



رفتار لرزه‌ای قاب فولادی خمشی دارای دال مرکب با ورق فولادی عرشه با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود

مجتبی فتحی^۱، چیا سهراب نژاد^۲

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۲/۱۶)

چکیده

دال‌های مرکب دارای ورق فولادی تحتانی، یکی از بهترین روش‌های علمی و اجرایی سقف‌های تیر مرکب است. در این تحقیق، دو قاب فولادی خمشی دارای سقف مرکب با و بدون ورق فولادی عرشه به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی شتاب نگاشت زلزله قرار گرفتند و عملکرد لرزه‌ای آنها با هم مقایسه شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با استفاده از ورق فولادی، زمان تناوب ارتعاش و بیشینه تغییر مکان جانبی قاب کاهش اما نیروی برش پایه و ظرفیت استهلاک انرژی قاب افزایش یافت. همچنین روند تشکیل مفاصل پلاستیک در هر دو قاب یکسان اما در قاب با ورق فولادی، این مفاصل در گام زمانی دیرتری تشکیل شدند. علاوه بر این در قاب بدون ورق عرشه، ترک در دال بتنی در گام زمانی زودتری نسبت به قاب دارای ورق عرشه تشکیل شد.

کلمات کلیدی

رفتار لرزه‌ای، قاب فولادی خمشی، دال مرکب، ورق فولادی تحتانی عرشه

Seismic Behavior of Moment Resisting Steel Frame with Steel Deck Composite Slab using Finite Element Modeling

M. Fathi, Ch. Sohrab Nejad

ABSTRACT

Steel deck composite slabs are widely used for composite floor systems. In this slab, steel deck remains permanently in place as an integral part of the floor system, and the hardened concrete slab acts compositely with the profiled steel deck. Composite slabs lead to a notable reduction in the structure weight, the construction cost, time and have enough strength. Steel decks perform two functions: they act as formwork while concreting is done and as tension reinforcement bars. The concrete, distributes loads and protect the steel deck from fire. In this study, two composite frames with and without steel deck were modeled using the finite element software, ABAQUS and nonlinear dynamic analysis was done and their seismic behavior such as period, lateral displacement, base shear, plastic energy dissipation of the frames and crack formation procedure in concrete slab were investigated. Results showed that using steel deck in composite slab, reduced period and maximum lateral displacement of the frame but base shear and plastic energy dissipation of frames increased. Also plastic hinge formation procedure of two frames was the same.

KEYWORDS

Seismic behavior, Moment resisting steel frame, Composite beam, Steel deck

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه، Fathim@razi.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه رازی کرمانشاه، Chia64_SD@yahoo.com



در سقف‌های تیرمرکب دارای ورق فولادی عرشه، ورق در فضای ما بین تیرهای مرکب قرار گرفته و در زمان بتن ریزی نقش قالب و در زمان بهره برداری نقش آرماتورکشی را بر عهده دارد و بتن پوشاننده‌ی آن، علاوه بر مرکب نمودن تیر فولادی و ایجاد سقف مرکب، عاملی برای حفاظت از ورق در مقابل آتش سوزی و توزیع کننده‌ی بار است. دال‌های مرکب دارای ورق عرشه، به دلیل سبک بودن، منجر به کاهش قابل توجه در وزن سازه، هزینه و زمان ساخت شده و همچنین از مقاومت کافی نیز برخوردار هستند [۴-۱]. در دال‌های فاقد عرشه فولادی، باید از دو ردیف شبکه میلگرد تحتانی و فوقانی استفاده شود که تعبیه دقیق فواصل میلگردها و پوشش بتن دقت خاصی را می‌طلبد.

۲- مدل‌سازی قاب‌های مورد مطالعه

در این مطالعه، دو قاب خمشی فولادی یک طبقه ی دو دهانه دارای سقف مرکب با و بدون ورق عرشه، به کمک نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی و تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی شتاب نگاشت زلزله‌های منجیل، طیس و کوبه قرار گرفتند و عملکرد لرزه‌ای آنها با هم مقایسه شد. مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه به صورت زیر نام گذاری شدند:

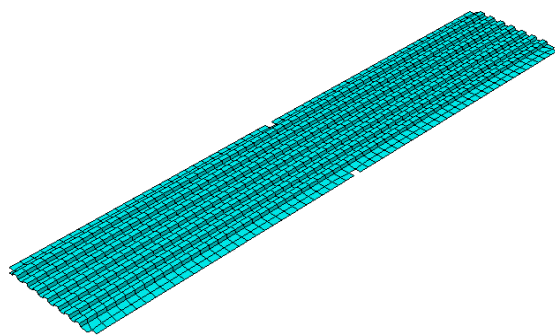
▪ قاب فولادی خمشی با دال مرکب بدون ورق

عرشه CF-WSD

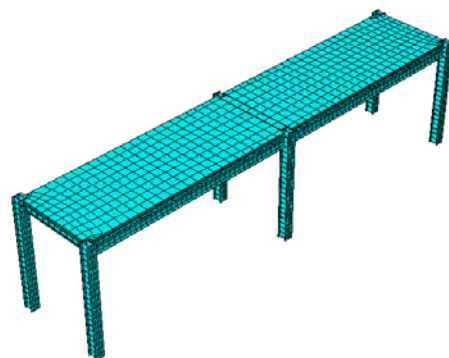
▪ قاب فولادی خمشی با دال مرکب دارای ورق

عرشه CF-SD

قاب‌های مذکور براساس ضوابط مقررات ملی ساختمان ایران تحت بارمرده از نوع Gravity، زنده 200 kg/m^2 و جانی بر اساس خاک نوع II و شتاب زمین $A=0.35g$ و در نظر گرفتن قاب خمشی فولادی ویژه با ضریب رفتار $R=10$ و ضریب اهمیت $I=1/4$ برای ساختمان‌های با اهمیت بسیار بالا طراحی شد. تیرهای طولی از نوع IPE270، تیرهای عرضی از IPE160 و ستون‌ها از IPE240 انتخاب شدند. قاب‌ها در امتداد محور طولی دارای دو دهانه به طول ۶ متر و در امتداد عرضی دارای یک دهانه به طول ۲ متر با ارتفاع طبقه ۳ متر بودند. ضخامت دال‌های سقف ۱۵۰ میلی متر در نظر گرفته شد. دال بدون عرشه فولادی دارای دو شبکه میلگرد $\Phi 8@15$ در قسمت فوقانی و تحتانی و دال دارای عرشه فولادی دارای یک شبکه میلگرد فوقانی $\Phi 8@15$ بود. بعد از طراحی اولیه، قاب‌های مورد نظر در نرم افزار ABAQUS مدل شدند (شکل (۱)). بتن تیرها و ستون‌ها با المان Shell به صورت S4R و آرماتورهای فولادی درون بتن با استفاده از المان T3D2N از نوع Truss مدل شدند [۷-۵].



ب) مدل المان محدود ورق عرشه

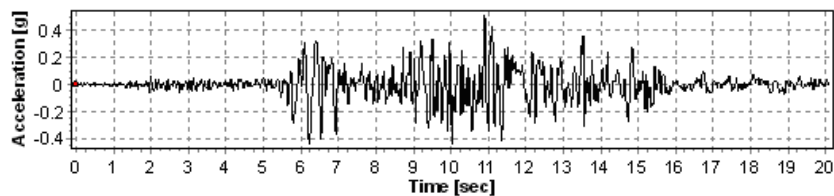


الف) مدل المان محدود قاب‌ها

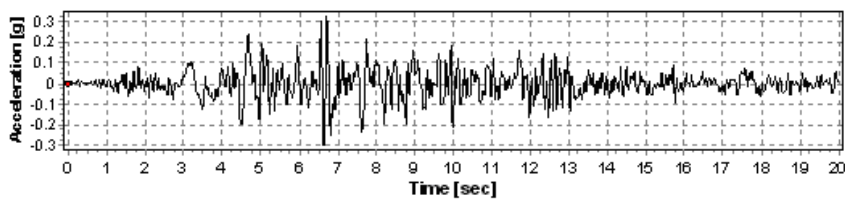
شکل (۱): مدل المان محدود در نرم افزار ABAQUS

در شکل (۲) سه شتاب نگاشت استفاده شده و طیف بازتاب آنها آورده شدند. بارهای جانبی زلزله با استفاده از تابع Amplitude به صورت شتابنگاشت به تراز پایه اعمال شدند.

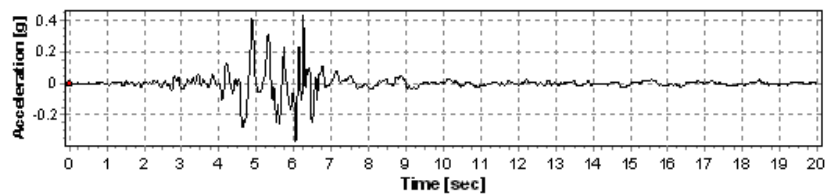
بارگذاری مدل‌ها در دو مرحله انجام شد. مرحله اول اعمال بار مرده و زنده و در مرحله دوم بار زلزله نیز اعمال شد. برای این مطالعه از شتاب نگاشت زلزله‌های منجیل، طبس و کوبه استفاده شد. شتاب نگاشت‌ها همگی در خاک نوع II انتخاب و مطابق با آیین نامه ایران همپایه شدند.



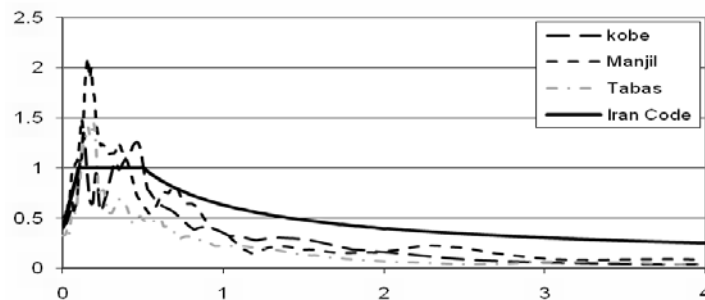
الف) منجیل



ب) طبس



ج) کوبه



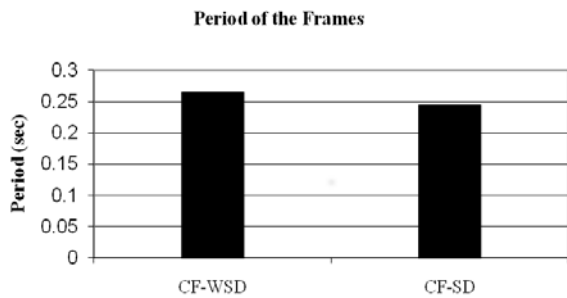
د) طیف بازتاب

شکل (۲): شتابنگاشت‌های مورد استفاده و طیف بازتاب آنها

۳-۱- زمان تناوب ارتعاش و منحنی ظرفیت قاب‌ها
شکل (۳) زمان تناوب ارتعاش قاب‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشاهده شد که استفاده از ورق عرشه در سقف مرکب، زمان تناوب ارتعاش قاب را کاهش داد.

۳- تحلیل قاب‌ها

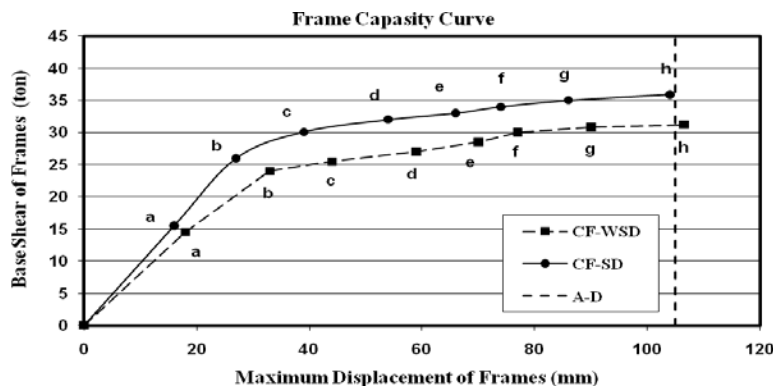
قاب‌ها تحت هر سه شتاب نگاشت زلزله همپایه شده با آیین نامه ۲۸۰۰ تحلیل شدند و در ذیل بیشینه مقدار آنها تحت هر سه شتاب نگاشت ملاک عمل قرار گرفت و به عنوان پاسخ قاب آورده شد.



شکل (۳): زمان تناوب اصلی ارتعاش قاب‌ها

به صورتی که زمان تناوب قاب CF-SD، ۸ درصد نسبت به قاب CF-WSD کاهش داشت.

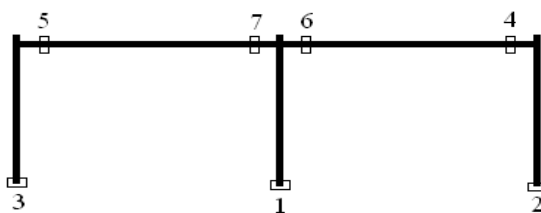
منحنی‌های ظرفیت قاب‌ها در شکل (۴) به صورت رابطه‌ی بیشینه نیروی برشی پایه و بیشینه تغییر مکان تراز سقف آورده شدند. تغییر مکان مجاز قاب‌های مورد مطالعه مطابق با آیین نامه ساختمان‌ها در برابر زلزله به مقدار ۱۰۵ mm محاسبه شد و به صورت خط A-D در شکل (۴) نشان داده شد. این نمودار بیانگر ظرفیت بالاتر قاب دارای عرشه فولادی نسبت به قاب بدون عرشه فولادی است.



Number	PGA	Acceleration
a	0.35g	Tabas
b	0.65g	Tabas
c	0.66g	Manjil
d	0.69g	Tabas
e	0.70g	Manjil
f	1.05g	Tabas
g	1.4g	Manjil
h	1.75g	Manjil

شکل (۴): مقایسه منحنی ظرفیت قاب‌های مورد مطالعه

با توجه به روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های مورد مطالعه نتیجه گرفته شد که تشکیل اولین مفصل پلاستیک و همچنین مکانیسم خرابی در قاب بدون ورق عرشه، زودتر از قاب دارای ورق عرشه ایجاد شد.



شکل (۵): توزیع مفصل پلاستیک در قاب‌های مورد مطالعه

۳-۲- مکانیسم تشکیل مفاصل پلاستیک

با اعمال شتاب نگاشت زلزله به قاب‌ها و افزایش تدریجی آن، روند تشکیل مفصل پلاستیک در اعضای آنها تا مرحله مکانیسم قاب مورد بررسی قرار گرفت. هیچ یک از اعضای قاب‌ها تا $PGA=0.75g$ شتاب نگاشت‌های مورد مطالعه وارد فاز پلاستیک نشدند. شکل (۵) محل تشکیل مفاصل پلاستیک و نحوه توزیع آنها را برای قاب‌های مذکور نشان می‌دهد. در این شکل شماره‌های ۱، ۲ و ... نشان دهنده ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک است. به گونه‌ای که شماره ۱ تا ۳ تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون و شماره ۴ تا ۷ تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر را نشان می‌دهد.

ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای قاب‌های مورد مطالعه بر حسب مبنای PGA در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳-۳- استهلاک انرژی قاب‌ها

انرژی پلاستیک مستهلک شده قاب‌های مدل‌سازی شده تحت تحلیل دینامیکی غیر خطی در شکل (۶) آورده شد.



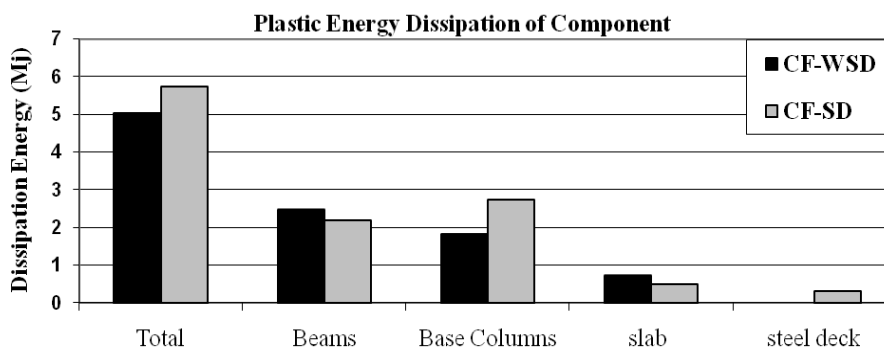
قاب‌ها در استهلاک انرژی ناشی از شتاب نگاشت بیشینه بر روی ستون مربوطه آورده شده است.

مشاهده شد که استفاده از ورق فولادی در سقف مرکب، موجب افزایش ۱۴ درصدی استهلاک انرژی غیرارتجاعی کل مدل شد. همچنین همچنین در شکل (۶) سهم اجزای

جدول (۱): روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های مورد مطالعه بر مبنای محدوده PGA

۱/۷۵g	۱/۴۰g	۱/۰۵g	۰/۷۰g	۰/۶۹g	۰/۶۶g	۰/۶۵g	۰/۳۵g	
۷	۶ (*)	۵ و ۴	۳ و ۲	-	۱	-	-	CF-WSD
۷ و ۶ (*) و ۵	۵ و ۴	۳ و ۲	۱	-	-	-	-	CF-SD

در جدول "*" بیانگر تشکیل مفصل پلاستیک در دال بتنی و "O" بیانگر تشکیل مفصل پلاستیک در عرشه فولادی می‌باشد.



شکل (۶): مقایسه میزان استهلاک انرژی

سیستم تیرها و سقف نسبت به ستون‌های قاب‌های بدون عرشه فولادی است.

۳-۴- نحوه گسترش ترک در دال‌های سقف

در شکل (۷) نحوه توزیع تنش فون میز، بیشینه تنش کششی و فشاری و تغییر شکل در دال قاب CF-WSD و CF-SD مربوط به پایان بارگذاری ثقلی مرده و زنده نشان داده شده است.

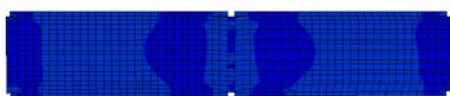
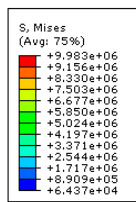
در ادامه‌ی تحلیل، شتابنگاشت‌های همپایه شده به قاب‌ها اعمال شد. در این حالت در اثر افزایش شدت شتاب نگاشت، تنش‌های اعمالی افزایش و نهایتاً منجر به ایجاد گسترش ترک در دال بتنی شد. در شکل (۸) نحوه‌ی تشکیل و گسترش ترک در دال بتنی در ۴ مرحله نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان دادند که در دال‌های بدون ورق عرشه، ترک‌ها زودتر از دال دارای ورق عرشه ایجاد شده است. در شکل (۹) شمای تقریبی خطوط تسلیم در لحظه انهدام قاب‌ها نیز نشان داده شده است.

در جدول (۲) سهم اجزای قاب از جمله تیرها، پای ستون‌ها، دال بتنی و ورق فولادی در استهلاک انرژی آمده است.

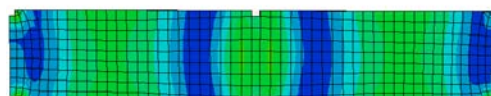
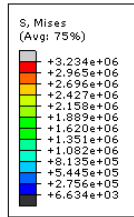
جدول (۲): مقایسه درصد سهم اجزای قاب‌ها در استهلاک انرژی

درصد استهلاک انرژی	قاب CF-WSD	قاب CF-SD
پای ستون	۳۷٪	۴۸٪
تیر	۴۸٪	۳۸٪
دال بتنی	۱۵٪	۹٪
ورق فولادی	۰	۴٪

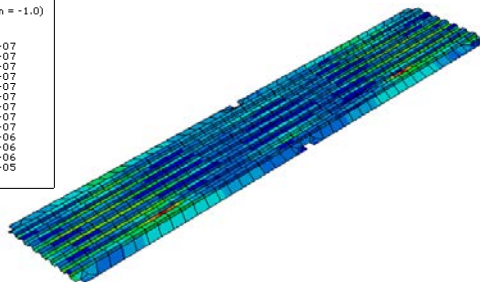
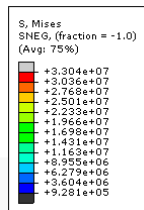
در قاب‌های دارای ورق عرشه فولادی نسبت به قاب‌های بدون ورق عرشه، این سهم در پای ستون‌ها بیشتر و در تیرها و دال‌ها کمتر است. این بیانگر جذب انرژی بهتر در



ب) دال بتنی قاب CF-SD

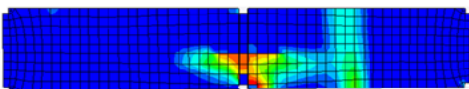
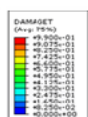


الف) دال بتنی قاب CF-WSD

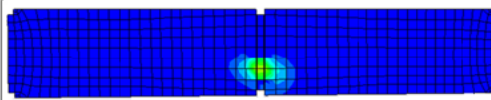
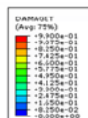


ج) توزیع تنش در ورق عرشه قاب CF-SD

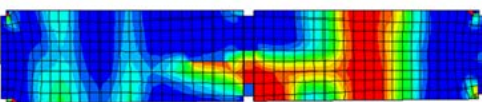
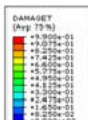
شکل (۷): نحوه توزیع تنش ناشی از بارهای ثقلی



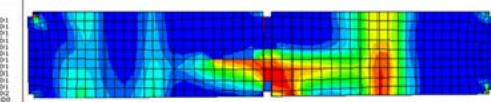
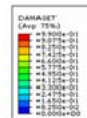
مرحله دوم



مرحله اول

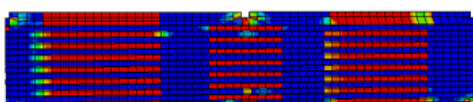
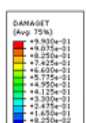


مرحله چهارم

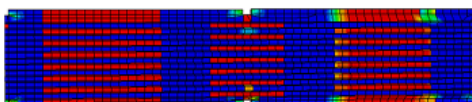
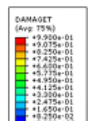


مرحله سوم

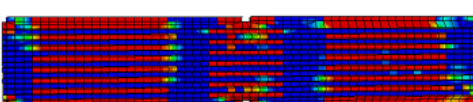
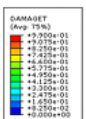
الف) قاب CF-WSD



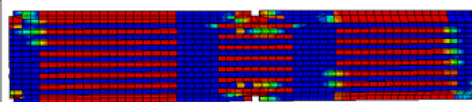
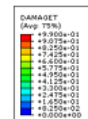
مرحله دوم



مرحله اول



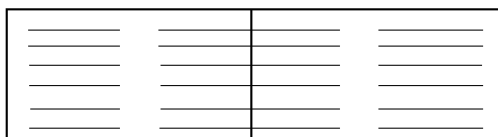
مرحله چهارم



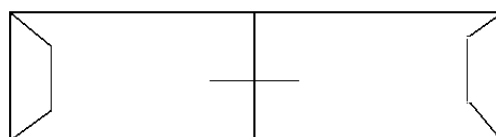
مرحله سوم

ب) قاب CF-SD

شکل (۸): روند شکل گیری ترک در دالها تحت شتاب نگاشت پیشینه



ب) دال CF-SD



الف) دال CF-WSD

شکل (۹): شمای تقریبی خطوط تسلیم دال تحت شتاب نگاشت زلزله

۴- نتیجه گیری

با مطالعه تاثیر وجود ورق فولادی عرشه بر عملکرد لرزه‌ای قاب فولادی خمشی دارای سقف مرکب نتیجه گرفته شد که استفاده از ورق فولادی در سقف تیرمرکب موجب بهبود رفتار سازه شده است. در این قاب‌ها، زمان تناوب ارتعاش قاب، بیشینه تغییرمکان جانبی قاب کاهش یافته و نیروی برش پایه و ظرفیت استهلاک انرژی قاب نسبت به قاب بدون عرشه‌ی فولادی افزایش یافته است. همچنین روند تشکیل مفاصل پلاستیک در هر دو قاب یکسان اما در قاب با ورق فولادی این مفاصل در گام زمانی دیرتری تشکیل شدند. علاوه بر این در قاب بدون ورق عرشه، ترک در دال بتنی در گام زمانی زودتری نسبت به قاب دارای ورق عرشه تشکیل شد. این در حالی است که نحوه توزیع جذب انرژی در قاب‌های بدون عرشه فولادی بیشتر در تیرها و سقف (نسبت به پای ستون) صورت می‌گیرد و بیانگر رفتار مطلوب‌تری از این قاب‌ها است.

۵- مراجع

- [1] Marimuthu, V., Seetharaman, S., Arul Jayachandran, S., Chellappan, A., Bandyopadhyay, T.K. and Dutta, D. (2007), "Experimental Studies on Composite Deck Slabs to Determine the Shear-Bond Characteristic (m-k) Values of the Embossed Profiled Sheet", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, No. 6, pp. 791-803.
- [2] Lam, D. and Qureshi, J. (2008), "Prediction of Longitudinal Shear Resistance of Composite Slabs with Profile Sheeting to Eurocode4," School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK.
- [3] Jeong, Y.-J. (2008), "Simplified Model to Predict Partial-Interactive Structural Performance of Steel-Concrete Composite Slabs," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64, No. 2, pp. 238-246.