایی محاسباتی صورت گرفته است.

4-4- تحلیل سازه

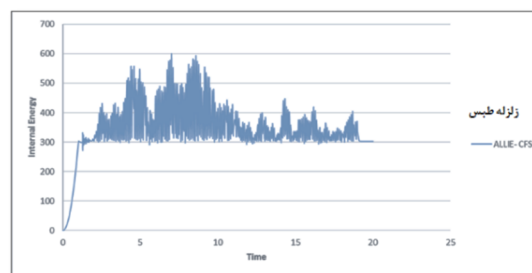
تحلیل سازه به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شد. در این روش، پاسخ دینامیکی سازه با اعمال شتاب نگاشت زلزله به تراز پایه به صورت تابعی از زمان محاسبه می شود و رفتار فرالترجاعی سازه در نظر گرفته می شود. ابتدا تحلیل استاتیکی برای اعمال اثر بارهای ثقلی انجام گرفت و سپس تحلیل دینامیکی غیرخطی با استفاده از روش Dynamic, Implicit در حالت Transient اجرا شد. در نهایت، اثرات تغییر شکل ها و تنش های پس مانده سازه از طریق تحلیل شبه استاتیکی مورد بررسی قرار گرفت (شکل 11)).

4-6- جابه‌جایی نسبی طبقات

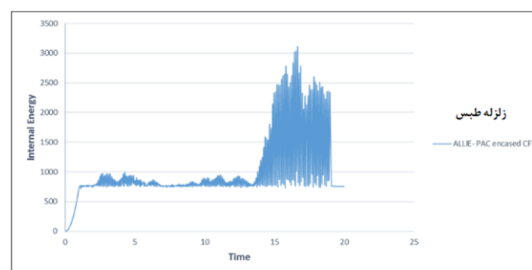
جابه‌جایی نسبی طبقات برای سه شتاب‌نگاشت مختلف مطابق جداول (5) تا (7) می‌باشد:



شکل 13- بار بحرانی سازه CFS با پوشش PAC



نمودار 6- انرژی داخلی زلزله منجیل برای سازه CFS



نمودار 7- انرژی داخلی زلزله منجیل برای سازه CFS با پوشش PAC

جدول 5- جابه‌جایی نسبی طبقات برای زلزله بم

ردیف	سازه	موقعیت	طبقه	اختلاف جابه‌جایی	ارتفاع طبقه	جابه‌جایی نسبی طبقه	جابه‌جایی نسبی مجاز آیین‌نامه	توضیحات
1	CFS Embedded PAC	محور 4-C	همکف	6/60E-04	2/8	2/36E-05	<0/07	OK
		محور 4-C	اول	1/76E-04	2/8	6/29E-05	<0/07	OK
2	CFS	محور 4-C	همکف	4/00E-05	2/8	1/43E-06	<0/07	OK
		محور 4-C	اول	2/00E-05	2/8	7/14E-06	<0/07	OK

جدول 6- جابه‌جایی نسبی طبقات برای زلزله منجیل

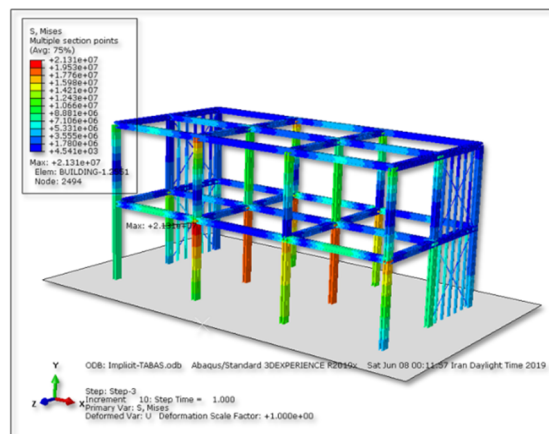
ردیف	سازه	موقعیت	طبقه	اختلاف جابه‌جایی	ارتفاع طبقه	جابه‌جایی نسبی طبقه	جابه‌جایی نسبی مجاز آیین‌نامه	توضیحات
1	CFS Embedded PAC	محور A-4	همکف	8/50E-05	2/8	3/04E-05	<0/07	OK
		محور A-4	اول	2/17E-04	2/8	7/75E-05	<0/07	OK
2	CFS	محور A-4	همکف	1/10E-05	2/8	3/93E-06	<0/07	OK
		محور A-4	اول	2/50E-05	2/8	8/93E-06	<0/07	OK

جدول 7- جابه‌جایی نسبی طبقات برای زلزله طبرس

ردیف	سازه	موقعیت	طبقه	اختلاف جابه‌جایی	ارتفاع طبقه	جابه‌جایی نسبی طبقه	جابه‌جایی نسبی مجاز آیین‌نامه	توضیحات
1	CFS Embedded PAC	محور A-4	همکف	2/07E-03	2/8	7/39E-04	<0/07	OK
		محور A-4	اول	1/61E-03	2/8	5/76E-04	<0/07	OK
2	CFS	محور A-4	همکف	2/37E-04	2/8	8/46E-05	<0/07	OK
		محور A-4	اول	1/19E-04	2/8	4/25E-05	<0/07	OK

جدول 8- تنش پس‌مانده سازه CFS و سازه CFS

ردیف	سازه	شتاب نگاشت بم	شتاب نگاشت منجیل	شتاب نگاشت طَبس	بار استاتیکی
1	فولاد سردنورد شده با پوشش بتن سبک پلی‌استایرن	2/19E+07	2/19E+07	2/19E+07	2/19E+07
2	فولاد سردنورد شده	2/13E+07	2/12E+07	2/13E+07	2/12E+07



شکل 15- تنش پسماند فولاد CFS

5- نتیجه‌گیری

توجه به محدود بودن مطالعات در زمینه سازه‌های فولاد سردنورد شده (CFS) با پوشش بتن سبک پلی‌استایرن (PAC) به‌روش اجزای محدود، انجام تحقیقات بیشتر در این حوزه ضروری است. تحلیل‌های اجزای محدود از اعتبار علمی بالایی برخوردار بوده و با نتایج تجربی تطابق مناسبی دارند. این روش نسبت به آزمایش‌های تجربی، از نظر زمان و هزینه به‌صرفه‌تر است و امکان ارائه تحلیل‌های جامع‌تر، شامل بررسی نیروها، جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها، کرنش‌ها، خرابی‌ها و انرژی اعضا و نقاط مختلف سازه را فراهم می‌کند. همچنین، انعطاف‌پذیری بالایی در اصلاح خطاها در فرآیند طراحی نسبت به نمونه‌های آزمایشگاهی دارد. در این پژوهش، پس از صحت‌سنجی مدل، یک ساختمان دو طبقه با المان‌های فولاد سردنورد شده با و بدون پوشش بتن PAC تحت بارهای ثقلی و زلزله با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تحلیل شد. نتایج به‌دست‌آمده عبارتند از:

- انرژی داخلی:
- تحت زلزله بم: سازه با پوشش PAC حدود 3/3 برابر سازه بدون پوشش
- تحت زلزله منجیل: 1/36 برابر
- تحت زلزله طَبس: 5/15 برابر
- جابه‌جایی نسبی طبقات:

مقادیر جابه‌جایی در هر دو مدل کمتر از حدود مجاز آیین‌نامه بوده است. افزایش جابه‌جایی سازه با پوشش PAC عمدتاً ناشی از افزایش وزن بتن در بارهای ثقلی است.

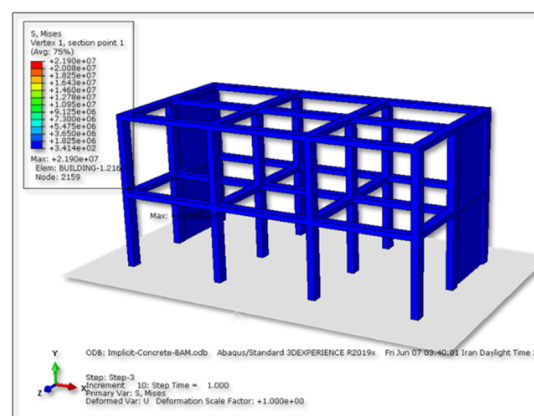
4-7- بار بحرانی سازه فولاد سردنورد شده با پوشش بتن

سبک PAC

برای تعیین بار بحرانی سازه، تحلیل Buckle انجام شد و نتایج در شکل (13) ارائه شده است. در این تحلیل، 30 مد تغییر شکل در نظر گرفته شد و حداقل بار بحرانی در مد اول مشاهده گردید. نتایج نشان می‌دهد که بار بحرانی سازه فولاد سردنورد شده با پوشش بتن سبک PAC برابر $E5 + 2/77$ نیوتن بر مترمربع است. بار بحرانی سازه فولاد سردنورد شده بدون پوشش بتن برابر $E4 + 9/99$ نیوتن بر متر طول می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از پوشش بتن سبک PAC منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و بهبود عملکرد پایداری سازه می‌گردد.

4-8- تنش پس‌ماند سازه

پس از اعمال بارهای لرزه‌ای، سازه فولاد سردنورد شده (شکل 15) و سازه فولاد سردنورد شده با پوشش بتن سبک پلی‌استایرن (شکل 14) مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج مربوط به تنش پسماند برای هر سه شتاب‌نگاشت زلزله در جدول (8) ارائه شده است.



شکل 14- تنش پسماند در سازه فولاد CFS با پوشش بتن PAC

- seismic requirements for cold-formed steel wall systems (LSF) and limitations of their application in multi-story buildings", Second International Conference on Architecture and Structure, 2011.
- Mostajeran A, Saadatpour M, "Investigation of lateral behavior of lightweight steel frames (LSF) constructed using cold-formed steel sections", Eighth International Congress on Civil Engineering, 2009.
- Lotfollahi Yaghin M, Taremi M, Mehrabani M, "Performance evaluation of cold-formed steel shear walls (CFS-SW) with openings", Sixth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, 2011.
- Yousefzadeh H, Moslehi Far A, "Investigation of seismic behavior of lightweight steel frames braced with diagonal straps", Second National Conference on Steel Structures, 2011.
- Parastesh H, Bagheri HA, Hosseini N, "Investigation of seismic behavior of lightweight cold-formed steel structures with solid lightweight concrete walls", First International Conference on Concrete Technology, 2009.

- بار بحرانی:

تحلیل کمانش نشان داد که استفاده از پوشش PAC موجب افزایش حدود 11 درصدی بار بحرانی نسبت به سازه بدون پوشش می‌گردد.

- تنش پس‌ماند:

- سازه با پوشش PAC: $2.29+E7$

- سازه بدون پوشش: $2.13+E7$

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بتن سبک PAC علاوه بر بهبود ظرفیت باربری و پایداری، باعث افزایش انرژی جذب شده و کاهش تنش‌های بحرانی می‌شود و می‌تواند گزینه‌ای مناسب و اقتصادی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های CFS باشد.

6- مراجع

- Hegyi P, Dunai L, "Experimental investigations on ultra-lightweight-concreted encased cold-formed steel structures: Part II: Stability behaviour of elements subjected to compression", Thin-Walled Structures, 2016, 101, 100-108.
- Hegyi P, Dunai L, "Experimental study on ultra-lightweight-concrete encased cold-formed steel structures Part I: Stability behaviour of elements subjected to bending", Thin-Walled Structures, 2016, 101, 75-84.
- Bagheri Sabbagh A, Mirghaderi S, "Design of cold-formed steel structures", Elm and Adab Publication, 2008.
- Mozinani A, Parastesh H, "Effect of effective parameters on the strength and density of lightweight concrete containing polystyrene aggregates", University of Science and Culture, Faculty of Civil Engineering, Ministry of Science, Research and Technology, 2013.
- Esmaili Niari S, Rafiee B, Abedi K, "Performance evaluation of buildings constructed with cold-formed steel (CFS) sections", First International Conference on Urban Construction Adjacent to Active Faults, 2011.
- Fallah M, Vatani Eskouei A, "Light gauge steel framing and improvement of efficiency in construction industry", Sixth International Congress on Civil Engineering, 2003.
- Mirghaderi S, Bagheri A, "Theoretical and experimental study of three-dimensional buildings using composite cold-formed steel sections for low-rise and mid-rise buildings", Conference on Seismic Rehabilitation and Strengthening of Structures, 2002.
- Parastesh H, et al., "Finite element analysis of flexural strength and rotational capacity of C-shaped cold-formed steel sections in lightweight polystyrene structures", International Conference on Lightweight Structures and Earthquake Engineering, 2010.
- Heidari M, "Investigation of connection behavior in cold-formed steel structures", Sharif University of Technology, 2010.
- Mirghaderi S, Sepas M, Mirghaderi L, "Presentation of