

تأثیر تراکم وزنی و درصد خاکستر بادی در مقاومت بتن خودمتراکم در ترازهای مختلف

محمود نادری* (دانشیار)

یاشار خطیبی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (دوره ۲ - شماره ۱/۴، ص. ۳۰-۳۵)

با وجودی که سال‌ها از کاربرد بتن خودمتراکم می‌گذرد، هنوز پژوهشی در خصوص تأثیر وزن بتن موجود در قسمت بالای تراز موردنظر در مقاومت آن تراز بتن انجام نشده است. به همین دلیل با به‌کارگیری مخلوط‌های مختلف بتن خودمتراکم و با استفاده از روش درجای «انتقال اصطکاک» با ساخت ستون‌های بتنی، تأثیر وزن قسمت‌های بالایی در مقاومت بتن تراز موردنظر مطالعه و نتایج حاصل در این نوشتار ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که وزن بتن در قسمت‌های بالایی یک تراز، تأثیر مثبتی در مقاومت بتن خودمتراکم در آن تراز دارد. علاوه بر مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر بتن معمولی، تأثیر تغییرات درصد خاکستر بادی و دانه‌بندی در مقاومت‌های به‌دست‌آمده نیز در این نوشتار بررسی شده‌اند.

واژگان کلیدی: بتن خودمتراکم، وزن بتن، مقاومت، ستون، خاکستر بادی، انتقال اصطکاک.

drmahmoodnaderi@yahoo.com
ykhatabi@yahoo.com

۱. مقدمه

تا طرح اختلاط بتن خودمتراکم را همانند بتن معمولی با در نظر گرفتن مقاومت فشاری آن طراحی کنند، ولی نتایج حاصل نشان می‌دهد که نمی‌توان فقط با تغییر در نسبت آب به سیمان به این خواسته رسید.^[۱۹] لذا با توجه به اهمیت مقاومت بتن، که به‌عنوان اصلی‌ترین مشخصه‌ی آن در نظر گرفته می‌شود، و با عنایت به این که تا به امروز، نقش تراکم حاصل از وزن خود بتن در ارتباط با مقاومت بتن خودمتراکم مورد بررسی قرار نگرفته است، مطالب مندرج در این نوشتار اختصاص به میران تأثیر این نوع تراکم در مقاومت بتن خودمتراکم در ترازهای مختلف ستون‌ها دارد. علاوه بر مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج متناظر بتن معمولی، تأثیر تغییرات درصد خاکستر بادی، پدیده‌ی جداسدگی و دانه‌بندی در مقاومت‌های به‌دست‌آمده نیز در این نوشتار بررسی شده‌اند.

ایده‌ی بتن خودمتراکم که برای اولین بار در ژاپن مطرح شده است، به‌تدریج از ژاپن به اروپا و سایر نقاط جهان توسعه یافته است و امروزه در سراسر دنیا، مراکز تحقیقات مختلفی در مورد این بتن در حال پژوهش و تحقیق هستند. در ایران نیز چندی است که این بتن مورد توجه واقع شده و به‌صورت بسیار محدودی مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال در توسعه‌ی حرم حضرت معصومه (س)، پروژه‌ی تونل رسالت و تولید قطعات پیش‌ساخته جهت عبور دستگاه‌های حفاری متروی شیراز از بتن خودمتراکم استفاده شده است. با اینکه مطالعاتی در ارتباط با ستون‌های با مقاومت بالا و خاموت‌های مستطیلی،^[۱] ستون‌های با آرماتورهای بسیار زیاد،^[۲] ستون‌های جدارنازک مرکب کوتاه،^[۳] اتصالات تیر به ستون،^[۴] ستون‌های کوتاه جدارنازک،^[۵] ستون‌های جدارنازک،^[۶] ستون‌ها و اتصالات تیر و ستون،^[۷] ستون‌های جدارنازک پُر شده با بتن خودمتراکم،^[۸] ستون‌های جدارنازک پُر شده با بتن خودمتراکم تحت بارهای محوری،^[۹] ستون‌های جدارنازک پُر شده با بتن خودمتراکم تحت بارهای متناوب،^[۱۰] ستون‌های فلزی پُر شده با بتن خودمتراکم،^[۱۱-۱۳] ستون‌های جدارنازک پُر شده با بتن خودمتراکم تحت بارهای محوری متمرکز،^[۱۴] انجام شده است؛ ولی تأثیر وزن بتن خودمتراکم موجود در بالای تراز موردنظر در مقاومت فشاری بتن خودمتراکم بررسی نشده است. هر چند در یکی دو سال اخیر اقداماتی برای ملاک قراردادن مقاومت بتن خودمتراکم برای به‌دست‌آوردن طرح اختلاط بتن خودمتراکم صورت گرفته است، ولی هنوز استاندارد واحدی در این خصوص تدوین نشده است. لذا با وجودی که بعضی‌ها تلاش کرده‌اند

۲. کارهای آزمایشگاهی

۲.۱. مصالح به‌کار گرفته‌شده و آماده‌سازی آن‌ها

در سری اول آزمایش‌های انجام‌شده، از مصالح محلی استفاده و در سری دوم آزمایش‌ها، سنگ‌دانه‌ها با شکل طبیعی خود دانه‌بندی شده‌اند. شن لازم از شرکت ماسه‌شویی قسم در استان قزوین تهیه و دانه‌های بزرگ‌تر از ۲۰ میلی‌متر توسط الک جدا و تمامی آنها از الک ۳/۴ اینچ عبور داده شده‌اند. پس از بررسی ماسه‌های تولیدی شرکت‌های قسم، کریمی و شرکت بویین‌دشت، ماسه‌ی سه شور از شرکت

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۶/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۹/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۷.

بوئین دشت بوئین زهرا مورد تأیید و انتخاب شده است. ارزش ماسه‌ی ماسه‌ی مورد استفاده نیز برابر با ۹۳٪ تعیین شده است، که مقدار بسیار مناسبی برای تولید بتن است (مقدار قابل قبول در این مورد ۰/۸ است). وزن مخصوص ماسه برابر ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مدول نرمی ماسه نیز برابر ۲/۷ تعیین شده است. با توجه به اینکه خصوصیات بتن خودتراکم تر با استفاده از آزمایش‌هایی قابل ارزیابی است، می‌توان گفت که مدول نرمی متوسط بین ماسه و ماسه‌بادی برای رسیدن به بتن خودتراکم قابل قبول است. نسبت‌های ماسه و ماسه‌بادی انتخابی، مساوی بوده و هر کدام نیمی (به صورت جرمی) از مخلوط را تشکیل داده‌اند. مدول نرمی ماسه‌ی مخلوط نیز برابر با ۲/۹۵ محاسبه شده است. وزن مخصوص مخلوط ماسه در آزمایش سری اول ۲/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در سری دوم آزمایش‌ها، وزن مخصوص ماسه با مدول نرمی بالاتر از ۲/۶۸ و وزن مخصوص ماسه‌ی بادی ۱/۸۲ بوده است، که بدین ترتیب وزن مخصوص مخلوط سری دوم برابر ۲/۲۵ محاسبه شده است. سیمان مصرفی در این بررسی‌ها، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه‌ی سیمان آبیگ بود، که خاصیت ضد سولفاتی و گرمای هیدراسیون متوسط دارد. چگالی این سیمان نیز ۳۰۰۷/۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. خاکستر بادی مورد استفاده از نوع F بوده و از شرکت نامیکاران تهیه شده است، که چگالی آن ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده است. مشخصات و ترکیبات شیمیایی سیمان و خاکستر بادی مورد استفاده در این پروژه در جدول ۱ ارائه شده است.

فوق روان‌کننده‌ی مورد استفاده در این تحقیقات بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلیت و از نوع نسل چهارم Viscocrete^۱ بی‌رنگ با جرم حجمی ۱/۰۶ کیلوگرم بر لیتر و تولیدی شرکت سیکای سوئیس است. میزان مصرف فوق روان‌کننده در این آزمایش‌ها، بین ۰/۰۷ تا ۰/۰۲ و وزن سیمان مصرفی بوده است. شن و ماسه‌ی مصرفی پس از تهیه، شسته و کاملاً خشک شده‌اند، تا به حالت اشباع با سطح خشک درآیند. شن‌ها روی الک نمره چهار و ماسه‌ها روی الک نمره ۲۰ شسته شده و سپس درون سطل‌های درب‌دار ریخته شده‌اند تا به حالت اشباع درآیند. در ابتدای آزمایش‌ها برای انتخاب طرح اختلاط از میان توصیه‌نامه‌های موجود از مجموعه‌ی راهنمایی‌های EFNARC استفاده شده است.^[۲۰-۲۵]

۲.۲. کارهای آزمایشگاهی سری اول

با توجه به اینکه ACI Committee^[۲۶]، جریان عبور و پرکردن قالب توسط بتن خودتراکم را ملاک تعریف خود قرار داده و پیشنهاد کرده است تا با عنایت به

جدول ۱. ترکیبات خاکستر بادی و سیمان تیپ (۲ درصد).

اجزاء تشکیل دهنده	خاکستر بادی F	سیمان نوع ۲
SiO ₂	۶۱٫۳۴	۲۱٫۱
Al ₂ O ₃	۲۵٫۱۱	۴٫۳
Fe ₂ O ₃	۴٫۴۲	۳٫۲
CaO	۴٫۹۴	۶۳٫۹
MgO	۱٫۰۹	۲٫۰
Na ₂ O	۰٫۵۹	۰٫۲
K ₂ O	۱٫۰۱	۰٫۵
SO ₃	۰٫۰۸	۳٫۰
رطوبت	۰٫۰۳	—
میزان افت در اشتعال	۰٫۳۴	۱٫۲
قلیایی معادل اکسیدسدیم	۰٫۳۸	۰٫۵۵

توصیه‌نامه‌ها و استانداردهای موجود، باید طرح اختلاط هر بتن خودتراکم مصرفی با دقت و وسواس خاصی انتخاب شود، ابتدا چند طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای انجام آزمون‌های لازم جهت تأیید خودتراکم بودن طرح‌های اختلاط، از آزمایش‌های اسلامپ، جعبه‌ی L، و قیف V استفاده شده است. در مرحله‌ی اول، نمونه‌ها توسط آزمایش جریان اسلامپ و T₅₀₀ در جریان اسلامپ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و در صورت مناسب بودن توانایی پرکنندگی، قسمت دوم آزمایش‌ها، شامل: آزمایش‌های قیف V و جعبه‌ی L و قیف V در T_{5 min} که سایر پارامترهای مورد نیاز برای بتن خودتراکم (به ترتیب پرکنندگی، توانایی عبور، مقاومت در برابر جداسازی) را مورد ارزیابی قرار می‌دهند، به عمل آمده‌اند. در صورت خودتراکم بودن، در مرحله‌ی سوم تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نهایتاً طرح‌های مناسب برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در ادامه با ثابت نگه داشتن مقدار کل سنگ‌دانه‌های مخلوط، سایر پارامترها به تدریج تغییر داده شده‌اند. از میان طرح اختلاط‌های یادشده، ۹ طرح برای انجام آزمایش‌های سری دوم انتخاب شده‌اند. لازم به توضیح است که آزمایش جعبه‌ی L برای مشخص کردن قابلیت عبور بتن خودتراکم به کار می‌رود و نسبت ارتفاع به دست آمده از این آزمایش به نسبت بلوک‌ها معروف است. محدوده‌ی مورد تأیید بین ۰/۸ و ۱ قرار دارد. براساس توصیه‌نامه‌ی EFNARC^[۲۰-۲۵]، محدوده‌ی مورد قبول برای آزمایش‌هایی که بر روی بتن خودتراکم تر انجام می‌پذیرد، به این قرار است:

- آزمایش جریان اسلامپ بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر.
- آزمایش اسلامپ T₅₀₀ بین ۲ تا ۵ ثانیه.
- آزمایش قیف V بین ۶ تا ۱۲ ثانیه.
- آزمایش T_{5 min} در قیف V بین ۰ تا ۳+ ثانیه.
- آزمایش I-Box (جعبه‌ی L) بین ۰/۸ تا ۱/۰.

همان‌گونه که در جدول‌های ۲ الی ۴ مشاهده می‌شود، از بین طرح اختلاط‌های مورد مطالعه، مخلوط‌های قابل قبول انتخاب شده‌اند.

مرحله‌ی دوم آزمایش‌ها با جایگزینی سنگ‌دانه‌های گروه دوم به جای سنگ‌دانه‌های گروه اول به انجام رسیده است. همچنین برای نمونه‌ی شاهد (بتن معمولی)، طرح اختلاط دیگری جهت مقایسه با مقاومت فشاری ۲۸ روزه مشابه با طرح اختلاط‌ها ساخته شده است. طرح اختلاط‌های انتخابی به ترتیب با مشخصه‌های ۲۵٪ خاکستر بادی، ۳۵٪ خاکستر بادی و ۴۵٪ خاکستر بادی نام‌گذاری شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی مقدار جایگزینی خاکستر بادی با سیمان است.

پس از به دست آوردن طرح‌های اختلاط مناسب و اطمینان از خودتراکم بودن آن‌ها، به مقدار مورد نیاز از هر طرح اختلاط، بتن مورد نظر تولید و علاوه بر ستون‌ها، قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری نیز برای به دست آوردن مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ساخته شده‌اند. نمونه‌ی از ستون‌های مورد نظر ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تولید بتن‌های تر، ابتدا مصالح دانه‌ی (شن و ماسه) داخل مخلوط‌کن ریخته و به مدت چند ثانیه مخلوط و سپس مقداری آب به آن‌ها اضافه شده است. پس از حدود ۱ دقیقه، سیمان و خاکستر بادی و نیز بقیه‌ی آب مخلوط همراه با فوق روان‌کننده افزوده شده‌اند. پس از افزودن فوق روان‌کننده، حدود ۳ الی ۴ دقیقه مخلوط بتنی هم زده شده است، تا کاملاً پراکنندگی فوق روان‌کننده انجام پذیرد. پس از پایان یافتن مراحل مخلوط کردن، بتن تر بدون هیچ تراکمی داخل قالب‌های ستون‌ها ریخته شده است. همچنین نمونه‌های مکعبی، که برای تعیین مقاومت فشاری در نظر گرفته شده بودند، بدون هیچ تراکمی ساخته شده‌اند. همان‌گونه که قبلاً اشاره

جدول ۲. طرح اختلاط نمونه‌های منتخب سری اول و نمونه‌ی شاهد.

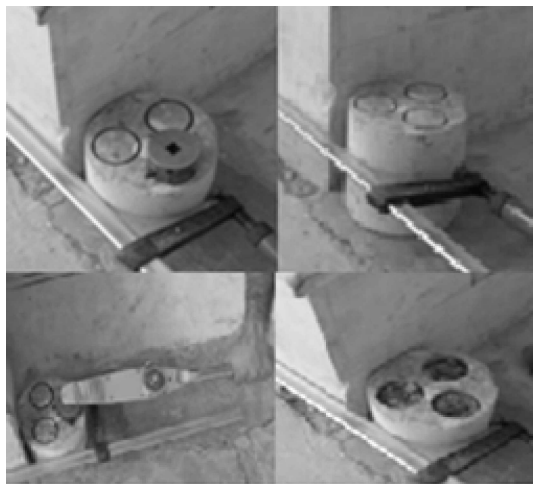
طرح اختلاط	نسبت پودر به آب	آب (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	فوق روان‌کننده (کیلوگرم)
با ۲۵٪ خاکستر بادی	۰/۳۵	۱۸۸	۴۰۰	۶۳۰	۸۵۰	۱۳۰	۵/۶
با ۳۵٪ خاکستر بادی	۰/۳۵	۱۸۵	۳۴۵	۶۳۰	۸۵۰	۱۸۵	۵
با ۴۵٪ خاکستر بادی	۰/۳۶	۱۹۰	۲۹۲	۶۳۰	۸۵۰	۲۳۸	۴/۲۵
بتن شاهد (معمولی)	۰/۴۵	۱۹۲	۴۲۶	۱۱۰۰	۷۰۰	—	—

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های بتن تر در طرح‌های اختلاط منتخب سری اول.

طرح اختلاط	قالب L شکل (نسبت ارتفاع)	قیف V شکل (s)	افزایش زمان قیف V در ۵ دقیقه (s)	قطر جریان اسلامپ (mm)	زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی‌متر (s)
با ۲۵٪ خاکستر بادی	۰/۹۲	۸/۳۲	+۰/۸۴	۷۳۰	۲/۶۳
با ۳۵٪ خاکستر بادی	۰/۸۷	۸/۱۲	+۰/۵۸	۷۲۰	۳/۶۵
با ۴۵٪ خاکستر بادی	۰/۹۵	۷/۱۲	+۰/۹۰	۷۳۰	۳/۳۳

جدول ۴. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط منتخب سری اول و نمونه‌ی شاهد.

طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۲۸ روزه به مگاپاسکال
با ۲۵٪ خاکستر بادی	۳۲/۳۷
با ۳۵٪ خاکستر بادی	۳۳/۲۹
با ۴۵٪ خاکستر بادی	۳۶/۷۸
بتن شاهد (معمولی)	۳۴/۴۱



شکل ۲. انجام آزمون «انتقال اصطکاک».

از روش «انتقال اصطکاک»^[۲۸،۲۷] استفاده شده است. برای این منظور ستون‌ها در ترازهای ۱۵ سانتی‌متری (از کف)، با استفاده از اره‌ی بتن بُر الماسه‌یی بریده شده‌اند. سپس روی هر سطح بریده‌شده، با استفاده از دستگاه کُرگیر، سه نیم‌مغزه به قطر ۵ و ارتفاع ۲٫۵ سانتی‌متر تعبیه شده‌اند (شکل ۲). همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با انجام آزمون «انتقال اصطکاک» بر روی نیم‌مغزه‌ها و با ثبت لنگر شکست آن‌ها، با استفاده از منحنی‌های کالیبراسیون موجود، مقاومت فشاری معادل نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری به‌دست آمده است.

۳. نتایج به‌دست‌آمده و تحلیل آن‌ها

۳.۱. نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌های سری اول و تحلیل آن‌ها
نتایج آزمایش‌های سری اول مطالعات در شکل ۳ ارائه شده‌اند. بررسی اجمالی این نتایج، که مقاومت‌های به‌دست‌آمده در ترازهای مختلف ستون‌ها را نشان می‌دهد، بیان‌گر آن است که با افزایش ارتفاع از کف ستون، که وزن بتن تر در بالای تراز موردنظر کاهش یافته است، از مقاومت بتن کاسته شده است. یعنی بتن خودمتراکم نیز علی‌رغم خودمتراکم بودنش تحت تأثیر وزن بتن در ترازهای بالاتر، دچار فشردگی



شکل ۱. نمونه‌ی ستون‌های تهیه‌شده از بتن خودمتراکم.

شده است، برای طرح اختلاط‌های بعدی، نسبت خاکستر بادی به سیمان تغییر داده شده و نسبت‌های ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شده‌اند. پس از ۲۴ ساعت، قالب‌های مکعبی باز شده و نمونه‌ها به داخل آب با دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انتقال یافته‌اند. در سن ۲۸ روزه، سه نمونه‌ی مکعبی برای به‌دست‌آوردن مقاومت فشاری زیر جک فشاری گذاشته شده و میانگین نتایج ثبت شده است. برای به‌دست‌آوردن مقاومت فشاری بتن ستون‌های ساخته‌شده در ترازهای مختلف،

جدول ۵. ضرایب تعیین و آزمون‌های F و T برای مدل‌های ارائه شده در طرح اختلاط سری اول با ۲۵٪ خاکستر بادی.

مدل منحنی	R ^۲	F	Sig. F	ضرایب	مقدار ضرایب	T	Sig. T
خطی	۰٫۷۶۲	۳۲٫۱۰	۰٫۰۰۰	a	-۶٫۷۲	-۵٫۶۶	۰٫۰۰۰
				b	۴۱٫۵۲	۳۱٫۶۹	۰٫۰۰۰
درجه ۲	۰٫۷۱۸	۱۷٫۷۵	۰٫۰۰۱	a	-۱۲٫۸۸	-۲٫۵۵	۰٫۰۳۰
				b	۳٫۱۵	۱٫۲۵	۰٫۲۴۰
				c	۴۳٫۶۸	۲۰٫۴۱	۰٫۰۰۰
درجه ۳	۰٫۸۵۳	۱۵٫۴۴	۰٫۰۰۱	a	۸٫۲۷	۰٫۶۳	۰٫۵۴۰
				b	-۲۲٫۹۱	-۱٫۵۰	۰٫۱۷۰
				c	۸٫۹۱	۱٫۷۲	۰٫۱۲۰
				d	۳۹٫۵۷	۱۲٫۹۰	۰٫۰۰۰

جدول ۶. طرح‌های اختلاط برای ساخت نمونه‌های آزمایش سری دوم.

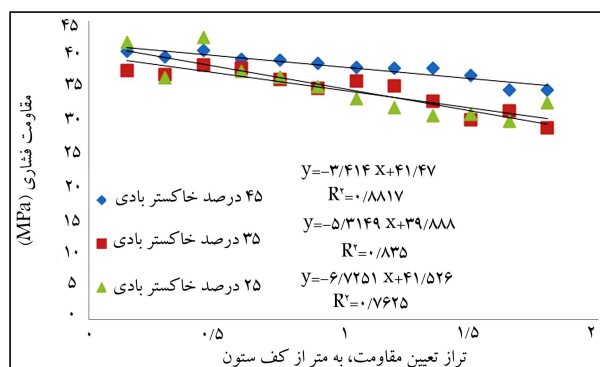
طرح اختلاط	نسبت آب به پودر	آب (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	خاکستر بادی (کیلوگرم)	فوق روان‌کننده (کیلوگرم)
با ۲۵٪ خاکستر بادی	۰٫۳۸	۲۰۰	۴۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۱۳۰	۵٫۶
با ۳۵٪ خاکستر بادی	۰٫۳۸	۲۰۰	۳۴۵	۷۵۰	۸۵۰	۱۸۵	۵٫۲
با ۴۵٪ خاکستر بادی	۰٫۳۸	۲۰۰	۲۹۲	۷۵۰	۸۵۰	۲۳۸	۴٫۵

جدول ۷. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن تر سری دوم.

طرح اختلاط	جعبه‌ی I شکل	قیف V شکل	افزایش زمان قیف V در ۵ دقیقه (s)	قطر جریان اسلامپ (mm)	زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی‌متر (s)
سری دوم با ۲۵٪ خاکستر بادی	۰٫۷۸	۸٫۱۱	+۱٫۰	۷۳۰	۲٫۵۶
سری دوم با ۳۵٪ خاکستر بادی	۰٫۹۲	۸٫۵۴	+۰٫۸۶	۷۱۰	۲٫۸۵
سری دوم با ۴۵٪ خاکستر بادی	۰٫۸۱	۹٫۸۴	+۱٫۰۳	۶۸۰	۳٫۷۳

بادی، مقاومت کاهش یافته است. برای به‌دست‌آوردن ارتباط بین مقاومت فشاری و ارتفاع از کف ستون از تحلیل آماری نتایج استفاده شده است. همچنین همبستگی بین مقاومت و ارتفاع، با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی و تحلیل واریانس به‌دست آمده است. نتایج این تحلیل‌ها، در جدول‌های ۵ الی ۷ ارائه شده‌اند. مدل‌های ریاضی به‌کارگرفته شده نیز در ستون‌های اول این جدول‌ها نشان داده شده‌اند. با عنایت به مطالب مندرج در جدول یادشده باید توجه کرد که آزمون F بیان‌کننده‌ی قبولی و یا ردی مدل ارائه شده است. اگر ضریب مشخص‌کننده‌ی این آزمون (یعنی F Sig.) بزرگ‌تر از مقدار ۰٫۰۵ باشد، مدل ارائه شده مردود و اگر کمتر از مقدار ۰٫۰۵ باشد، مدل ارائه شده قابل قبول است. همچنین آزمون T، صحت ضرایب معادلات را مورد بررسی قرار می‌دهد. اگر ضریب ارائه شده در آزمون T (یعنی T Sig.)، کمتر از ۰٫۰۵ باشد، ضرایب معادله مورد تأیید است و می‌توان از آن معادله به‌عنوان معادله‌ی کالیبراسیون استفاده کرد. از بررسی نتایج مندرج در جدول ۵ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اولاً، معادله‌ی درجه ۳ نسبت به خطی و خطی نسبت به درجه ۲، ضریب تعیین بزرگ‌تری داشته است و نتایج حاصل از تحلیل واریانس (آزمون F) نیز نشان می‌دهند که تمامی مدل‌ها می‌توانند بیانگر رفتار مشاهدات به‌صورت ریاضی باشند. همان‌طور که از نتایج جدول ۸ مشاهده می‌شود، Sig. F در تمامی موارد کوچک‌تر از ۰٫۰۵ بوده است.

اما نتایج آزمون T نشان می‌دهد که فقط ضرایب مدل خطی مورد تأیید هستند و در تعیین مدل نقش مهمی دارند. بنابراین مدل خطی، مدل مناسبی برای برازش نقاط



شکل ۳. مقاومت اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌های سری اول با درصد‌های مختلف خاکستر بادی.

شده و در نتیجه، مقاومتش افزایش یافته است. از آنجا که در مطالعات صورت‌گرفته، تمامی شرایط برای بتن یک ستون، به جز فشارهای وارده از وزن بتن بالای هر تراز یکسان است، دلیل کاهش مقاومت در ترازهای بالاتر را می‌توان به کاهش فشردگی به دلیل کاهش وزن بتن در بالای تراز موردنظر ربط داد. البته هدف از فشردگی بتن، خارج ساختن بیشینه‌ی حباب‌های هوای موجود داخل بتن است، که در ترازهای بالا بیشتر است و در نتیجه، مقاومتش کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از مقایسه‌ی میانگین نتایج به‌دست‌آمده مشاهده کرد که با جایگزینی بیشتر سیمان با خاکستر

جدول ۸. نتایج آزمایش‌های بتن تر بر روی مخلوط‌های سری سوم.

طرح اختلاط سری سوم	قالب L شکل (نسبت ارتفاع)	قیف V شکل (s)	افزایش زمان قیف V در ۵ دقیقه (s)	قطر جریان اسلامپ (mm)	زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی متر (s)
با ۲۵٪ خاکستر بادی	۰٫۸۸	۹٫۱	+۰٫۸۵	۷۱۰	۲٫۱۳
با ۲۵٪ خاکستر بادی و ۱۰٪ آب اضافی	۰٫۹۸	۶٫۱	+۲٫۱	۸۲۰	۰٫۷۶
با ۲۵٪ خاکستر بادی و ۲۰٪ آب اضافی	۱	۳٫۸	+۳٫۲	> ۸۵۰	< ۰٫۵

همانند مواردی که در آزمایش‌های سری اول مشاهده شده است، در این سری از مطالعات و مخلوط‌های بتنی به‌کار گرفته شده نیز برای درصد‌های مختلف خاکستر بادی جایگزین شده به جای سیمان در بتن‌های خودمتراکم، افزایش ارتفاع از کف ستون، باعث کاهش مقاومت بتن شده است. البته به نظر می‌رسد که کاهش این مقاومت‌ها برای تمامی مخلوط‌ها یکسان نیست، ولی اختلاف فاحشی بین آنها به چشم نمی‌خورد. برای به‌دست‌آوردن ارتباط بین مقاومت فشاری و ارتفاع از کف ستون، تحلیل آماری نتایج به عمل آمده و همبستگی بین مقاومت و ارتفاع نیز از تحلیل رگرسیون خطی و تحلیل واریانس حاصل شده است.

از بررسی نتایج و تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل خطی، مدل مناسبی برای برازش نقاط مربوط به نتایج به‌دست‌آمده بوده و برای مخلوط حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی، مقدار کاهش مقاومت به ازاء هر یک متر افزایش در ارتفاع ستون از کف، ۴٫۲۰ مگاپاسکال (معادل ۱۳٫۶٪) است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقدار کاهش مقاومت فشاری به دلیل ازدیاد ارتفاع مربوط به مخلوط حاوی ۳۵٪ خاکستر بادی به ازاء هر یک متر افزایش در ارتفاع ستون، ۲٫۱۷ مگاپاسکال (معادل ۶٫۸٪) و این مقدار برای مخلوط با ۴۵٪ خاکستر بادی، ۱٫۸۳ مگاپاسکال (معادل ۵٫۳٪) است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها و مدل‌های ارائه شده در این بخش نشان می‌دهد که در بتن خودمتراکم با دانه‌بندی پیوسته نیز با افزایش ارتفاع در ستون ساخته شده از بتن خودمتراکم، از مقاومت آن کاسته می‌شود و این کاهش مقاومت را می‌توان به‌طور خطی به یکدیگر ربط داد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر بادی با سیمان، از نرخ کاهش مقاومت به ازاء افزایش ارتفاع کاسته شده است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از سری دوم آزمایش‌ها با نتایج مربوط به سری اول می‌توان اظهار داشت که با پیوسته شدن دانه‌بندی درشت‌دانه‌ها، نرخ کاهش مقاومت در اثر افزایش ارتفاع ستون کمتر شده است. این امر می‌تواند به دلیل پُرشدن بیشتر فضاهای داخلی بتن باشد که ریزدانه‌ها شکاف‌های بین دانه‌ها را بهتر پُر می‌کنند. همچنین می‌توان استنتاج کرد که دلیل عمده‌ی کاهش مقاومت در ارتفاع ستون‌ها، کاهش چگالی بتن به دلیل کاهش وزن بتن بالای تراز موردنظر است.

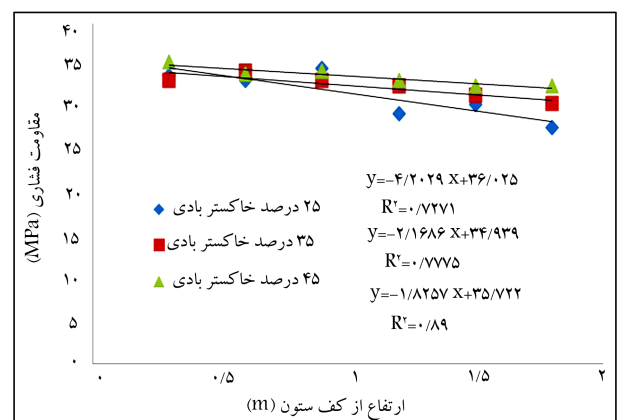
۳.۳. نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌های سری سوم و تحلیل آن‌ها

هدف از انجام آزمایش‌های این مرحله، بررسی تأثیر جدادگی در مقاومت بتن خودمتراکم در ترازهای مختلف است. برای رسیدن به این هدف، باید طرح اختلاط طوری باشد که جدادگی موردنظر اتفاق افتد. لذا طرح اختلاطی که نسبت خاکستر بادی آن از بقیه‌ی طرح‌ها کمتر است و در نتیجه، حساسیتش نیز به تغییرات آب زیادت باشد، انتخاب شده است. پس از ریختن بتن خودمتراکم با طرح اختلاط اولیه به داخل یکی از ستون‌ها، ستون‌هایی با طرح اختلاط قبلی به اضافه‌ی ۱۰ و ۲۰ درصد آب ساخته شده‌اند. طبق معمول آزمایش‌های بتن تر بر روی تمامی مخلوط‌های جدید انجام شده است، که نتایج آن‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. همچنین برای

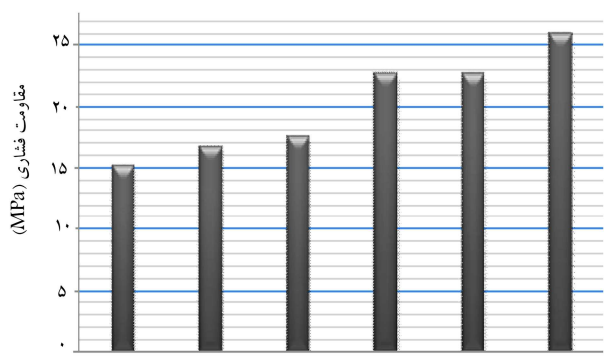
است. شیب منحنی در مدل خطی، که همان مشتق معادله است، بیانگر میزان افت مقاومت نسبت به افزایش ارتفاع ستون از کف است. در مخلوط با ۲۵٪ خاکستر بادی، این شیب برابر با ۶٫۷۲- است؛ یعنی به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون، ۶٫۷۲ مگاپاسکال معادل ۱۸٪ از مقاومت بتن کاسته شده است. همچنین مشاهده می‌شود که مخلوط حاوی ۳۵٪ خاکستر بادی، به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون از کف، ۵٫۳۱ مگاپاسکال (معادل ۱۶٪) کاهش مقاومت داشته و این کاهش برای مخلوط حاوی ۴۵٪ خاکستر بادی، ۳٫۴۱ مگاپاسکال (حدود ۹٪) است. علت این کاهش را شاید بتوان به ویژگی‌های خاکستر بادی ربط داد، که کروی بودن دانه‌های این پودر و ایجاد چسبندگی زیاد و همگنی بیشتر مخلوط بتنی از جمله این ویژگی‌هاست.

۲.۳. نتایج به‌دست‌آمده از انجام آزمایش‌های سری دوم و تحلیل آن‌ها

آزمایش‌های این مرحله در جهت تکمیل نتایج به‌دست‌آمده از مرحله‌ی نخست انجام شده است. در این مرحله با تغییر دانه‌بندی، از نوع دوم سنگ‌دانه‌ها استفاده شده است. می‌توان طرح‌های اختلاط به‌کار گرفته شده در این مرحله را در جدول ۶ مشاهده کرد. نتایج آزمایش‌های مربوط به قابلیت جریان، توانایی پُرکنندگی، و مقاومت در برابر جدادگی بتن‌های تر این سری از آزمایش‌ها نیز در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. پس از اطمینان از خودمتراکم بودن مخلوط‌های موردنظر، با استفاده از طرح‌های اختلاط یادشده، ستون‌ها و نمونه‌های مکعبی موردنظر به تعداد لازم ساخته شده‌اند. پس از گذشت ۲۵ روز از بتن‌ریزی، ستون‌ها به زیر دستگاه بتن بُر منتقل و در ترازهای مشخص برش داده شده‌اند. در سن ۲۸ روزگی، پس از جدا کردن قالب‌های پلاستیکی از اطراف قطعه‌های بریده شده‌ی ستون‌ها، آن‌ها را زیر جک فشاری قرار داده و مقاومت فشاری آن‌ها به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های این مرحله در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. بررسی اجمالی این نتایج، که تغییر مقاومت فشاری ستون‌ها را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد، بیانگر آن است که



شکل ۴. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های سری دوم.



شکل ۷. مقاومت فشاری بتن شاهد (معمولی) در ترازهای مختلف ستون.

خاکستر بادی و ۲۰٪ آب اضافی، برابر ۱۱/۱۲ مگاپاسکال (معادل ۵۴/۸۳٪) است. بررسی کلی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها و مدل‌های ارائه شده در این بخش بیانگر آن است که با افزایش مقدار آب بتن خودمترکم به دلیل ایجاد جداسدگی با افزایش ارتفاع ستون، به شدت از مقاومت بتن ستون کاسته شده است.

۴.۳. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی نمونه‌های بتن معمولی (شاهد)
برای داشتن مقایسه‌ی از عملکرد بتن معمولی و تغییر مقاومت آن در اثر تغییر در ارتفاع ستون ساخته شده از این نوع بتن با بتن خودمترکم و همچنین به دلیل نبود مرجعی در این زمینه، اقدام به ساخت ستونی با بتن معمولی شده است، که طرح اختلاط و مشخصات آن در جدول ۹ نشان داده شده است. مقاومت نمونه‌ی مکعبی این بتن در ۲۸ روز ۳۴/۴ مگاپاسکال است، که بیش از ۳۰٪ از مقاومت همین بتن، بدون اعمال تراکم در کف ستون بیشتر است. پس از تولید بتن تر، بدون تراکم به درون قالب‌های ستون‌ها ریخته شده است. فقط برای خروج حباب‌های درشت هوا پس از ریختن هر لایه با استفاده از چکش، ضرباتی به دیواره‌ی قالب وارد آمده است. پس از ۱ روز روی نمونه با آب پُر شده و پس از ۲۸ روز ستون‌ها در ترازهای مختلف بریده شده و مقاومت آن‌ها با استفاده از جک فشاری به دست آمده است. نتایج به دست آمده از این سری از آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.

بررسی اجمالی شکل ۷، که تغییر مقاومت به دست آمده را در ارتباط با تغییر ارتفاع ستون نشان می‌دهد، بیانگر آن است که افزایش ارتفاع از کف ستون، باعث کاهش مقاومت بتن آن شده است. از آنجا که در نمونه‌های ساخته شده، بتن بدون هیچ تراکمی در داخل قالب‌های ستون‌ها ریخته شد، بنابراین هوای محبوس در داخل بتن امکان خروج نداشته و این عامل در کاهش چشمگیر مقاومت نمونه‌های ستون نسبت به نمونه‌های کنترل که مترکم شده‌اند، مشهود است. تحلیل آماری نتایج مربوط به نتایج نشان داده است که مدل خطی، مدل مناسبی برای برازش نقاط مربوط به نتایج است و میزان افت مقاومت فشاری بتن با افزایش ارتفاع ستون به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون، ۷٫۳۶ مگاپاسکال (معادل ۳۵/۶۲٪) است.

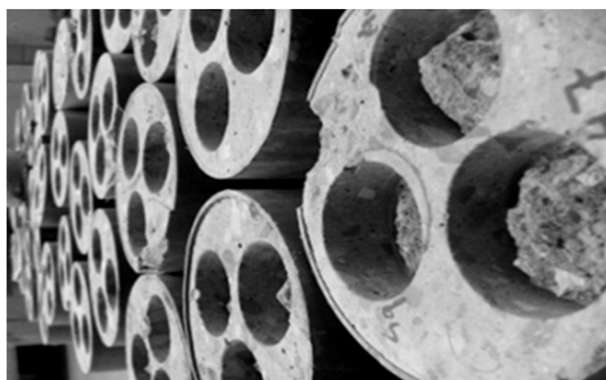
۴. نتیجه‌گیری

از مباحث ارائه شده در این نوشتار می‌توان نتیجه گرفت که:

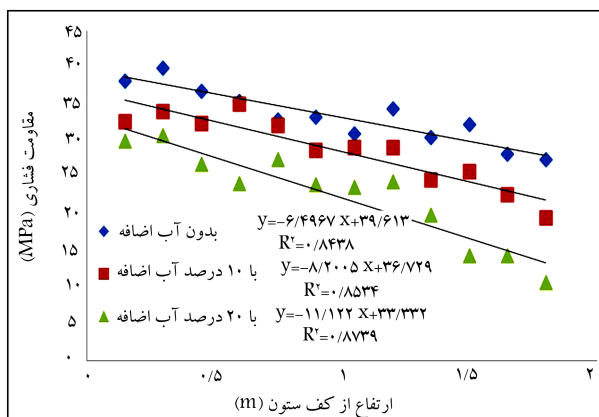
به دست آوردن مقاومت فشاری، از بتن‌های پادشده به تعداد کافی نمونه‌های مکعبی تهیه شده است. همانند سری‌های قبلی، برای به دست آوردن مقاومت بتن مقاطع بریده شده از ستون‌ها، از آزمون «انتقال اصطکاک» استفاده شده است. نمونه‌هایی از قطعات مورد آزمایش قرارگرفته در شکل ۵ نشان داده شده است.

خلاصه‌ی نتایج این سری از آزمایش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی اجمالی شکل ۶، که تغییر مقاومت به دست آمده را در ارتباط با تغییر ارتفاع ستون از کف نشان می‌دهد، بیانگر آن است که برای درصدهای مختلف آب اضافی به کار گرفته شده، افزایش ارتفاع از کف ستون باعث کاهش مقاومت بتن آن شده است. همچنین از نتایج نشان داده شده در شکل ۶ پیداست که شدت کاهش مقاومت فشاری، که با افزایش ارتفاع از کف ستون رخ می‌دهد، برای مخلوط‌های موردنظر یکسان نیست و با ازدیاد مقدار آب اضافه شده، کاهش مقاومت نیز افزایش یافته است. همچنین از نتایج شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که طبق انتظار، افزایش آب باعث کاهش مقاومت بتن‌های مذکور شده است.

از تحلیل آماری انجام شده بر روی نتایج این بخش و نتایج مندرج در جدول ۸ مشاهده می‌شود که مدل خطی، مدل مناسبی برای برازش نقاط مربوط به نتایج است و مقاومت فشاری بتن با افزایش ارتفاع ستون از کف آن کاهش یافته است. این کاهش برای مخلوط حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون، ۶٫۵۰ مگاپاسکال (معادل ۱۹/۸۵٪) و برای مخلوط حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی و ۱۰٪ آب اضافی، به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون، ۸٫۲۰ مگاپاسکال (معادل ۳۱/۵۴٪) و برای مخلوط حاوی ۲۵٪



شکل ۵. قطعه‌های استوانه‌ی بریده شده از ستون‌ها پس از انجام آزمون «انتقال اصطکاک».



شکل ۶. نتایج مقاومت نمونه‌های سری سوم حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی.

جدول ۹. طرح اختلاط و مشخصات بتن سخت شده نمونه‌ی شاهد در ۱ متر مکعب.

نمونه	نسبت آب به سیمان	آب (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	مقاومت فشاری
بتن شاهد (معمولی)	۰/۴۵	۱۹۲	۴۲۶	۱۱۰۰	۷۰۰	۲۸ روزه ۳۴/۴

۱. در ستون‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم، با افزایش ارتفاع از مقاومت فشاری آن‌ها کاسته می‌شود و رابطه‌ی بین ارتفاع و مقاومت را می‌توان خطی در نظر گرفت.
۲. در ستون‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم با درشت دانه‌ی گسسته، که به ترتیب حاوی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد خاکستر بادی بودند، کاهش مقاومت به ازاء افزایش ۱ متر ارتفاع به ترتیب برابر با ۱۸، ۱۶ و ۹ درصد بوده است، یعنی افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی خاکستر بادی به جای سیمان، به ترتیب ۲ و ۹ درصد کاهش مقاومت را کم کرده است. علت این کاهش را شاید بتوان به ویژگی‌های خاکستر بادی ربط داد، که کروی بودن دانه‌های این پودر و ایجاد چسبندگی زیاد و همگنی بیشتر مخلوط بتنی از جمله‌ی این ویژگی‌هاست.
۳. در ستون‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم دارای درشت دانه‌ی پیوسته، که به ترتیب حاوی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد خاکستر بادی بود، کاهش مقاومت به ازاء افزایش ۱ متر ارتفاع به ترتیب برابر با ۱۳/۶، ۶/۸ و ۵/۳ درصد بوده است، یعنی افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی خاکستر بادی به جای سیمان، به ترتیب ۶/۸ و ۸/۳ درصد کاهش مقاومت را کم کرده است.
۴. در بتن خودمتراکم با دانه بندی پیوسته تأثیر افزایش خاکستر بادی در کاهش مقاومت، کمتر از تأثیر آن در بتن خودمتراکم با دانه بندی گسسته بوده است.
۵. کاهش مقاومت به ازاء هر ۱ متر افزایش ارتفاع برای ستون‌های ساخته شده از بتن خودمتراکم حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی که ۱۰ و ۲۰ درصد آب اضافه داشته است، به ترتیب برابر با ۱۹/۸۵، ۳۱/۵۴ و ۵۴/۸۳ درصد بوده است.
۶. میزان افت مقاومت فشاری بتن معمولی (غیر خودمتراکم) بدون اعمال فشردگی به ازاء هر ۱ متر افزایش در ارتفاع ستون، ۳۵/۶۲٪ بوده است.
۷. دلیل اصلی کاهش مقاومت بتن‌های مورد مطالعه (خودمتراکم و معمولی) در ارتفاع ستون‌ها، عدم وجود فشردگی کافی در نتیجه‌ی وجود هوا در داخل بتن و کاهش چگالی آن بوده است.

تقدیر و تشکر

شایسته است که از مسئولان محترم دانشگاه به خاطر فراهم آوردن امکانات لازم برای انجام این پژوهش‌ها، تشکر و قدردانی شود.

منابع (References)

- Cusson, D. and Paultre, P. "High-strength concrete columns confined by rectangular ties", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **120**(3), pp. 783-804 (1994).
- ACI 352R-02, "Recommendations for design of beam column connections in monolithic reinforced concrete structures", Joint ACI-ASCE Committee 352, Technical Committee Document 352R-02, 37 p. (2002).
- Khayat, K.H., Paultre, P. and Tremblay, S. "Structural performance and in-place properties of self-consolidating concrete used for casting highly reinforced columns", *ACI Materials Journal*, **98**(5), pp. 371-378 (2001).
- Elchalakani, M., Zhao, X.-L. and Grzebieta, R. "Tests on concrete filled double-skin (CHS outer and SHS inner) composite short columns under axial compression", *Thin-Walled Structures*, **40**(5), pp. 415-441 (2002).
- Han, L.-H., Tao, Z., Huang, H. and Zhao, X.-L. "Concrete-filled double skin (SHS outer and CHS inner) steel tubular beam-columns", *Thin-Walled Structures*, **42**(9), pp. 1329-1355 (2004).
- Zhao, X.-L., Han, B. and Grzebieta, R.H. "Plastic mechanism analysis of concrete-filled double-skin (Shs inner and Shs outer) stub columns", *Thin-Walled Structures*, **40**(10), pp. 815-833 (2002).
- Tao, Z., Han, L.-H. and Zhao, X.-L. "Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns", *Journal of Constructional Steel Research*, **60**(8), pp. 1129-1158 (2004).
- Han, L.-H. and Yao, G.-H. "Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC)", *Thin-Walled Structures*, **42**(9), pp. 1357-1377 (2004).
- Liua, D. and Ghob, W.-M. "Axial load behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel tubular stub columns", *Thin-Walled Structures*, **43**(8), pp. 1131-1142 (2005).
- Han, L.-H., Yao, G.-H. and Zhao, X.-L. "Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC)", *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(9), pp. 1241-1269 (2005).
- Han, L.-H., Tao, Z., Huang, H. and Zhao, X.-L. "Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending", *Engineering Structures*, **28**(12), pp. 1698-1714 (2006).

12. Tao, Z. and Han, L.-H. "Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns", *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(7), pp. 631-646 (2006).
13. Baig, M.N., Jiansheng, F.A.N. and Jianguo, N.I.E. "Strength of concrete filled steel tubular columns", *Tsinghua Science & Technology*, **11**(6), pp. 657-666 (2006).
14. Yu, Z.-W. Ding, F.-X. and Cai, C.S. "Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns", *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(2), pp. 165-174 (2007).
15. Tao, Z., Han, L.-H. and Wang, D.-Y. "Experimental behavior of concrete-filled stiffened thin walled steel tubular columns", *Thin-Walled Structures*, **45**(5), pp. 517-527 (2007).
16. Mohanraj, E.K. and Kandasamy, S. "Experimental behaviour of Axially loaded slender hollow steel columns in-filled with concrete", *Journal-Institution of Engineers India PART PE Production Engineering Division*, **88**(B), 23 pp. (2008).
17. Lin, C.-H., Hwang, C.-L. and Lin, S.-P. "Self-consolidating concrete columns under concentric compression", *Structural Journal*, **105**(4), pp. 425-432 (1 July 2008).
18. Corley, W.G. "Ductility of columns, walls, and beams-how much is enough?", *American Concrete Institute, Proceedings of the Thomas Paulay Symposium on Recent Developments in Lateral Force Transfer in Buildings*, SP-157, La Jolla, California, pp. 331-350 (1995).
19. Kheder, G.F. and Al Jadiri, R.S. "New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements", *ACI Materials Journal*, **107**(5), pp. 490-497 (2010).
20. EN 197-1: Cement – Part 1: Composition, Specification and Conformity Criteria for Common Cements.
21. N 206-1: Concrete – Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity.
22. EN 934-2: Admixtures for Concrete, Mortar and Grout – Part 2: Concrete Admixtures.
23. EN 12350-2 Testing Fresh Concrete – Part 2: Slump Test.
24. EN 12350-8 Testing Fresh Concrete – Part 8: Slump Flow Test.
25. EN 12350-9 Testing Fresh Concrete – Part 9: V – Funnel Test.
26. Lange, D.A. "Self consolidating concrete", A White Paper by Researchers at The Center of Advanced Cement Based Materials (ACBM) (February 2007).
27. Naderi, M. "Friction-transfer test for the assessment of in-situ strength and adhesion of cementitious materials", *Construction and Building Materials* (2005).
28. Naderi, M. "The use of friction-transfer method in prediction of in-situ strength of concrete", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, **33**(2B), pp. 337-341 (October 2008).