

رفتار لرزه‌ای قاب فولادی خمشی دارای دال مجوف حبابی و استوانه‌ای تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود

مجتبی فتحی^{۱*}، داریوش اسدی‌زاد^۲

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه رازی کرمانشاه

fathim@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۸

چکیده- در این مقاله رفتار قاب‌های دارای سه نوع دال مجوف حبابی، مجوف استوانه‌ای و بتنی توپر تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دال حبابی در مقایسه با سایر دال‌ها مقاومت و سختی قاب را افزایش داده و تحت شتابنگاشت با PGA بزرگتر و تغییر مکان کوچکتری به مکانیسم می‌رسد. همچنین میزان جذب انرژی در این نوع قاب بیشترین و در قابی با دال مجوف استوانه‌ای کمترین است. در قاب با دال‌های مجوف سهم ستون‌ها در اتلاف انرژی بیشتر از تیرها ولی در قاب با دال توپر این سهم در تیرها بیشتر است. نحوه تشکیل مفصل پلاستیک در اعضا و پیشرفت خطوط تسلیم در دال‌های مجوف کاملاً با دال توپر متفاوت است. دال توپر و دال مجوف استوانه‌ای همزمان با قاب به مکانیسم می‌رسند اما در دال حبابی هنگامی که قاب فولادی به مکانیسم می‌رسد، هنوز کل دال گسیخته نشده است.

واژگان کلیدی: زلزله حوزه نزدیک، قاب فولادی، تحلیل غیرخطی دینامیکی، مدل‌سازی اجزاء محدود، دال مجوف حبابی، استوانه‌ای و توپر

۱- مقدمه

دارند. ایده کاهش وزن ساختمانها و اجرای سازه‌های سبک در تاریخ مهندسی سازه همواره مورد توجه متخصصان، پژوهشگران و مجریان در سراسر جهان بوده و اثرات اثبات شده آن بر بهبود رفتار و کاهش نیروهای وارد بر سازه محققان را به ایجاد طرح‌های نوین ترغیب نموده است. اسکات در سال ۱۹۷۳ با انجام یک آزمایش بر روی دال‌های توخالی با حفره استوانه‌ای پیش ساخته ماشینی با یک لایه بتن در جا را انجام و به این نتیجه رسید که

دال‌های بتن آرمه به خاطر مزایایی از جمله رفتار و عملکرد مناسب، شکل پذیری، سهولت در اجرا و ضخامت کم، یکی از دال‌های مرسوم و با کاربرد فراوان است. در خصوص دال‌های بتن آرمه معمولی از مدتها پیش تحقیقات و آزمایشات فراوانی به عمل آمده به طوری که همکنون در قالب آئین نامه‌ها و کتاب‌ها ضوابط طراحی آنها تدوین شده و در دسترس قرار

افزایش لایه بتن فوقانی درجا، موجب افزایش مقاومت نهایی دال می‌شود [۱]. یودا و استایت من در سال ۱۹۹۱ بر روی میزان افزایش ظرفیت‌های برشی آزمایشهای اسکات کار کردند و با مطالعه پارامترهایی نظیر نیروی پیش تنیدگی، ضخامت کلی دال و نسبت دهانه به عمق موثر به نتایجی دست یافتند [۲]. بایاسی و کیسر در سال ۲۰۰۳ روی نحوه استفاده از برشگیرها در دالهای توخالی به نتایجی رسیدند [۳]. دول و اسمیت در سال ۲۰۰۶ نیز روی کنش متقابل بتن درجا و بتن پیش ساخته در دال‌های توخالی تحقیق کردند [۴]. در سال ۲۰۰۷ آیین نامه ساختمان فنلاند بر مبنای نتایج آزمایشگاهی پاجاری، کاهش مقاومت برشی دال‌های توخالی را تایید کرده است [۵]. در این مطالعات ترک‌های طولی در زیر جان دال‌ها نزدیک تکیه گاه‌ها مشاهده شدند. بیشترین تغییر شکل برشی بر روی دال کناری تکیه گاه اعمال می‌شود [۶]. در سال ۲۰۰۱ در کشور آلمان برای دال‌های توخالی آیین نامه DIN 1045-1 تدوین شد [۷]. هگر، روژندورف و کرکنی در سال ۲۰۰۹ تحقیقات آزمایشگاهی وسیعی با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر برش عرضی دال توخالی، سختی خمشی تیر فولادی، جزئیات تکیه گاهی، قيود افقی دال‌ها و پرکردن بخشی از سوراخهای انتخاب شده دال انجام دادند [۸].

برونینگ از کشور دانمارک در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار ایجاد کف‌هایی مشابه سقف‌های حبابی را پیشنهاد داد، سپس توسط مهندسین مشاور AEC، پروفیسور نیلسن، گادمنند-هویر تحقیقات آزمایشگاهی وسیعی در زمینه عملکرد دال حبابی به عمل آمد [۹]. در سال ۱۹۹۸ آزمایشاتی بر روی دال حبابی برای چک کردن آیین نامه DIN 1045 آلمان انجام شد [۱۰]. همچنین تاسیوس، بنت زلو، گوندت و سوشوسن از سال ۱۹۹۷ آزمایشات متعددی بر روی این گونه سقف‌ها انجام داده که به بررسی مواردی

مانند مکانیزم انتقال بار، مقاومت و رفتار خمشی، مقاومت برشی و برش پانچ، مقاومت در برابر آتش سوزی، خزش، هدایت صوتی و گرمایی این گونه سقف‌ها در مقایسه با دال توپر می‌پردازد. لازم به ذکر است که این آزمایشات در دانشگاه‌های Technical University in Eindhoven و Technical University of Denmark در دانمارک و Technical University of Darmstadt در آلمان و Technical University in Delft در هلند و چندین موسسه علمی پژوهشی دیگر نیز انجام شده است [۹]، [۱۱]. در دال‌های با دهانه بزرگ به منظور کنترل خیز در مقابل بارهای وارده و وزن خود، باید صلیب دال با افزایش ضخامت تامین شود که این امر موجب افزایش وزن کلی سازه و غیر اقتصادی بودن طرح می‌شود. لذا عملاً دال بتن آرمه توپر بدون سبک سازی در دهانه‌های بزرگ کاربرد ندارد [۱۲]. در حالیکه دال‌های مجوف به دلیل سبکی، صلیب بالا و خیز کمتر در دهانه‌های بزرگ قابل استفاده هستند [۱۳]. با توجه به کاربرد روز افزون دال‌های مجوف به ویژه دال حبابی^۱ و دال مجوف استوانه‌ای^۲ مطابق شکل ۱، ضرورت دارد رفتار و عملکرد این گونه دال‌ها مخصوصاً در ناحیه غیر خطی و در اندرکنش با قاب، به طور کامل شناخته شوند، عملکرد دال‌های مجوف استوانه‌ای به صورت یکطرفه بوده، در حالی که عملکرد و ماهیت انتقال بار دال‌های مجوف حبابی دو طرفه است. در دال مجوف حبابی از تعبیه توپ‌های مخصوص پلاستیکی در دال برای سبک سازی و ایجاد حفره استفاده می‌شود.

اغلب پژوهش‌های قبلی آزمایشگاهی بوده و یا به صورت تحلیلی فقط دالها را بدون قاب مورد بررسی قرار داده‌اند در حالیکه در مطالعه حاضر، با مدل سازی المان محدود و نرم افزار Abaqus، دال در درون قاب سه بعدی و بر مبنای

1- Bubble Deck
2- Hollow Core

می‌دهد. این قاب مطابق مقررات ملی ساختمان ایران از فولاد ST37 و بتن C30 در خاک تپ II و در محل با خطر نسبی زیاد با کاربری مسکونی در سه حالت طراحی شده است:

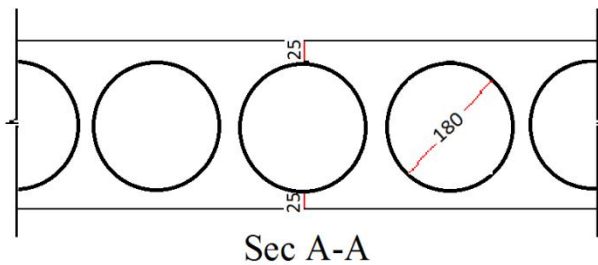
الف- قاب فولادی با دال دوطرفه مجوف با حفره‌های کروی معروف به دال مجوف حبابی (BDSF) به ضخامت ۲۳۰ میلیمتر ([۱۳]، [۱۸]) که لبه‌های دال به جان تیرها متصل است. مشخصات قاب: ستون‌ها با مقطع (Box180*180*10)، تیرهای طولی و عرضی از نوع IPE220.

ب- قاب فولادی با دال یک طرفه مجوف با حفره‌های استوانه‌ای (HCSF) به ضخامت ۲۵۰ میلیمتر ([۱۴]، [۱۸]) که لبه‌های دال در دو طرف به جان تیرها تکیه دارد. ستون‌ها با مقطع (Box180*180*10)، تیرهای طولی و عرضی از نوع IPE240.

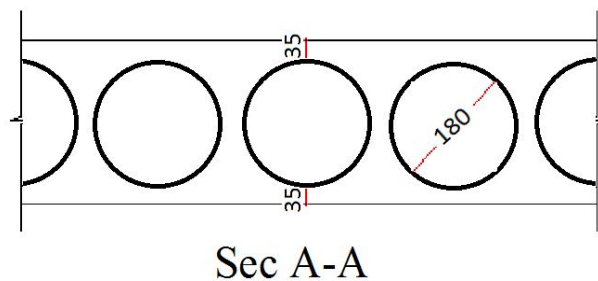
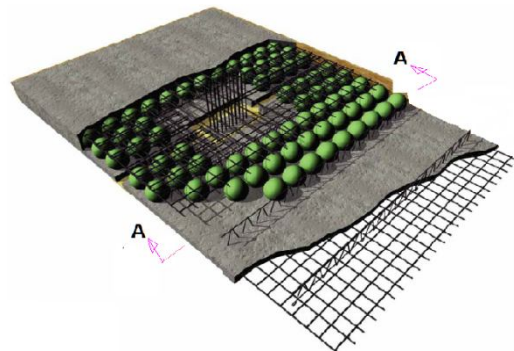
استهلاک انرژی اجزاء سیستم تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه گردیده است. به عبارتی در مطالعات قبلی دال در خارج از قاب بررسی شده و یا قاب فولادی بدون مدلسازی دال و بدون اثر زلزله مطالعه شده است، اما در تحقیق حاضر برای اولین بار، رفتار متقابل دال مجوف با قاب فولادی با مدلسازی المان محدود بررسی می‌شود تحقیقات آزمایشگاهی که اثر توأم اینگونه دالها را در قاب لحاظ کرده باشد، یافت نشد لیکن صحت سنجی مدلسازی صرفاً توسط دال تنها، امکانپذیر بود که قبل از شروع تحلیل‌های کلی، انجام و با مراجع ۹ و ۱۳ و ۱۸ مقایسه و تطابق بسیار خوبی حاصل شد.

۲- مدلسازی نمونه‌های مورد مطالعه

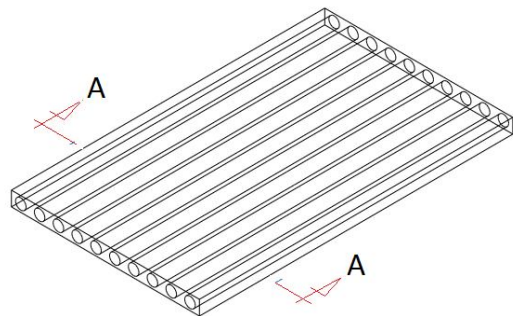
شکل ۲ دال‌های مورد مطالعه در قاب خمشی فولادی یک طبقه سه بعدی دارای دو دهانه ۵٪*۵ متر با شش ستون ۳۰*۳۰ متری و تیرهای طولی و عرضی با اتصال صلب را نشان



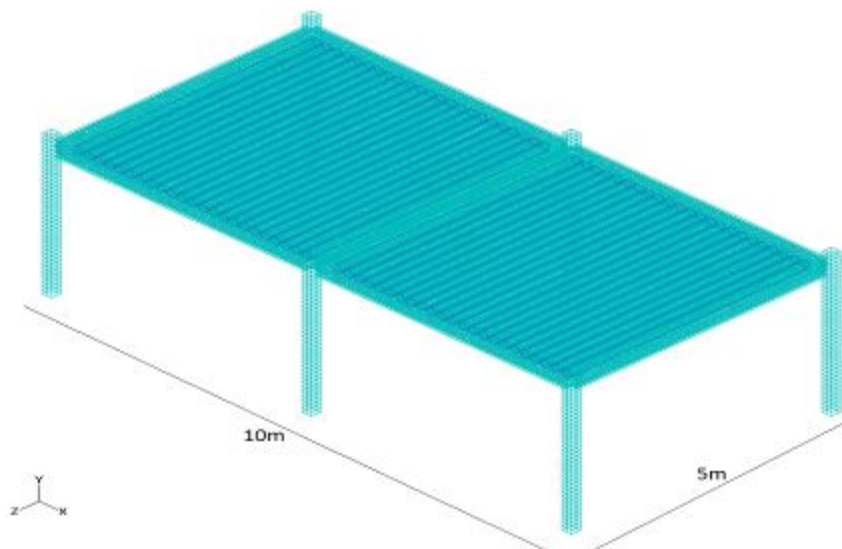
الف) دال مجوف حبابی



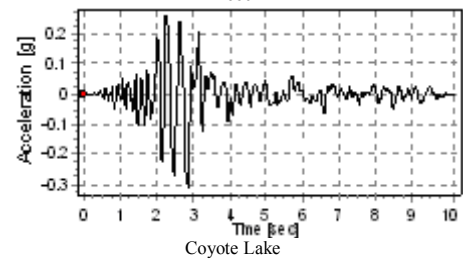
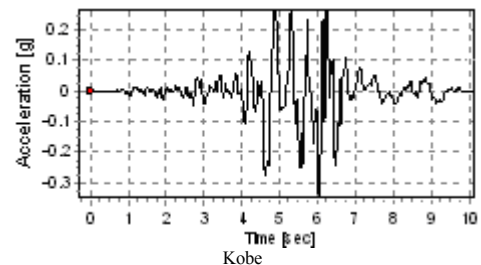
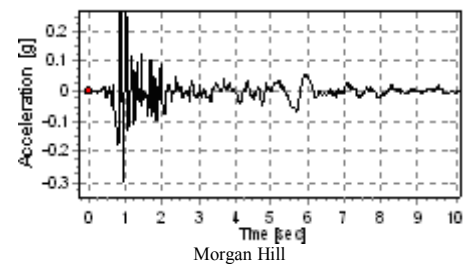
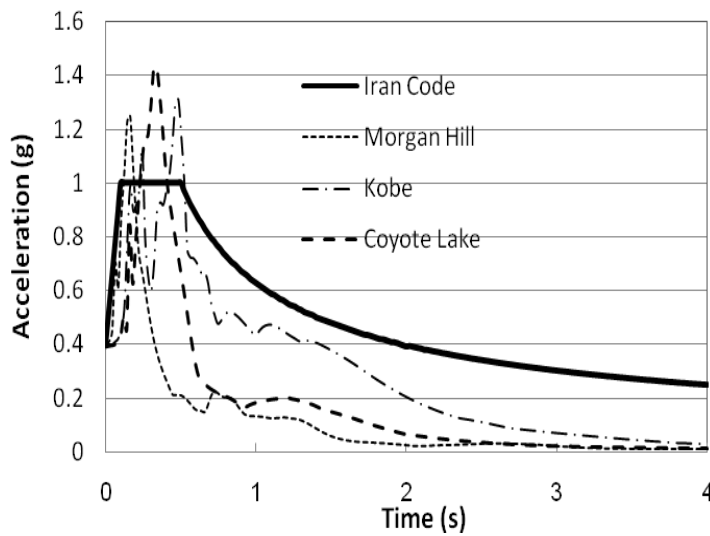
ب) دال مجوف استوانه‌ای



شکل (۱) نمای کلی دال‌های مجوف



شکل (۲) شمای کلی، مش بندی و ابعاد قاب و دال



شکل (۳) شتابنگاشت‌های مورد استفاده و مقایسه طیف آنها با طیف استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ ایران

ج - قاب فولادی با دال بتن مسلح توپر (RCSF) به ضخامت ۱۴۰ میلی‌متر (بر مبنای آیین نامه بتن ایران (آبا))

که لبه‌های دال در چهار طرف به جان تیرها متصل است. ستون‌ها با مقطع (Box180*180*10)، تیرهای طولی و

عرضی از نوع IPE160.

۳- ارزیابی نتایج تحلیل‌ها

تمامی نمونه‌ها تحت هر سه شتابنگاشت زلزله (همپایه شده با آیین نامه ۲۸۰۰) تحلیل شده اند و بیشینه مقدار آنها تحت هر سه شتابنگاشت ملاک عمل قرار گرفته و به عنوان پاسخ قاب آورده شده است.

۳-۱- زمان تناوب و منحنی ظرفیت قاب

مقایسه زمان ارتعاش برای نمونه‌های مورد مطالعه مطابق شکل ۴ است. بر این اساس، دوره تناوب اصلی قاب BDSF و قاب HCSF نسبت به قاب RCSF به ترتیب ۱۱٪ و ۹٪ کمتر است، لذا دالهای مجوف اندکی سبب کاهش زمان تناوب قاب شده‌اند. منحنی‌های ظرفیت قاب در شکل ۵ به صورت رابطه بیشینه نیروی برشی پایه برحسب بیشینه تغییر مکان تراز سقف بام آورده شده‌اند. براساس آیین نامه ۲۸۰۰ ایران بیشینه تغییر مکان جانبی مجاز قاب در زلزله سطح بهره برداری (0.025h) و بیشینه تغییر مکان جانبی غیرخطی قاب $0.7R(\Delta w)$ تعیین شده است که در شکل خطوط آن به ترتیب با نام‌های Δa و Δu نشان داده شده است (h ارتفاع R ضریب رفتار ساختمان). سختی اولیه قاب BDSF و HCSF بیشتر از قاب RCSF است. بیشینه جابجایی افقی تراز سقف قاب BDSF و HCSF در مرحله خرابی قاب نسبت به قاب RCSF به ترتیب ۱۷٪ و ۲۳٪ کمتر است. بیشینه برش پایه تحمل شده قاب BDSF و HCSF در مرحله خرابی قاب نسبت به قاب RCSF به ترتیب ۱۱٪ بیشتر و ۵٪ کمتر است. این نتایج نشان می‌دهد که قاب با دال مجوف بخصوص دال مجوف حبایی به خاطر سختی و صلیبیت اندکی بالاتر نسبت به قاب با دال توپر دارای برش پایه نسبتاً بیشتری هستند اما تحت تغییر مکان کمتری نسبت به قاب با دال توپر به مکانیسم می‌رسند و سبب کاهش اندکی در شکل‌پذیری قاب می‌شوند، این در حالیست که ظرفیت جذب انرژی قاب با دال مجوف حبایی بهتر از قاب

برای مطالعه و بررسی رفتار مدل‌های مورد نظر از نرم افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. در مدل سازی سعی شده که مدل ساخته شده از نظر هندسی و سایر مشخصات کاملاً مشابه با نمونه اصلی باشد. برای مدل سازی بتن و اعضای ستون‌ها و تیرهای فولادی از المان C3D8R نوع Hex استفاده شده، اما بتن در نمونه (BDSF) و نمونه (HCSF) به دلیل پیچیدگی مدل (وجود استوانه و کره‌های توخالی در بتن) و عدم امکان استفاده از المان نوع Hex، از المان C3D4 نوع Tet (المان چهار وجهی) استفاده شده است. برای میلگردها از المان T3D2 استفاده شده است. کلیه اتصالات فولادی از نوع Tie است، برای کاهش احتمال خطای محاسباتی، مدل‌سازی دال نیز بدون فرض‌های ساده کننده انجام شده است، به عنوان مثال میلگردها را در موقعیت واقعی و از گزینه نوع Truss که عملکرد متقابل آنرا با بتن مدل می‌کند استفاده شده است و حفره‌های توخالی نیز در مدل part با دستور cut به صورت نیم کره یا نیم استوانه ایجاد شده و سپس دو قسمت در مدل Assembly با استفاده از دستور Merge به هم پیوند داده شده اند.

در تحلیل نرم افزاری مدل‌ها، وزن مرده و زنده سقف با توجه به عملکرد یک‌طرفه یا دو طرفه دالها بر روی تیرهای کناری به صورت بار گسترده یکنواخت در Step1 اعمال شده است. بار جانبی با استفاده از گزینه Amplitude به صورت شتابنگاشت زلزله به تراز پایه وارد شده است [۱۵] و [۱۶].

شتابنگاشت‌های مورد مطالعه (زلزله‌های حوزه نزدیک) و طیف بازتاب آنها در شکل ۳ آورده شده اند. این شتابنگاشت‌ها با توجه به طیف بازتاب شتابنگاشت‌ها، و همزمانی تقریبی زمان تناوب غالب قاب و شتابنگاشت‌های مورد مطالعه انتخاب شدند.

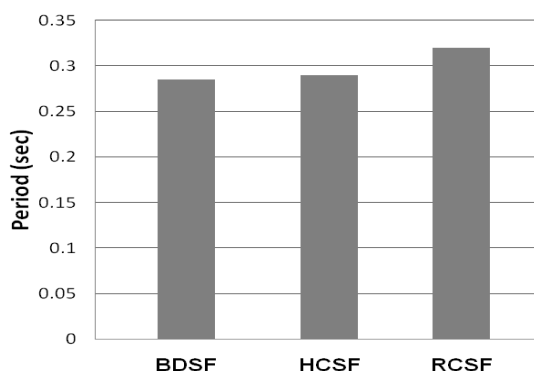
با دال مجوف استوانه‌ای است.

غیر الاستیک، امکان مقایسه روند تشکیل مفاصل پلاستیک فراهم شود، این روند تا مکانیسم قاب ادامه داده می‌شود. شکل ۶ نحوه توزیع مفاصل پلاستیک را برای قاب RCSF، BDSF و HCSF نشان می‌دهد. در این شکل شماره‌های روی قاب، ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک را نشان می‌دهند.

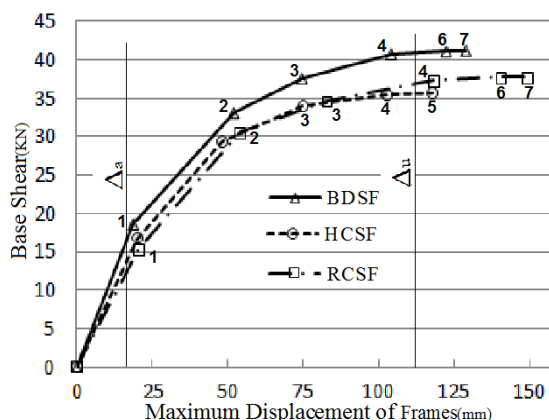
فرایند تحلیل با PGA کم شروع و شتابنگاشت‌ها به تدریج افزایش یافتند تا عملکرد هر مرحله با دقت به دست آید. به عنوان مثال در جدول ۱ برای تشخیص روند تشکیل مفاصل پلاستیک گام‌های 0.05g نیز انتخاب شدند و در برخی مرحله‌ها گام 0.3g، 0.35g و یا کمتر بر حسب نیاز انتخاب شده است تا دقت هر مرحله بالا باشد.

بر اساس نتایج تحلیل، اولین مفصل پلاستیک در پای ستون میانی و سپس در پای ستون‌های کناری و نهایتاً در انتهای تیرها و در دالهای مجوف در انتهای فوقانی ستون میانی تشکیل می‌شود تا قاب مکانیسم شود. مکانیسم پلاستیک در قاب‌های مورد مطالعه به یکی از دو صورت زیر تعریف می‌شود: الف- تشکیل مفصل در پای ستون‌ها و انتهای تیرها. ب- مفصل در ابتدا و انتهای ستون‌ها، که در نمونه‌های مورد مطالعه حالت الف حاکم بود. روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب مجوف BDSF و HCSF شبیه به یکدیگر است با این تفاوت که تشکیل مفاصل ۶ تا ۸ در قاب BDSF با تاخیر بیشتری صورت می‌گیرد. جدول ۱ روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب مورد مطالعه بر مبنای محدوده PGA را نشان می‌دهد.

مطابق این جدول، تشکیل اولین مفصل پلاستیک در قاب با دال توخالی BDSF و HCSF زودتر از دال توپر RCSF ایجاد می‌شود اما مکانیسم خرابی در قاب با دال مجوف استوانه‌ای در شتابنگاشت با PGA پایین‌تری رخ می‌دهد و این به خاطر عملکرد یکطرفه دال‌ها و ضعیفتر بودن دالهای این قاب است.



شکل (۴) مقایسه زمان تناوب نمونه‌های مورد مطالعه

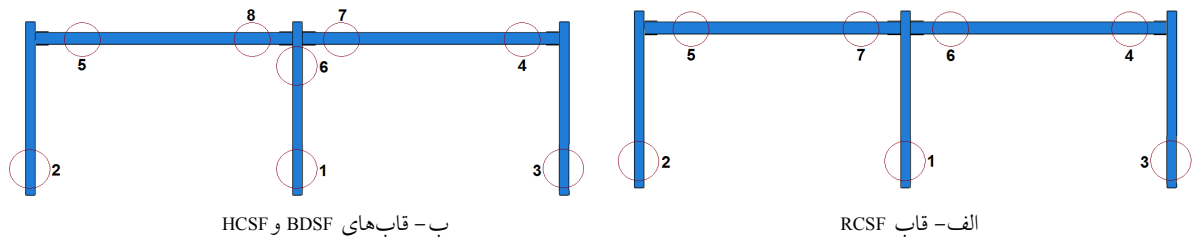


No	1	2	3	4	5	6	7
PGA(g)	0.35	0.70	1.05	1.40	1.70	1.75	1.85

شکل (۵) مقایسه منحنی ظرفیت نمونه‌های مورد مطالعه

۳-۲- مکانیسم تشکیل مفاصل پلاستیک

برای بررسی روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های مورد مطالعه، برای هر مقدار PGA سه شتابنگاشت زلزله‌های حوزه نزدیک اعمال شده و بحرانی‌ترین حالت شتابنگاشت، ملاک قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده هیچ یک از اعضای قاب در محدوده PGA=0.35g شتابنگاشت‌های مورد مطالعه وارد فاز پلاستیک نشده اند، به عبارتی دیگر همه آن‌ها با این سطح از زلزله در مرحله ارتجاعی عمل می‌کنند، لذا در ادامه مطالعه، قاب‌ها تحت شتاب‌های با PGA بزرگتر تحلیل، تا پس از وارد شدن به فاز



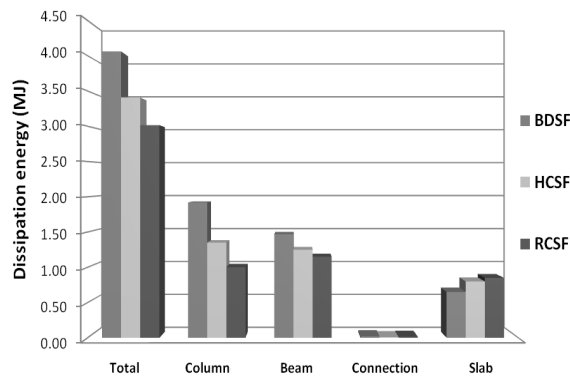
شکل (۶) ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک نمونه‌های مورد مطالعه

جدول (۱) روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب مورد مطالعه بر حسب شدت PGA

Frame	PGA	0.55g	0.6g	0.65g	0.75g	1.05g	1.4g	1.6g	1.7g	1.75g	1.85g
Reinforced slab + Steel frame (RCSF)		-	-	-	۱	-	۲و۳	*	-	۴و۵	** ۶و۷
Bubble deck + Steel frame (BDSF)		-	-	۱	-	۲و۳	۴و۵	*	۶	-	۷و۸
Hollow core slab + Steel frame (HCSF)		-	۱	-	-	۲و۳	** ۴و۵	۶	** ۷و۸	-	-

* شروع تسلیم دال ** گسیختگی دال

است. میزان استهلاک انرژی قاب BDSF و HCSF نسبت به قاب RCSF به ترتیب حدود ۳۴٪ و ۱۳٪ بیشتر است.



شکل (۷) مقایسه بیشینه میزان استهلاک انرژی اجزای نمونه‌های مورد مطالعه (زلزله Coyote Lake)

جدول (۲) مقایسه درصد سهم اجزای قاب‌های مورد مطالعه در

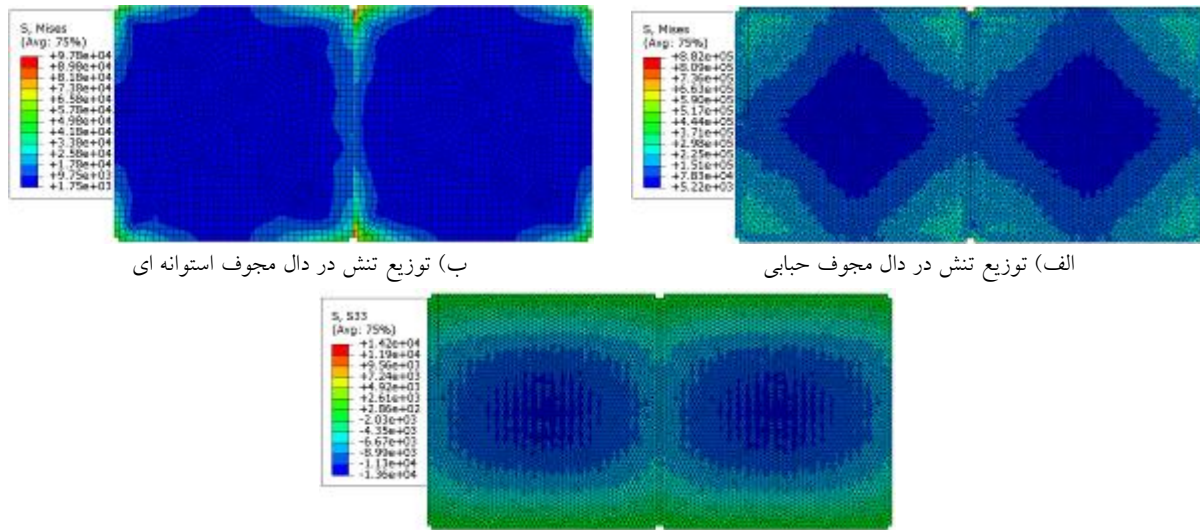
استهلاک انرژی

نوع قاب / اجزاء	قاب + دال مجوف حبیبی BDSF	قاب + دال مجوف استوانه‌ای HCSF	قاب + دال توپر RCSF
ستون‌ها	٪۴۷.۳	٪۳۳.۲	٪۳۹.۶
تیرها	٪۳۶.۲	٪۳۸.۱	٪۳۶.۷
اتصالات	٪۰.۵	٪۰.۵	٪۰.۳
دال‌ها	٪۱۶.۰	٪۲۸.۲	٪۲۳.۴

در حالیکه مکانیسم خرابی دال در قاب با دال مجوف حبیبی دیرتر از سایر نمونه‌ها رخ می‌دهد و به گونه‌ای است که بعد از خرابی قاب، هنوز دال به مکانیسم نرسیده است.

۳-۳- استهلاک انرژی

در نمودار شکل ۷ مقایسه انرژی مستهلاک شده توسط اجزای قاب در ناحیه پلاستیک تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی شتابنگاشت‌های مورد مطالعه نشان داده شده است، بر اساس نتایج بدست آمده مقدار انرژی مستهلاک شده کل قاب، در قاب دارای دال مجوف حبیبی بیشتر از سایر قاب‌ها و قاب با دال توپر کمترین مقدار است، در قاب BDSF و HCSF افزایش سختی تیرها و اتصالات در اثر ترکیب با بتن، موجب تشکیل مفصل پلاستیک در ستون و افزایش سهم جذب انرژی در ستون‌ها شده است [۱۷]. صلبیت دال‌ها به دلیل کنش متقابل دال و تیر بر میزان سهم استهلاک انرژی تیرها و ستون‌ها اثر گذار بوده لذا دال‌های توخالی به دلیل ارتفاع تماس بیشتر با تیر و صلبیت بالاتر موجب کاهش سهم استهلاک انرژی تیرها شده اند در حالی که در قاب با دال توپر (RCSF) به دلیل ضخامت کمتر و انعطاف بیشتر سهم استهلاک انرژی تیرها بیشتر



ب) توزیع تنش در دال مجوف استوانه‌ای

الف) توزیع تنش در دال مجوف حبابی

ج) توزیع تنش در دال بتنی توپر

شکل (۸) نحوه توزیع تنش ناشی از بارهای ثقلی

حاشیه چشمه‌های دال، به صورت ناحیه مستطیلی کم عرض است ولی در دال مجوف حبابی گسترش تنش به صورت سطوح پیش رونده مثلثی به سمت مرکز دال است. در دال مجوف استوانه‌ای به خاطر ماهیت یک طرفه بودن دال، از ابتدا تنش در مرکز دال بیشینه است و تنش در امتداد تکیه گاه‌های دال (تیرهای حمال) به حداقل می‌رسد.

پس از وارد شدن بار ثقلی در ادامه تحلیل، شتابنگاشت‌های همپایه شده زلزله حوزه نزدیک به قاب اعمال شده است. در این حالت در هر دو دال مجوف حبابی و دال توپر با فرایندی مشابه، تنش بیشینه در گوشه‌ها تشکیل شده و به تدریج با زاویه حدود ۴۵ درجه به سمت مرکز دال توسعه پیدا می‌کند و در اثر افزایش کرنش‌ها، ترک در بتن ایجاد و خطوط تسلیم دال شکل می‌گیرد. در دال مجوف استوانه‌ای وضعیت متفاوت است در این دال همانند سایر دال‌های یک طرفه نیروهای ناشی از بار زلزله وارد بر قاب به دال منتقل شده و تنش‌های به وجود آمده از بارهای ثقلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که شکل متقارن توزیع تنش به هم خورده و

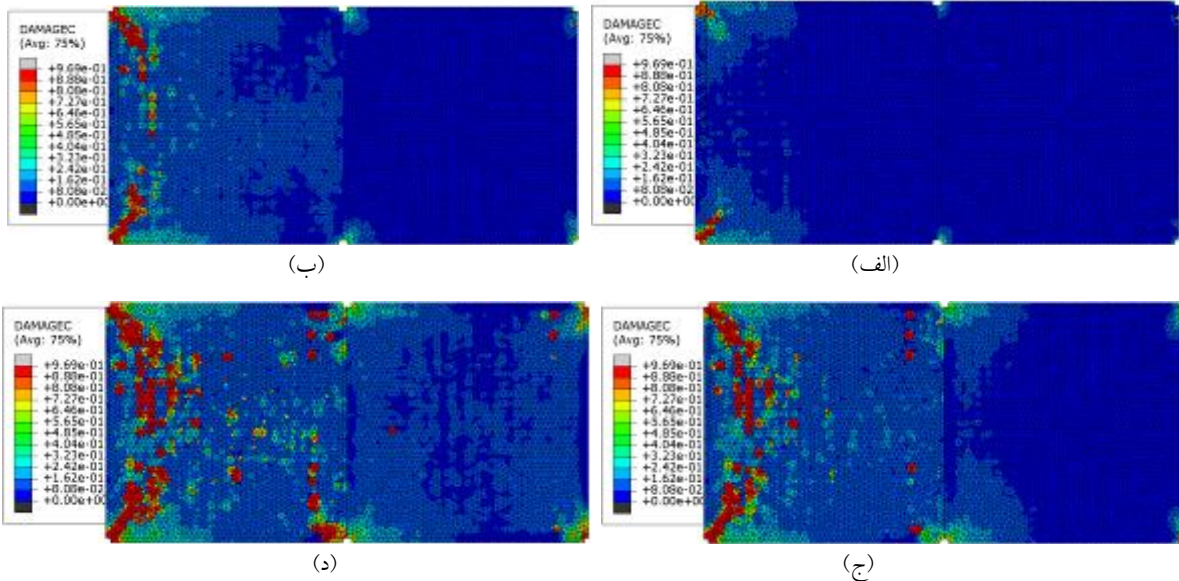
سهم اجزای قاب در استهلاک انرژی در جدول ۲ آورده شده است. سهم استهلاک اتصالات در کلیه نمونه‌ها ناچیز و نزدیک به صفر است، در قاب RCSF سهم استهلاک انرژی در تیرها بیشتر از ستون‌ها است در حالی که در قاب BDSF و HCSF این سهم در ستون‌ها بیشتر از تیرها است. سهم دال مجوف حبابی در استهلاک انرژی نسبت به سایر دال‌ها کمتر است و این به خاطر عدم گسیختگی کامل آن است.

۳-۴- مقایسه انتقال نیرو، توزیع تنش و تسلیم دال

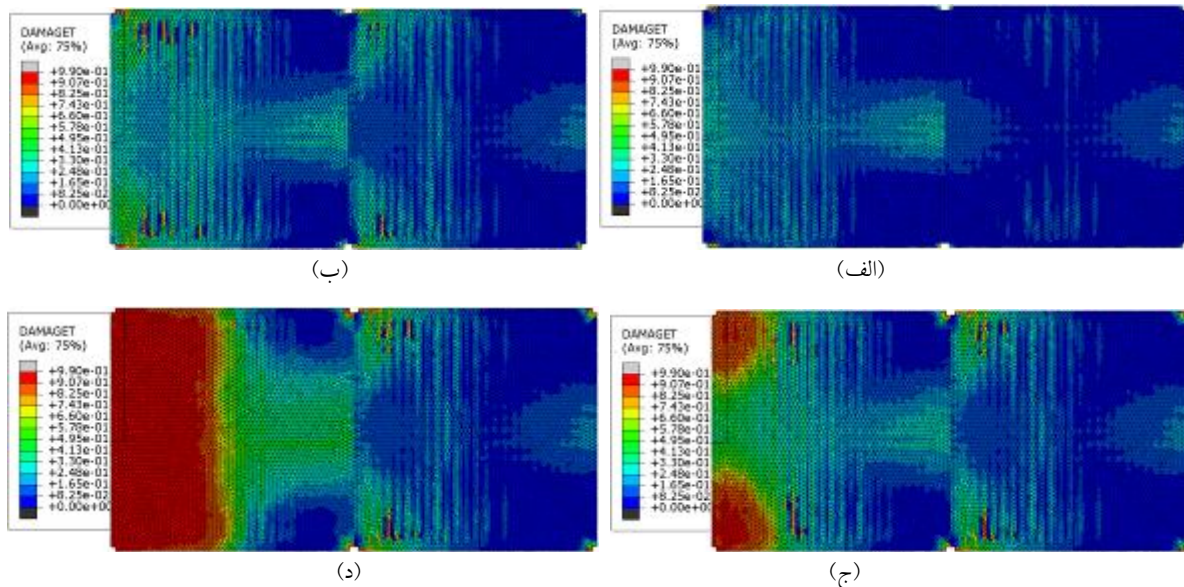
در شکل ۸ نحوه توزیع تنش اصلی در دال مجوف حبابی، دال مجوف استوانه‌ای و دال توپر، واقع در قاب فولادی در پایان بارگذاری ثقلی مرده و زنده آورده شده است. توزیع تنش در دال‌های BDSF و RCSF به صورت متقارن مرکزی و در دال HCSF به خاطر عملکرد یک طرفه دال به صورت متقارن محوری است. در دال توپر و دال مجوف حبابی، بیشینه تنش کششی ابتدا در المان‌های گوشه‌های دال شکل می‌گیرد و سپس به المان‌های مرکزی توسعه می‌یابد با این تفاوت که گسترش تنش در دال توپر، به موازات تیرهای

۱۲ شمای تقریبی خطوط تسلیم دال‌ها را در لحظه انهدام قاب نشان می‌دهد. در این شکل‌ها $F_{p_{max}}$ و $F_{t_{max}}$ بیشینه تنش کششی و فشاری و δ_{max} بیشینه خیز دال است.

افزایش نیروی ناشی از بار جانبی موجب ایجاد ترک‌های موازی و پراکنده در سطح دال شده و با افزایش شتاب، مسیر پیشرفت خطوط تسلیم به موازات حفره‌های استوانه‌ای است. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ روند توسعه خسارت و ایجاد ترک در سقف‌ها را نشان می‌دهد. شکل

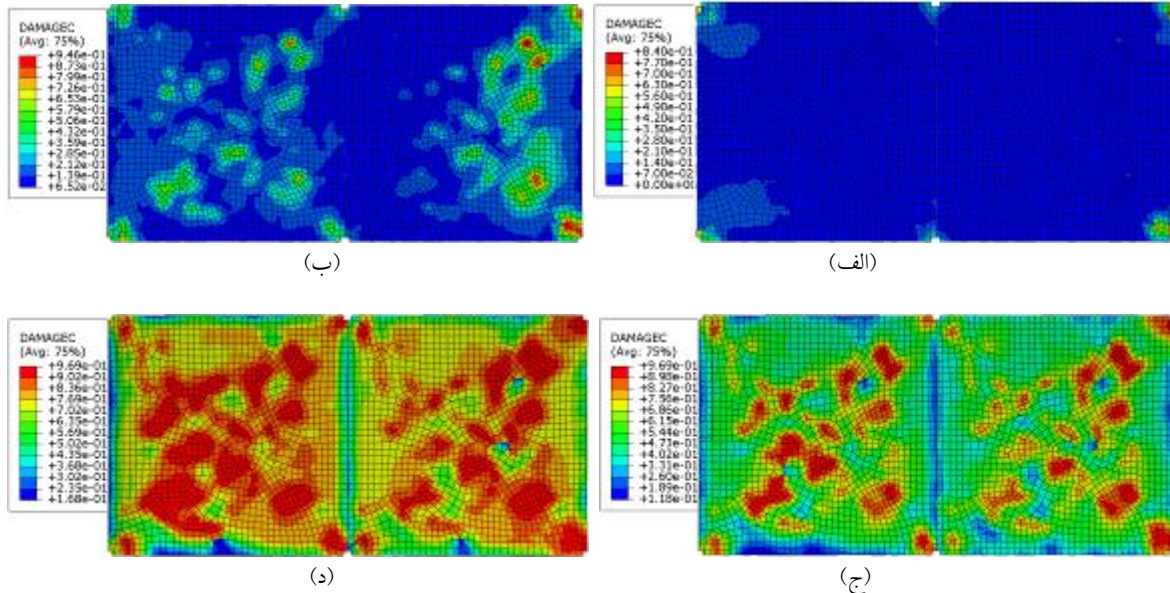


شکل (۹) روند پیشرفت کرنش و شکل‌گیری ترک در دال مجوف حبابی تحت شتابنگاشت بیشینه (زلزله Coyote Lake و $PGA=1.85g$) (بیشینه خیز دال ۱۱ میلی‌متر)



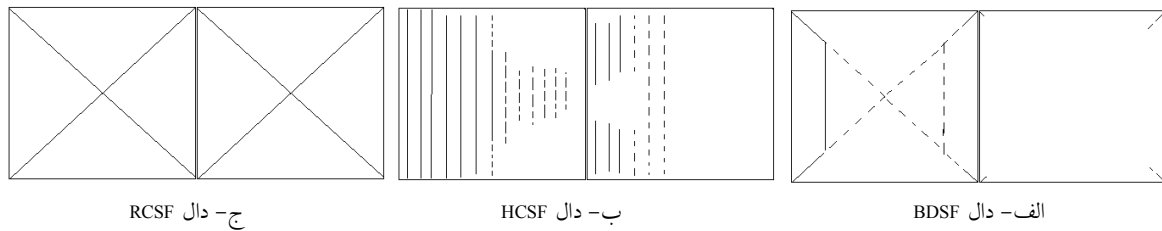
شکل (۱۰) روند پیشرفت کرنش و شکل‌گیری ترک در دال مجوف استوانه‌ای تحت شتابنگاشت بیشینه (زلزله Coyote Lake و $PGA=1.70g$)

(بیشینه خیز دال ۲۳ میلی‌متر)



شکل (۱۱) روند پیشرفت کرنش و شکل گیری ترک در دال توپر تحت شتابناگشت بیشینه (زلزله کوبه و $PGA=1.85g$)

(بیشینه خیز دال ۵۶ میلی‌متر)



شکل (۱۲) شمای تقریبی خطوط تسلیم در لحظه انهدام قاب

۴- نتیجه گیری

BDSF و RCSF روند توسعه خطوط تسلیم تدریجی است ولی در دال HCSF، گسیختگی ناگهانی مشاهده می‌شود. میزان جذب و اتلاف انرژی در قاب BDSF از سایر نمونه‌ها بیشتر است. در همه تحلیل‌ها سهم اتصالات در اتلاف انرژی ناچیز است و آن به دلیل عدم تسلیم اتصالات است. سهم اتلاف انرژی غیر ارتجاعی ستون‌ها و تیرها در قاب متفاوت است. در قاب RCSF سهم تیرها در اتلاف انرژی بیشتر از ستون‌ها است ولی در سایر نمونه‌ها سهم ستون بیشتر از تیر است. سهم دال مجوف استوانه‌ای در استهلاك انرژی سازه نسبت به سایر دال‌ها بیشتر و سهم دال مجوف

برای بررسی رفتار دقیق قاب‌ها و در نظر گرفتن اثرات دال‌ها برای ملحوظ کردن کنش متقابل دال و قاب و تغییرات قابل ملاحظه سختی و صلبیت اعضا و اتصالات، لازم است دال‌ها را به عنوان یکی از اعضای اصلی سازه در محاسبات لحاظ کرد. بر اساس نتایج این تحقیق دال مجوف حبابی BDSF تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از سایر دال‌های مورد مطالعه سختی، صلبیت و برش پایه قاب را افزایش می‌دهد. قاب BDSF و HCSF نسبت به قاب RCSF شکل‌پذیری و دوره تناوب کمتری دارند. در قاب

- [7] Normenausschuss Bauwesen im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1045-1. Tragwerke aus Beton. Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion; 2001
- [8] J.Hegger , T. Roggerndorf, N.Kerkeni, shear capacity of prestressed hollow core slabs in slim floor constructions. Engineering Structures, 2009
- [9] sergiu calin , RoxanaGintu and Gabriel das calu. Summary of tests and studies done abroad on the Bubble edeck system, Universitatea Tehnica Gheorghe Asachi din Iasi, 2009
- [10] DIN 1045. Beton und Stahlbeton. 1988
- [11] G. mundur, B. rnsen, Bubble Deck Two-Way Hollow Deck. Engineering Structures, September 2003
- [12] P. Irawan, Three dimensional analysis of reinforced concrete structures, Ph.D. dissertation, The University of Tokyo, Japan, 1995
- [13] T. Gudmand Hoyer, Note on the moment capacity in a Bubble deck joint, Report BYG-DTUR-074 -2003-ISSN 1601-2917-ISBN 87-7877-137-4. Univ. of Denmark, 2003
- [14] J. Hegger, T. Roggerndorf, N. Kerkeni, shear capacity of pre stressed hollow core slabs in slim floor constructions, Engineering Structures, 2009
- [15] ABAQUS Version 6.9-4 Documentation, 2011.
- [16] D. Hibbit, Karlsson & Sorenson, theory manual abaqus, version 6.5.1., 2005.
- [17] A. Haldar, A. Reyes-Salazar, Dissipation of energy in steel frames under dynamic loading, Dept of Civil Engineering, University of Arizona, Tucson, USA, 2007

[۱۸] مجتبی فتیحی، داریوش اسدی زاد "مطالعه و بررسی

رفتار خمشی و برش پانچینگ دال‌های بتنی توخالی و

مقایسه با دال توپر" ششمین کنگره ملی مهندسی

عمران، اردیبهشت ۱۳۹۰، دانشگاه سمنان، سمنان،

ایران

حبابی کمتر از سایر دال‌ها است.

روند تشکیل مفاصل در قاب BDSF شبیه به قاب

HCSF است با این تفاوت که تشکیل مفصل در انتهای

فوقانی ستون میانی و دو انتهای میانی تیرها (محدوده انهدام

سازه) در قاب BDSF با تاخیر بیشتری صورت می‌گیرد در

واقع تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب اخیر به دلیل وجود

سطح بتن زیادتر و افزایش سختی نیازمند نیروی بیشتری

است. در تمامی نمونه‌ها ابتدا مفصل پلاستیک در قاب

تشکیل شده سپس با افزایش تغییر شکل‌ها خطوط تسلیم

در ناحیه کششی دال‌ها به وجود می‌آید. در نمونه‌های HCSF

و RCSF مکانیسم خرابی دال همزمان با قاب فولادی ایجاد

شده ولی در نمونه BDSF، مکانیسم دال همزمان با مکانیسم

قاب فولادی ایجاد نمی‌شود و علی‌رغم ایجاد خطوط تسلیم

در نقاطی از دال، دال گسیخته نمی‌شود.

۵- منابع

- [1] Scott NL., Performance of precast prestressed hollow core slab with composite concrete topping, PCI J ,1973
- [2] Ueda T., B.Stitmannathum, Shear strength of precast prestressed hollow core slabs with concrete topping. ACI Struct J , 1991
- [3] Bayasi Z, Kaiser H. Flexural behavior of composite concrete slabs using carbon fibre laminate decks. ACI Mater J, 2003
- [4] Dowell RK, Smith JW. Structural tests of precast, prestressed concrete deck panels for California freeway bridges. PCI J.2006
- [5] Code Card No 18: Design of hollow core slabs supported on beams. English edition. Update; 2007
- [6] Pajari M. Shear resistance of PHC slabs supported on beams.II: Analysis. J Struct Eng, 1998