

بررسی رفتار دال بتنی ساخته شده از بتن خود متراکم تقویت شده

مونس قفلی*^۱، مرتضی مهرافشاری^۲

۱- کارشناس ارشد رشته عمران گرایش سازه، موسسه آموزش عالی لیان بوشهر. (کارشناس املاک شهرداری).

۲- کارشناس ارشد رشته حسابداری، موسسه آموزش عالی خرد بوشهر.

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار مکانیکی دال های بتنی ساخته شده از بتن خودمتراکم تقویت شده با الیاف فولادی و تحلیل اثر نوع الیاف، مقدار الیاف و اندازه دال بر ظرفیت باربری، تغییر مکان و انرژی جذب شده است. در این مطالعه مجموعه ای از دال ها با ابعاد متفاوت و با سه نوع الیاف گوناگون و درصدهای حجمی مختلف ساخته شد. نمونه ها پس از دوره عمل آوری تحت بارگذاری متمرکز تا مرحله شکست قرار گرفتند و منحنی های نیرو-جابجایی برای ارزیابی رفتار خمشی، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی استخراج گردید. نتایج نشان داد که افزایش مقدار الیاف سبب بهبود قابل توجه شکل پذیری و انرژی جذب شده می شود، هرچند اثر آن بر بار نهایی محدود است. همچنین مشخص شد که افزایش نسبت طول به قطر الیاف موجب بهبود کارایی دال و افزایش پایداری پس از ترک می شود، اما مقدار الیاف نقش مؤثرتری نسبت به هندسه الیاف دارد. یافته ها بیانگر آن است که استفاده از مقادیر بسیار کم یا بسیار زیاد الیاف، به دلیل ایجاد افت ناگهانی مقاومت یا ناپیکنواختی، توصیه نمی شود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که دال های بزرگ تر رفتار شکل پذیرتر و انرژی بیشتری را تا مرحله شکست جذب می کنند. در مجموع، ترکیب بتن خودمتراکم و الیاف فولادی راهکاری مؤثر برای بهبود رفتار غیرخطی و ظرفیت جذب انرژی دال های بتنی محسوب می شود. کلمات کلیدی: بتن خودمتراکم، دال بتنی، الیاف فولادی، انرژی جذب شده، شکل پذیری.



مقدمه

دال های بتنی به عنوان یکی از پرکاربردترین اعضای سازه ای در ساختمان ها، پل ها، سازه های صنعتی و سامانه های زیرساختی، نقش مهمی در انتقال بارهای ثقلی و جانبی ایفا می کنند. عملکرد صحیح دال ها نه تنها بر ایمنی سازه تأثیرگذار است، بلکه بر دوام، ترک خوردگی، لرزش پذیری و رفتار بهره برداری نیز اثر مستقیم دارد. یکی از چالش های مهم در اجرای دال ها، مسئله تراکم مطلوب بتن و تضمین پیوستگی و کیفیت مناسب در تمام ضخامت است، به ویژه هنگامی که تراکم آرماتورها زیاد باشد. این محدودیت ها خصوصاً در سازه های مدرن که نیازمند دال های نازک تر و مقاوم تر هستند بیشتر نمایان می شود (Neville, ۲۰۱۱).

با پیشرفت فناوری بتن، استفاده از بتن خودمتراکم (Self-Compacting Concrete) به عنوان راهکاری جهت رفع مشکلات اجرایی و بهبود کیفیت سازه ها مطرح شده است. SCC به گونه ای طراحی می شود که بدون نیاز به ویبراسیون مکانیکی، توانایی جاری شدن، پر کردن قالب و عبور میان آرماتورها را داشته باشد. این ویژگی، ضمن کاهش هزینه های اجرایی و نیروی انسانی، موجب کاهش خطاهای انسانی و دستیابی به ریزساختار متراکم تر و مقاوم تر می شود (Okamura & Ouchi, ۲۰۰۳). در دال های بتنی، که سطح و حجم آن ها گسترده است و اغلب با شبکه های آرماتوری متراکم ترکیب می شوند، بهره گیری از SCC می تواند به طور چشمگیری کیفیت نهایی عضو را بهبود دهد.

از سوی دیگر، روند روزافزون استفاده از سیستم های تقویت مختلف برای بهبود رفتار مکانیکی دال ها، بررسی دقیق اثر ترکیب تقویت و بتن خودمتراکم را ضروری ساخته است. تقویت دال ها با استفاده از میلگردهای فولادی مرسوم، الیاف فولادی، الیاف ماکروسنتتیک یا ورق ها و میلگردهای ساخته شده از مواد کامپوزیتی (FRP)، هر یک می تواند ویژگی های خاصی بر رفتار سازه ای دال ایجاد کند (ACI ۵۴۴, ۲۰۱۶). ترکیب این تقویت ها با SCC که ذاتاً دارای ویژگی های رئولوژیکی خاص است، ممکن است رفتار برشی، خمشی و شکست دال را تحت تأثیر قرار دهد. به ویژه، چسبندگی بهتر میان آرماتور و SCC که در پژوهش های اخیر گزارش شده، یکی از عوامل مهم در تفاوت رفتار دال های SCC نسبت به بتن معمولی است (Hosseini et al., ۲۰۱۹).

بر این اساس، نیاز به تحلیل جامع رفتار دال های ساخته شده از بتن خودمتراکم تقویت شده اهمیت زیادی دارد؛ زیرا رفتار این دال ها تنها تابع مقاومت فشاری یا مدول الاستیسیته نیست، بلکه متأثر از خواص رئولوژیکی بتن تازه، کیفیت پیوستگی بتن و فولاد، الگوی ترک خوردگی، پایداری پس از ترک، و ظرفیت جذب انرژی است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی عمیق این رفتار و تحلیل اثر ویژگی های بتن خودمتراکم و الگوهای تقویت بر عملکرد خمشی و برشی دال ارائه شده است.

مبانی نظری

ماهیت بتن خودتراکم و سازوکار عملکرد آن

بتن خودتراکم یکی از مهم ترین دستاوردهای صنعت بتن در دهه های اخیر است که با هدف ارتقای کیفیت سازه ها، ساده سازی عملیات اجرایی و رفع ضعف های ناشی از تراکم ناقص توسعه یافت. این بتن به گونه ای طراحی شده است که



بدون اعمال هیچ گونه ارتعاش مکانیکی، تحت اثر وزن خود حرکت کرده و قالب را به طور کامل پر کند. دستیابی به این ویژگی ها از طریق اصلاح طرح اختلاط بتن، افزایش مقدار خمیر سیمانی، استفاده از مواد فوق کاهنده آب و افزودنی های اصلاح کننده لزجت امکان پذیر شده است (اوکامورا و اووچی، ۱۳۸۲).

رفتار بتن خودتراکم در حالت تازه، تحت تأثیر ویژگی های رئولوژیکی خمیر سیمان است. این بتن باید در عین روانی بالا، توانایی حفظ یکپارچگی و جلوگیری از جداسدگی دانه ها را داشته باشد. در بتن های معمولی، روانی زیاد موجب جداسدگی و آب افتادگی می شود، اما بتن خودتراکم به دلیل استفاده از مواد پایدارکننده، در برابر این پدیده ها مقاومت دارد. این موضوع در کیفیت نهایی دال ها اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کوچک ترین نقص در تراکم می تواند باعث ایجاد حفرات، کاهش چسبندگی میلگرد - بتن و کاهش دوام عضو سازه ای شود. از سوی دیگر، بتن خودتراکم در حالت سخت شده معمولاً دارای ریزساختاری متراکم تر و نفوذپذیری کمتر است. این ویژگی ها باعث افزایش مقاومت فشاری، دوام در برابر عوامل محیطی، و مقاومت در برابر سیکل های یخ زدگی و ذوب می شود. پژوهش ها نشان داده اند که دال های ساخته شده با بتن خودتراکم نسبت به دال های مشابه با بتن معمولی، ترک خوردگی اولیه کمتری دارند و رفتار یکنواخت تری را تحت بارگذاری از خود نشان می دهند (سهماران و لاچمی، ۱۳۸۹).

رفتار جامع دال های بتنی: خمش، برش و مکانیزم گسترش ترک

دال ها به عنوان اعضای گسترده، نسبت به تیرها ویژگی های خاص تری دارند. در تیرها، بار غالباً در یک راستا منتقل می شود، اما در دال ها انتقال بار در دو جهت انجام می گیرد و همین مسئله موجب رفتار پیچیده تر آنها می شود. برای تحلیل رفتار دال ها، سه جنبه اصلی باید در نظر گرفته شود:

۱. رفتار خمشی

در دال های خمشی، هنگام افزایش بار، ابتدا ترک های خمشی در ناحیه کششی پایین دال ایجاد می شود. پس از آن نقش اصلی تحمل نیرو بر عهده آرماتورهاست. مقاومت خمشی دال وابسته به مواردی چون مقاومت بتن، ناحیه فشاری، و مقدار آرماتور است. در دال هایی که بتن آنها کاملاً متراکم نشده باشد، ظرفیت خمشی به طور محسوسی کاهش می یابد زیرا چسبندگی میلگرد - بتن که عامل انتقال تنش هاست تضعیف می شود.

۲. رفتار برشی

برش یکی از پیچیده ترین حالت های تنشی در دال هاست. وجود ترک های مورب، تغییر شکل های غشایی، و مشارکت بتن پس از ترک خوردگی، رفتار برشی دال ها را دشوار می کند. بتن خودتراکم به دلیل تراکم بهتر و عدم وجود حفرات در ناحیه جانبی میلگردها، معمولاً مقاومت برشی بیشتری نسبت به بتن معمولی ایجاد می کند، زیرا ترک ها دیرتر شکل می گیرند و پیوستگی بتن بیشتر است (پارک و پالی، ۱۳۷۴).

۳. مکانیزم گسترش ترک



پس از ایجاد ترک، روند گسترش آن در دال ها تابع کیفیت بتن، چسبندگی میلگرد و ویژگی های خمیر سیمان است. بتن خودتراکم به دلیل جذب آب کمتر و تراکم بالاتر، گسترش ترک های ثانویه را محدودتر می کند. وجود الیاف یا تقویت های اضافی نیز می تواند این گسترش را کنترل کند.

نقش انواع تقویت در دال های بتنی

آرماتوردهی دال ها با هدف انتقال تنش های کششی و افزایش ظرفیت کل انجام می شود. نقش تقویت تنها افزایش مقاومت نیست بلکه شامل بهبود شکل پذیری و کاهش عرض ترک ها نیز می شود. در دال ها سه نوع تقویت رایج است:

۱. میلگردهای فولادی

این نوع تقویت اصلی ترین نقش را در دال ها ایفا می کند. کیفیت چسبندگی بتن و فولاد تأثیر مستقیم بر ظرفیت خمشی و دوام دال دارد. در بتن خودتراکم، چسبندگی معمولاً بیشتر است زیرا بتن اطراف میلگرد بدون نقص پر می شود. این مسئله باعث کاهش لغزش میلگرد و افزایش مقاومت خمشی می گردد (فرارا و همکاران، ۱۳۸۶).

۲. الیاف فولادی یا پلیمری

الیاف با توزیع سه بعدی خود در بتن، رفتار پس از ترک را بهبود می دهند. حضور الیاف موجب:

- کاهش عرض ترک
- افزایش انرژی جذب
- افزایش مقاومت برشی
- بهبود دوام در برابر چرخه های بارگذاری می شود.

۳. تقویت پلیمری (کامپوزیتی)

این تقویت ها به ویژه در سازه های در معرض خوردگی کاربرد دارند و می توانند ظرفیت خمشی و دوام دال را افزایش دهند، اما در ترکیب با بتن خودتراکم باید اثرات چسبندگی و رفتار مشترک بتن و کامپوزیت با دقت بررسی شود.

اثر ترکیب بتن خودتراکم و تقویت بر عملکرد سازه های دال

بررسی های تجربی نشان داده اند که دال های ساخته شده با بتن خودتراکم تقویت شده، نسبت به دال های بتن معمولی دارای ویژگی های بهتری هستند. این تفاوت به دلیل موارد زیر است:

- تراکم کامل بتن در اطراف میلگردها
- کاهش یا حذف حفرات ناشی از ویبراسیون ناقص
- تشکیل ریزساختار متراکم
- افزایش چسبندگی فولاد - بتن



• کاهش تنش های موضعی در محل تغییر شکل ها

این ویژگی ها باعث می شود دال های بتن خودتراکم رفتار زیر را نشان دهند:

۱. ظرفیت خمشی بالاتر

به دلیل چسبندگی مطلوب، توزیع تنش ها در ناحیه فشاری و کششی بهتر انجام می شود.

۲. مقاومت بیشتر در برابر برش

وجود ساختار یکنواخت، موجب تأخیر در ایجاد ترک های مورب می شود.

۳. رفتار شکست کنترل شده تر

به دلیل تقویت بهتر در بتن، دال ها شکست ناگهانی ندارند و رفتار نرم تری از خود نشان می دهند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸).

۴. افزایش دوام

نفوذپذیری پایین بتن خودتراکم باعث کاهش خوردگی آرماتور و افزایش عمر دال می شود.

۵. کاهش خطاهای اجرایی

با حذف ویبراسیون، احتمال ایجاد نقص ها و حفرات کاهش می یابد (سونبی و همکاران، ۱۳۹۷).

در یک پژوهش آزمایشگاهی، حسینی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی رفتار خمشی و ظرفیت باربری دال های ساخته شده از بتن خودتراکم مسلح پرداختند. در این مطالعه نمونه های دال با درصدهای متفاوت آرماتور خمشی و شرایط مختلف تراکم مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که دال های ساخته شده با بتن خودتراکم به دلیل تراکم یکنواخت تر، دارای چسبندگی بیشتر میان میلگرد و بتن، سختی اولیه بالاتر و ظرفیت خمشی بیشتر نسبت به دال های مشابه با بتن معمولی هستند. همچنین ترک های خمشی در این دال ها دیرتر ایجاد شدند و عرض ترک ها نیز کمتر بود. محققان نتیجه گرفتند که استفاده از بتن خودتراکم در دال های مسلح می تواند رفتار خمشی و دوام سازه را به طور معناداری بهبود دهد.

در پژوهشی دیگر، فرارا و همکاران (۱۳۸۶) اثر استفاده از الیاف فولادی در ترکیب با بتن خودتراکم بر رفتار پس از ترک دال های بتنی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فولادی موجب افزایش چشمگیر مقاومت پس از ترک، بهبود شکل پذیری، افزایش انرژی جذب و کاهش عرض ترک ها شد. همچنین دال های تقویت شده با الیاف در مقایسه با نمونه های بدون الیاف، رفتار شکست نرم تر و پایداری از خود نشان دادند. پژوهشگران اعلام کردند که ترکیب بتن خودتراکم و الیاف فولادی می تواند رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد سازه های دال ها باشد، به ویژه در سازه های تحت بارهای ضربه ای یا دینامیکی.



سونبی و همکاران (۱۳۹۷) در یک تحقیق تجربی به ارزیابی رفتار برشی دال های ساخته شده از بتن خودتراکم پرداختند. نمونه ها تحت بارگذاری متمرکز تا مرحله شکست قرار گرفتند. یافته ها نشان داد که به دلیل تراکم بهتر و نبود حفرات موضعی، مقاومت برشی بتن خودتراکم بیشتر از بتن معمولی است. همچنین مشاهده شد که ترک های مورب در نمونه های خودتراکم با تأخیر زمانی بیشتری شکل می گیرند و الگوی ترک نسبتاً منظم تر و با زاویه کمتر تشکیل می شود. این پژوهش نتیجه گیری می کند که بتن خودتراکم در دال های با تکیه گاه ساده و پیوسته می تواند ظرفیت برشی را بهبود داده و رفتار شکست را کنترل کند.

روش شناسی

روش شناسی این پژوهش بر پایه یک رویکرد آزمایشگاهی - تحلیلی طراحی شده است؛ رویکردی که هدف آن بررسی دقیق رفتار دال های بتنی ساخته شده با بتن خودتراکم تقویت شده تحت شرایط بارگذاری واقعی است. برای دستیابی به این هدف، نخست طرح کلی پژوهش به گونه ای تنظیم شد که امکان مقایسه بین دال های ساخته شده با بتن خودتراکم و نمونه های مشابه با بتن معمولی فراهم شود. همچنین متغیرهای مربوط به نحوه تقویت، مانند مقدار و آرایش آرماتورهای خمشی و تأثیر استفاده از الیاف فولادی، به عنوان عوامل اصلی اثرگذار بر رفتار خمشی و برشی دال ها در نظر گرفته شدند.

در مرحله نخست، مواد مورد استفاده شامل سیمان پرتلند، سنگدانه های ریز و درشت با دانه بندی کنترل شده، فوق کاهنده آب و افزودنی های اصلاح کننده لزجت تهیه شد. سپس طرح اختلاط بتن خودتراکم بر اساس نسبت خمیر سیمانی بالاتر و استفاده از فوق روان کننده تنظیم گردید تا بتن تولید شده قادر باشد بدون نیاز به ویبراسیون، قالب را به صورت یکنواخت پر کند. پس از آماده سازی طرح اختلاط، نمونه های دال با ابعاد ثابت و با توجه به گروه بندی آزمایشی طراحی شده ساخته شدند. تمامی نمونه ها در شرایط یکسان و در قالب های استاندارد ریخته شدند، با این تفاوت که بتن خودتراکم بدون اعمال ارتعاش و بتن معمولی با ارتعاش مناسب متراکم گردید. برای جلوگیری از تأثیر عوامل محیطی، عمل آوری هر دو نوع بتن به مدت ۲۸ روز در شرایط کنترل شده انجام شد.

پس از طی دوره عمل آوری، نمونه ها برای آزمایش خمشی و برشی آماده شدند. بارگذاری به صورت تدریجی و تا مرحله شکست بر نمونه ها اعمال شد تا رفتار کامل بار-تغییر مکان، نحوه آغاز ترک خوردگی، نوع و زاویه ترک ها و نهایتاً ظرفیت نهایی هر دال بررسی شود. در طول بارگذاری، داده های مربوط به تغییر مکان، بار ترک خوردگی اولیه، بار نهایی و رفتار پس از ترک با استفاده از ابزارهای دقیق اندازه گیری ثبت گردید. این مرحله اهمیت زیادی داشت؛ زیرا رفتار دال ها در نواحی پس از ترک می تواند تفاوت های اساسی میان بتن خودتراکم و بتن معمولی را آشکار سازد. از آنجا که بتن خودتراکم معمولاً ساختار یکنواخت تر و چسبندگی قوی تری با میلگرد ایجاد می کند، انتظار می رفت که این تفاوت ها در نمودار بار-تغییر مکان و الگوی شکست نمایان شود.

در مرحله تحلیل داده ها، ابتدا عملکرد نمونه ها بر اساس ظرفیت خمشی و برشی مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمودارهای بار-تغییر مکان با یکدیگر مقایسه شدند تا تفاوت رفتار الاستیک، تسلیم و شکست در نمونه های مختلف استخراج شود. علاوه بر این، الگوی ترک خوردگی و محل آغاز ترک، شاخص های مهمی برای تحلیل رفتار دال ها محسوب شدند، زیرا بتن خودتراکم به دلیل تراکم بهتر معمولاً تأخیر بیشتری در ایجاد ترک از خود نشان می دهد. در نهایت، نتایج آزمایش ها



با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مقایسه شد تا اعتبار بیرونی پژوهش افزایش یابد و هم‌خوانی رفتار نمونه‌های ساخته‌شده با نتایج گزارش‌شده در ادبیات علمی ارزیابی گردد.

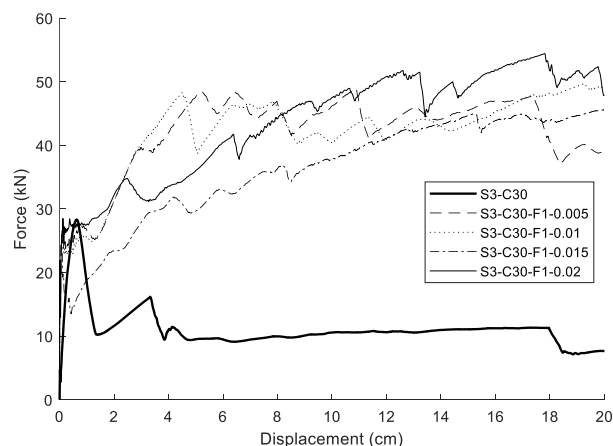
به‌طور کلی، روش‌شناسی این پژوهش بر پایه ساخت نمونه‌های واقعی، بارگذاری تا شکست و تحلیل دقیق واکنش سازه‌ای دال‌ها بنا شده است. این رویکرد سبب می‌شود که نتایج حاصل نه‌تنها از لحاظ نظری بلکه از نظر کاربردهای عملی نیز قابل اتکا باشند. دال‌های بتنی در سازه‌های واقعی اغلب تحت بارهای گسترده قرار می‌گیرند و کوچک‌ترین نقص در تراکم یا چسبندگی می‌تواند عملکرد کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین استفاده از بتن خودتراکم در چنین اعضای اهمیت ویژه‌ای دارد و روش‌شناسی ارائه‌شده به‌صورت گام‌به‌گام این موضوع را مورد بررسی و سنجش قرار داده است.

یافته‌های تحقیق

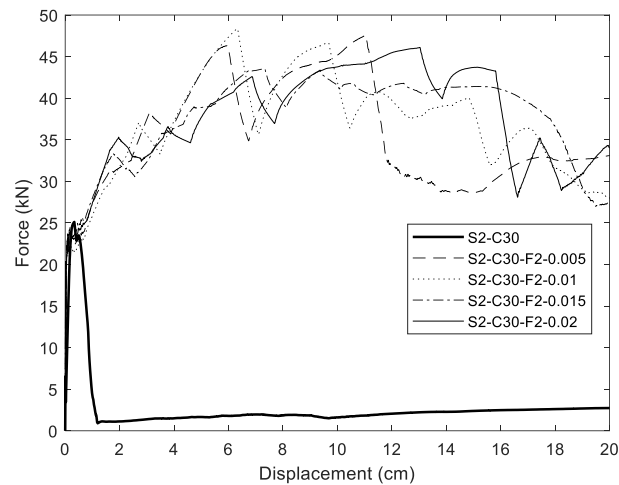
پس از انجام بارگذاری بر روی هر یک از مدل‌ها، منحنی نیرو-جابجایی آن‌ها به کمک نمودار متلب رسم می‌شود و از آن برای بررسی پارامترهای مختلف استفاده می‌شود.

تأثیر افزودن الیاف فولادی

برای مشاهده تأثیر افزودن الیاف فولادی می‌توان نمودار بار-جابجایی را در مدل‌های مختلف بررسی کرد. همان‌طور که از شکل‌های زیر مشخص است با افزودن الیاف فولادی میزان بار تحمل شده در دال افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشخص است این تأثیر در ناحیه غیرخطی بیشتر است.



شکل ۱: منحنی نیرو-جابجایی برای سقف ۲۰×۳۰×۳۰۰ با افزودن الیاف نوع F۱



شکل ۲: منحنی نیرو-جابجایی برای سقف ۳۰×۲۰×۲۰ با افزودن الیاف نوع F۲

تأثیر نوع الیاف

نتایج این قسمت نشان می دهد که افزایش نسبت f/d_f باعث بهبود کارایی دال می شود. البته این اثر در درصدهای بالای الیاف تأثیر کمتری دارد. بر اساس منحنی های به دست آمده، با زیاد شدن طول و نسبت طول به قطر الیاف شکل پذیری افزایش یافته است. با این وجود، افزایش مقدار الیاف تأثیر چشمگیرتری در افزایش شکل پذیری دارد. در جدول های زیر خلاصه نتایج مربوط به بار حداکثر، تغییر مکان نهایی و انرژی جذب شده برای الیاف مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱: خلاصه نتایج دال الیاف F۱

نام مدل	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	کل انرژی جذب شده (J)
S۲-F۱-۰،۰۰۵	۲۱،۶۳	۷۹۳،۷۶	۱۲۲۳۲،۸۷
S۲-F۱-۰،۰۰۱	۴۵،۴۲	۴۰۶،۳۳	۱۴۳۹۶،۱۵
S۲-F۱-۰،۰۱۵	۴۳،۵۳	۷۹۱،۱۳	۲۴۴۸۶،۵۹
S۲-F۱-۰،۰۰۲	۴۷،۰۶	۷۴۰،۹۵	۲۳۳۴۴،۵۰
S۳-F۱-۰،۰۰۵	۴۸،۹۶	۵۴۴،۵۱	۱۹۸۸۷،۲۵
S۳-F۱-۰،۰۰۱	۵۱،۵۸	۲۲۶،۷۶	۹۷۲۵،۲۱
S۳-F۱-۰،۰۱۵	۴۶،۰۲	۲۱۴،۲۹	۷۸۹۸،۱۵
S۳-F۱-۰،۰۰۲	۵۴،۴۱	۲۳۸،۵۱	۱۰۶۹۵،۹۳



جدول ۲: خلاصه نتایج دال الیاف F۲

نام مدل	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	کل انرژی جذب شده (J)
S۲-F۲-۰,۰۰۵	۴۷.۶۱	۷۲۱.۹۷	۲۲۲۷۴.۲۶
S۲-F۲-۰,۰۱	۴۸.۳۳	۷۸۳.۳۷	۲۷۱۳۰.۰۶
S۲-F۲-۰,۰۱۵	۴۳.۵۳	۷۹۱.۳۹	۲۴۴۹۲.۲۷
S۲-F۲-۰,۰۲	۴۶.۱۰	۷۹۸.۷۴	۲۶۰۰۱.۳۷
S۳-F۲-۰,۰۰۵	۵۰.۱۲	۴۹۱.۲۷	۶۶۵۸.۸۵
S۳-F۲-۰,۰۱	۵۲.۸۴	۵۴۴.۹۶	۲۰۵۵۸.۷۰
S۳-F۲-۰,۰۱۵	۴۵.۷۳	۲۱۴.۰۳	۷۸۸۶.۳۶
S۳-F۲-۰,۰۲	۵۴.۵۵	۵۰۴.۳۲	۲۱۱۳۸.۶۴

جدول ۳: خلاصه نتایج دال الیاف F۳

نام مدل	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	کل انرژی جذب شده (J)
S۲-F۳-۰,۰۰۵	۴۱.۴۳	۷۵۲.۶۵	۱۵۰۸۹.۳۲
S۲-F۳-۰,۰۱۵	۴۷.۰۰	۷۲۷.۸۸	۹۶۲۵.۲۵
S۲-F۳-۰,۰۱۵	۴۲.۲۴	۷۸۳.۶۸	۱۸۷۴۳.۲۱
S۲-F۳-۰,۰۲	۴۲.۶۰	۱۷۵.۸۶	۶۴۶۶.۱۶
S۳-F۳-۰,۰۰۵	۴۶.۴۳	۴۸۳.۹۰	۱۹۴۱۶.۰۶
S۳-F۳-۰,۰۱	۵۳.۹۹	۲۵۹.۹۵	۱۱۶۱۱.۳۰
S۳-F۳-۰,۰۱۵	۵۲.۹۸	۵۰۱.۱۵	۲۱۷۷۹.۱۲
S۳-F۳-۰,۰۲	۴۹.۰۶	۲۳۸.۴۴	۹۶۹۰.۶۹

تأثیر اندازه سقف

در این قسمت سعی شده تا با مقایسه تأثیر الیاف بر روی سقف های گوناگون اثر اندازه دال بررسی شود. با مقایسه نمودارهای این قسمت می توان مشاهده کرد که دال با اندازه بزرگ تر شکل پذیری بیشتری نسبت به دال کوچک تر دارد. در جدول های صفحه بعد خلاصه نتایج مربوط به بار حداکثر، تغییر مکان نهایی و انرژی جذب شده برای هر دو دال و با



درصدهای مختلف الیاف نشان داده شده است.

جدول ۴: خلاصه نتایج دال ۲۰x۲۰x۳۰۰

نام مدل	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	ز
S2	25.12	644.64	2128.26
S2-F1-0.005	21.63	793.76	12232.87
S2-F1-0.01	45.42	406.33	14396.15
S2-F1-0.015	43.53	791.13	24486.59
S2-F1-0.02	47.06	740.95	23344.50
S2-F2-0.005	47.61	721.97	22274.26
S2-F2-0.01	48.33	783.27	27130.06
S2-F2-0.015	43.53	791.39	24492.27
S2-F2-0.02	46.10	798.74	26001.37
S2-F3-0.005	41.43	752.65	15089.32
S2-F3-0.015	47.00	727.88	9625.25
S2-F3-0.015	42.24	783.68	18743.21
S2-F3-0.02	42.60	175.86	6466.16

جدول ۵: خلاصه نتایج دال ۲۰x۳۰۰x۳۰۰

نام مدل	بار حداکثر (kN)	تغییر مکان نهایی (mm)	کل انرژی جذب شده (J)
S3	28.32	516.78	4822.68
S3-F1-0.005	48.96	544.51	19887.25
S3-F1-0.01	51.58	226.76	9725.21
S3-F1-0.015	46.02	214.29	7898.15
S3-F1-0.02	54.41	238.51	10695.93
S3-F2-0.005	50.12	491.27	6658.85
S3-F2-0.01	52.84	544.96	20558.70
S3-F2-0.015	45.73	214.03	7886.36
S3-F2-0.02	54.55	504.32	21138.64
S3-F3-0.005	46.43	483.90	19416.06
S3-F3-0.01	53.99	259.95	11611.30
S3-F3-0.015	52.98	501.15	21779.12
S3-F3-0.02	49.06	238.44	9690.69



نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده موارد زیر نتیجه گرفته می شود :

۱. افزودن الیاف مقاومت خمشی نهایی دال را به مقدار کمی افزایش می دهد اما این تأثیر چشمگیر نیست. همچنین الیاف روی شیب بخش صعودی منحنی بار- تغییر مکان تأثیر اندکی می گذارد.
۲. افزایش مقدار الیاف تأثیر چشمگیری در شکل پذیری و انرژی جذب شده دال های بتنی دارد. با افزایش الیاف نرخ افزایش شکل پذیری کاسته می شود. افزودن مقدار زیاد الیاف می تواند به دلیل ایجاد نایکنواختی تأثیر روی شکل پذیری را محدود کند.
۳. به طور کلی استفاده از مقادیر خیلی کم الیاف به دلیل کاهش ناگهانی نیروی حداکثر و همچنین استفاده از مقادیر خیلی زیاد الیاف به دلیل ایجاد نایکنواختی توصیه نمی شود.
۴. با افزایش طول و نسبت طول به قطر الیاف شکل پذیری نیز افزایش می یابد، با این وجود، افزایش مقدار الیاف تأثیر چشمگیرتری در افزایش شکل پذیری دارد.
۵. با افزایش مقاومت بتن در حضور الیاف شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی افزایش می یابد و نیز نوع و مقدار الیاف برای مقاومت های مختلف زمینه تأثیر مشابهی دارند.

منابع

۱. H. Okamura and K. Ozawa, "Self-compactable high-performance concrete in Japan," Spec. Publ., vol. ۱۰۹, pp. ۳۱-۴۴, ۱۹۹۶.
۲. H. P. Frank, "Fibre cements and fibre concretes, DJ Hannant, wiley-interscience, New York, ۱۹۷۸, ۲۱۹ pp.," J. Polym. Sci. Polym. Lett. Ed., vol. ۱۷, no. ۷, pp. ۴۶۴-۴۶۵, ۱۹۷۹.
۳. P. Groth and D. Nemegeer, "The use of steel fibres in self-compacting concrete," O. Petersson A. Skarendahl, éditeur Self-compacting concrete, pp. ۴۹۷-۵۰۸, ۱۹۹۹.
۴. F. A. Darwish, T. M. Oliveira, C. G. Coura, S. Kitamura, M. T. G. Barbosa, and W. Santos, "Influence of Fiber Ratio in the Size Effect," in Proceedings, Int. Conference Concrete: Construction's sustainable option, Dundee, UK, ۲۰۰۸, pp. ۱۲۳-۱۳۰.
۵. R. Khaloo and M. Afshari, "Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs," Cem. Concr. Compos., vol. ۲۷, no. ۱, pp. ۱۴۱-۱۴۹, ۲۰۰۵.
۶. H. Okamura, "Ozawa, and Kazumasa: Mix Design for Self-Compacting Concrete," Concrete Library of JSCE No. ۲۵, June, ۱۹۹۵.
۷. S.-C. Lee, J.-H. Oh, and J.-Y. Cho, "Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers," Materials (Basel), vol. ۸, no. ۴, pp. ۱۴۴۲-



۱۴۵۸، ۲۰۱۵

۸. C. Sujivorakul, "Model of hooked steel fibers reinforced concrete under tension," in High performance fiber reinforced cement composites ۶, Springer, ۲۰۱۲, pp. ۱۹-۲۶.
۹. B. Alfarah, F. López-Almansa, and S. Oller, "New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures," Eng. Struct., vol. ۱۳۲, pp. ۷۰-۸۶, ۲۰۱۷.