



Research Article

Evaluation of the Effect of Fly Ash and Silica Fume on Slump and Workability Retention of Self-Compacting Concrete for the Diaphragm Wall of Shahid Rajaei Port in Bandar Abbas

Seyed Majdaldin Hoseini ^{1*}

^{1*} - Master's in Civil Engineering Construction Management

Received: 01 May 2025; Revised: 07 June 2025; Accepted: 16 June 2025; Published: 23 July 2025

Abstract

With the aim of simultaneously achieving proper performance, high strength and high density in conventional concrete, the use of self-compacting concrete (SCC) was inevitable for the diaphragm walls of the second phase of the Shahid Rajaei Port Development Project. These three characteristics, both in fresh and hardened concrete, were crucial for the implementation of the main T-shaped wall of this project. For this purpose, the effect of fly ash and silica fume pozzolans on self-compacting concrete to achieve high performance and maintain its fluidity for a maximum of 6 hours and the 28-day compressive strength of the design (at least 450 kg/cm²) was investigated by preparing 8 mixing plans. For assessing the concrete's flowability, the standard slump flow test according to ASTM C143 was employed. This test was repeated 7 times, with initial slump measurements taken at the time of production for each mix design, and subsequently at hourly intervals to monitor workability retention, up to a maximum of 6 hours. For compressive strength, four 15x15x15 cm cubic specimens were prepared for each mix design based on BS 1881 and ASTM C31. The results ultimately indicated that all mix designs incorporating 24% fly ash performed better in terms of 28-day compressive strength and slump compared to designs containing 5% to 7.5% silica fume. Among these, Mix Design B achieved the best results with a 13% increase in strength and 50% improvement in workability and slump retention (which was of particular importance to the project), demonstrating excellent compatibility with the operational requirements for casting the diaphragm wall of the Shahid Rajaei Port.

Keywords: Fly ash, Silica fume, Slump, Self-compacting concrete, Diaphragm wall, Shahid Rajaei Port

Cite this article as: Hoseini, S. M. (2025). Evaluation of the Effect of Fly Ash and Silica Fume on Slump and Workability Retention of Self-Compacting Concrete for the Diaphragm Wall of Shahid Rajaei Port in Bandar Abbas. (e223289). Civil and Project, 7(5), e223289 <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.527672.1375>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: majdhoseini@gmail.com



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی تاثیر خاکستر بادی و دوده سیلیسی بر روی اسلامپ و حفظ روانی بتن خود متراکم دیواره دیافراگمی اسکله شهید رجایی بندرعباس

سیدمجدالدین حسینی^{*۱}

*۱- کارشناسی ارشد عمران مهندسی مدیریت ساخت

تاریخ دریافت: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۶ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مرداد ۱۴۰۴

چکیده

با هدف دستیابی همزمان به کارایی مناسب، مقاومت و تراکم بالا و عدم حصول این موارد در بتن معمولی، استفاده از بتن خودمتراکم (SCC) برای دیواره‌های دیافراگمی مجتمع طرح توسعه بندری شهید رجایی اجتناب‌ناپذیر و داشتن این خصوصیات سه‌گانه، در بتن تازه و بتن سخت‌شده، برای اجرای دیواره اصلی T شکل این پروژه حیاتی بود، بدین منظور اثر پوزولان‌های خاکستربادی و دوده سیلیسی بر روی بتن خود متراکم جهت کسب کارایی بالا و حفظ روانی آن حداکثر تا ۶ ساعت و مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح (حداقل ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) با تهیه ۸ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا برای روانی بتن از آزمایش رایج جریان اسلامپ طبق ASTM C143 استفاده شد. این آزمایش در ۷ مرتبه تکرار و اسلامپ اولیه در زمان تولید هر طرح اختلاط اندازه‌گیری و سپس در فواصل یک ساعته تا زمان حفظ کارایی و نهایتاً تا ۶ ساعت انجام گرفت. و برای مقاومت فشاری بر اساس BS 1881 و ASTM C31 برای هر طرح ۴ نمونه مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ سانتیمتر نمونه برداری و در نهایت نتایج نشان داد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه و اسلامپ تمامی طرح‌های با ۲۴ درصد خاکستربادی در مقایسه با طرح‌های دارای ۵ تا ۷٫۵ درصد دوده سیلیسی بهتر عمل نموده و در بین آنها طرح B با ۱۳ درصد افزایش مقاومت و ۵۰ درصد روانی و حفظ اسلامپ (که اهمیت خاصی در پروژه داشت) بهترین نتیجه را کسب نمود و تطابق خوبی با شرایط کاری جهت اجرای بتن ریزی دیواره دیافراگمی اسکله شهید رجایی داشته است.

کلمات کلیدی:

خاکستربادی، دوده سیلیسی، اسلامپ، بتن خود متراکم، دیواره دیافراگمی، اسکله شهید رجایی

۱- مقدمه

بتن خودتراکم^۱ SCC به دلیل ویژگی‌های رئولوژیکی عالی و قابلیت ساخت بهبود یافته، در ساخت و سازه‌های معاصر به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است (Ghodratnama et al., 2025). طبق تعریف انجمن بتن ایالات متحده بتن خودتراکم «بتنی با کارایی زیاد و عدم جداسدگی است که می‌تواند در محل مورد نظر ریخته شده، فضای قالب را پر کند و اطراف آرماتورها را بدون نیاز به تراکم مکانیکی فرا بگیرد». بطور کلی بتن خودتراکم با مصالح بتن معمولی ساخته می‌شود و در برخی موارد برای ساخت آن علاوه بر مقادیر نسبتاً زیاد روان‌کننده، از افزودنی لزجت دهنده نیز استفاده می‌شود (B,R ACI 237,2007). خواص بتن تازه در بتن‌های خودتراکم از حساسیت بیشتری نسبت به انواع دیگر برخوردار است، زیرا که مزایای این بتن عمدتاً ناشی از خواص آن در حالت تازه است و به همین دلیل نیز آزمایش‌های خاصی برای ارزیابی رفتار بتن خودتراکم تازه بکار گرفته می‌شود. بتن خودتراکم در حالت تازه عموماً با سه ویژگی زیر شناخته می‌شود:

- ✓ قابلیت پرکردن (توانایی پر کردن تمامی فضای خالی موجود (فضای قالب) را داشته باشد)
- ✓ قابلیت عبور (توانایی جریان یافتن تحت وزن خود را داشته باشد)
- ✓ مقاومت در برابر جداسدگی (پایداری) (توانایی ایجاد یک مصالح متراکم و به اندازه کافی همگن، بدون نیاز به انجام عملیات تراکم را داشته باشد) (De.Schutter et al., 2008).

همانگونه که جریان‌پذیری ناکافی باعث می‌شود ریختن و پر کردن یکنواخت قالب دشوار شود که منجر به نقص‌های ساختمانی مانند حفره لانه زنبوری یا نمایان شدن میلگردها می‌گردد و این موارد بر عملکرد بلندمدت بتن مسلح تأثیر می‌گذارند (Bo Zhou & Yuichi, 2017) اگر روانی بیش از حد بالا باشد، اگرچه ساخت و ساز را آسان‌تر می‌کند، اما ممکن است به راحتی منجر به مشکلات پایداری در مخلوط بتن شود و باعث جدایی و تأثیر بر کیفیت بتن سخت شده گردد (Yuxin & Qing-feng, 2023), (Y.Cai & Q.Liu, 2023). طرح اختلاط و خواص مواد اولیه در شرایط کاری مختلف متغیر است و حتی یک تغییر کوچک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روانی مخلوط‌های بتن داشته باشد (L.Yang et al., 2021), (I.C Yeh, 2007).

دیوارهای دیافراگمی یا دوغابی: دیوارهای بتنی مسلح یا غیرمسلح ساخته شده در زیر تراز سطح زمین هستند که به منظور نگهداری دیواره‌ی گودها یا آب‌بندی کف سدها و مواردی که اجرای دیوارهای طولی کم‌عرض و عمیق در زیر سطح خاک مورد نیاز باشد، اجرا می‌شوند. برای احداث این دیوارها عموماً از دستگاه هیدروفورز یا دستگاه گراب که از مهمترین دستگاه‌های حفاری در ساخت دیوارهای دیافراگمی هستند استفاده می‌شود. دیوارهای اصلی با ارتفاع ۳۶ متری و T شکل اسکله شهید رجایی ابتدا توسط دستگاه‌های حفاری ویژه (grab) باتوجه به شرایط زمین و خاک و سطح آب دریا همزمان با حفاری جهت پایداری جداره دیواره حفاری شده و جلوگیری از ریزش‌های موضعی از دوغاب بنتونیت استفاده گردیده است، تشکیل کیک بنتونیت در داخل دیواره حفاری شده و نفوذ در لایه‌های دانه‌ای جداره باعث می‌گردد جداره همواره پایدار بماند و سپس بلافاصله پس از رسیدن به عمق مورد نظر که 31m CD- می‌باشد آرماتور گذاری شده و در نهایت بتن ریزی می‌گردد. بتن ریزی در این روش با استفاده از لوله‌های ترمی انجام می‌گیرد. لوله ترمی، لوله‌ای است که به وسیله آن بتن در تراز پایین پانل ریخته می‌شود و معمولاً لوله ترمی ۲ متر در بتن قرار دارد و با افزایش میزان بتن ریخته شده بالا کشیده می‌شود، با توجه به وزن مخصوص بالای بتن نسبت به بنتونیت، سبب بالا آمدن بنتونیت گردیده و معمولاً بنتونیت بالا آمده برای استفاده مجدد جمع‌آوری و تصفیه می‌گردد.

¹ Self Compact Concrete

اجرای پانل‌های عمیق (دیوارهای دیافراگمی) مستلزم استفاده از بتن خودمتراکم برای بتن‌ریزی در اعماق زیاد با لوله ترمی است. با توجه به احتمال بروز مشکلات اجرایی و تأخیر در عملیات بتن‌ریزی، بتن خودمتراکم مورد استفاده در طرح باید پس از تولید نیز تا زمان رفع مشکل قابل استفاده باقی بماند. در این راستا، دو عامل مهم در بتن تازه باید مدنظر قرار گیرد: نخست، دمای بتن که نباید از حد مجاز تجاوز کند. دوم، حفظ کارایی مورد نیاز بتن خودمتراکم شامل روانی بالا، قابلیت عبور مناسب و مقاومت کافی در برابر جدایش، به منظور استفاده موفقیت آمیز از آن را داشته باشد (Soo et al., 2006), (Europaeen.F, 2002). با توجه به افزایش شهرنشینی و رشد سریع صنعت ساخت و ساز در سراسر جهان، سیمان به یکی از پرمصرف ترین مصالح ساختمانی تبدیل شده است (Ige et al., 2022). سیمان، جزء اصلی بتن است. ماده‌ای که به طور گسترده در ساخت و ساز به کار می‌رود. تولید سیمان تقریباً ۸ درصد از انتشار جهانی کربن را به خود اختصاص می‌دهد و این امر نیاز فوری به جایگزین‌های پایدار را ایجاد می‌کند (Gautam et al., 2025). از آنجایی که تولید سیمان یکی از بزرگترین عوامل انتشار گاز CO₂ در اتمسفر است، از خاکستر بادی (FA) به عنوان جایگزین سیمان در بتن استفاده می‌شود (Omer et al., 2024). به منظور کاهش اثرهای زیست محیطی و کاهش عیار سیمان، از پوزولان به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان استفاده می‌شود. استفاده از پوزولان، مقاومت فشاری و کششی بتن را بهبود می‌بخشد (Pachideh et al., 2020). در سال‌های اخیر استفاده از انواع مختلف مواد افزودنی مانند دوده سیلیسی و خاکستر بادی در بتن برای بالا بردن خواص مهندسی بتن خودمتراکم به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است اضافه کردن این مواد افزودنی به مخلوط باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام بتن می‌شود (Mazloom et al., 2004). از سوی دیگر با استفاده از مواد پوزولانی و کاهش مصرف سیمان باعث حرارت‌زایی کمتر در زمان هیدراتاسیون و کاهش دما بتن می‌شود، همچنین خواص بتن تازه از جمله گیرش بتن مستقیماً تحت تاثیر مواد افزودنی است (Nili, 2015). "بابایی و همکاران (۱۴۰۱) جایگزین نمودن میکروسیلیس و خاکستر بادی به جای سیمان در بتن به طور کلی باعث افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن گردید". ویژگی‌های رئولوژی بتن خودتراکم به دلیل پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی که با گذشت زمان رخ می‌دهند، پیوسته در حال تغییر و تکامل است. این روند توسط دو فرآیند تشکیل ساختار بازگشت پذیر (تغلیظ پذیری) و هیدراتاسیون غیر قابل بازگشت دانه‌های سیمان رخ می‌دهد و منجر به کاهش کارایی بتن می‌شود (Lecompte & Perrot, 2017). "Mokal et. Al (2023) در مطالعه‌ای تأثیر جایگزینی سیمان پرتلند با خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌دازی بر دمای پیک، مقاومت فشاری و دوام بتن حجیم مقاومت بالا را بررسی کردند. آنها از درصد‌های بالای مختلف خاکستر بادی و سرباره استفاده کردند. با تجزیه و تحلیل نتایج، مشاهده شد که استفاده از سرباره و خاکستر بادی با حجم بالا، پیک دما ۱۱ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد کاهش و مقاومت فشاری ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش یافت؛ همچنین افزایش دوام بتن نیز مشاهده شد". Luo et al. (2023) استفاده از سرباره فولاد و خاکستر بادی به عنوان کنترل کننده حرارت هیدراتاسیون و همچنین تأثیر آن بر کارایی، دوام و مقاومت در بتن حجیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سرباره فولاد در مقایسه با خاکستر بادی کاهش گرمایی بهتر، تخلخل کمتر، کاهش روانی کندتر و مقاومت فشاری بهتری را نشان می‌دهد". "شعاعی و همکاران (۱۴۰۳) دوده‌سیلیس در بالاترین مقدار خود یعنی ۱۵ درصد بهترین جواب را برای افزایش عمر و سازگاری با محیط زیستی داراست". "Pournoori et. al (2024) در پژوهش خود شیشه سکوریت ضایعاتی (WGCA) را به عنوان سنگدانه درشت با نسبت‌های مختلف ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ در فرمولاسیون بتن خودتراکم سازگار با محیط زیست (SCC) جایگزین سنگدانه درشت طبیعی (NCA) شد و با الیاف فولادی قلاب‌دار (SFs) در حجم‌های مختلف ترکیب شد. نتایج نشان داد که افزایش محتوای SF و WGCA، قطر جریان اسلامپ و نسبت انسداد را به ویژه در سطوح بالاتر کاهش می‌دهد". باتوجه به ساختار دیواره دیافراگمی اصلی اسکله شهید رجایی بندرعباس که تا عمق 31m CD- حفاری، آرماتورگذاری و بتن‌ریزی هر پانل با فاصله ۲۳۰ متر مکعب بتن خودتراکم انجام می‌شود، و همچنین به دلیل پیچیدگی‌ها و مشکلات احتمالی حین عملیات بتن‌ریزی، بتن باید تا زمان رفع مشکل حداکثر ۶ ساعت بدون افت اسلامپ یا افت مختصر و با حفظ خواص بتن تازه، کیفیت بتن سخت شده را نیز تضمین کند. این تحقیق ضمن مطالعه تحقیقات پیشین به بررسی تأثیر خاکستر بادی و دوده‌سیلیسی بر کارایی بتن خودتراکم، همراه با

دستیابی به مقاومت فشاری مناسب پرداخته و عدم کارایی لازم بتن با جایگزینی ۵ تا ۷٫۵ درصد پوزولان دوده سیلیسی تا ۶ ساعت را در مقایسه با جایگزینی ۲۴ درصد خاکستر بادی بطور واضح نشان داد.

۲- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱- پوزولان ها

۲-۱-۱- خاکستر بادی

خاکستر بادی گونه ای از پوزولان است که از استخراج گازهای خروجی کوره های آتش با سوخت زغال سنگ و سیلت غیر پلاستیک حاصل می گردد و جزء مصالح زائد نیروگاه های حرارتی می باشد که توسط فیلترهای مخصوص، به صورت غبار جمع آوری می شود. حدود ۸۵ درصد ذرات این ماده از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن، کلسیم و منیزیم تشکیل می شود (بی دست، ۲۰۱۴). تحلیل آزمایش کربناسیون تسریع شده نشان داد که افزودن FA به مخلوط بتن منجر به عمق کربناسیون کمتر و انتشار کندتر دی اکسید کربن (CO₂) به داخل بتن می شود (Gaikwad et al., 2025).

باتوجه به تحقیقات اخیر، علاوه بر منافع اقتصادی و محیط زیستی، استفاده از خاکستر بادی در بتن دوام و کارایی بتن را بهبود می بخشد، آب انداختن بتن، حرارت تولید شده و نفوذپذیری را کاهش داده، ضمن جلوگیری از واکنش قلیایی سنگدانه بتن، مقاومت سولفاته شدن را افزایش می دهد (Helmuth, 1987). آثار مطلوب این ماده در بهبود خواص بتن تازه و سخت شده باعث مصرف روزافزون آن در دنیا شده است.

خاکسترهای بادی از نقطه نظر ترکیبات شیمیایی و اساساً در مقدار کلسیم با هم تفاوت دارند و به دو گروه تقسیم می شوند. خاکسترهای گروه اول Class F دارای کمتر از ۱۰ درصد CaO تجزیه ای بوده و به طور کلی، محصول احتراق آنتراسیت و زغال سنگ قیری هستند و خاکسترهای گروه دوم Class C معمولاً دارای ۱۵ تا ۳۵ درصد CaO تجزیه ای هستند و به طور کلی، محصول احتراق لیگنیت و زغال سنگ نیمه قیری هستند. طبق استاندارد ASTM C618 41 به دلیل میزان کمتر از ۶٪ CaO است و محتوای ترکیبی SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ بیش از ۷۰٪ است (Shojamoghadam et al., 2024). بر اساس آنالیز شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده در این پروژه از خاکستر Class F واردات از کشور هندوستان استفاده شده است.

خاکستر بادی کلاس F

خاکستر بادی کم کلسیم، به خاطر نسبت های زیاد سیلیس و آلومین آن، اصولاً شامل شیشه های آلومینوسیلیکات است. کانی های متبلور اصلی در خاکسترهای بادی کم کلسیم، کوارتز، مولیت و هماتیت یا سنگ آهن مغناطیسی هستند. از آنجایی که این کانی های متبلور در دمای معمولی غیر واکنش زا هستند، وجود آنها در نسبت های زیاد، به قیمت اجزای غیر متبلور یا شیشه ای در خاکستر بادی، تمایل به کاهش واکنش زایی خاکستر بادی دارد.

خاکستر بادی کلاس C

در مقایسه با خاکسترهای بادی کم کلسیم، انواع با کلسیم زیاد آن عموماً واکنش زایی بیشتری دارند، زیرا اکثر حاوی کلسیم های به شکل ترکیبات واکنش زای متبلور مانند A^۳C, CS هستند. همچنین ماده اصلی تشکیل دهنده (یعنی فاز غیر متبلور) دارای یون های کلسیم کافی برای زیادتر کردن واکنش زایی شیشه آلومینوسیلیکاتی است.

۲-۱-۲- میکروسیلیس

میکروسیلیس یک محصول فرعی حاصل از کوره های قوس الکتریکی می باشد. این ماده با داشتن بیش از ۹۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی و به شکل ذرات بی نهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون شدیداً پوزولانی است و بین مواد پوزولانی یکی از فعال ترین آنهاست. تفاوت اساسی بین میکروسیلیس و پوزولان های معمولی مانند خاکستر بادی (Fly Ash)، خاکستر آتشفشانی و رس کلسینه شده این است که فعالیت پوزولانی میکروسیلیس زودتر از پوزولان های فوق قابل حصول است. میکروسیلیس به واسطه شکل و اندازه ذراتش (با ریزی بسیار زیاد و فعالیت پوزولانی قابل ملاحظه بر ایجاد واکنش های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم سبب کاهش تخلخل و نفوذ پذیری و افزایش دوام و مقاومت در بتن ها می شود)، میکروسیلیس یک سوپر پوزولان است

که در صورت کاربرد درست ضمن فعل وانفعالات پوزولانی دوده سیلیسی تاثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری و در نتیجه دوام سازه‌های بتنی دارد. میکروسیلیس در حرارت‌زایی بتن تا حد زیادی ناشی از همان مکانیزم‌هایی است که باعث افزایش دوام و مقاومت بتن می‌شود، در حقیقت خواص پرکنندگی و واکنش پوزولانی میکروسیلیس می‌تواند به کاهش میزان حرارت‌زایی بتن کمک کند. حرارت‌زایی ۱ گرم میکروسیلیس بیشتر از ۱ گرم سیمان پرتلند معمولی است و در مواردی بیشتر از ۲ برابر آن خواهد بود. اما مقاومت‌زایی بالاتر میکروسیلیس (حدود ۲ تا ۴ برابر سیمان) است که امکان کاهش مقدار کل مواد سیمانی بتن جهت دستیابی به یک مقاومت مشخص را فراهم نموده و بدین ترتیب استفاده از میکروسیلیس می‌تواند باعث کاهش حرارت‌زایی بتن شود. افزودن میکروسیلیس به بتن ممکن است کارایی آن را کاهش دهد. با این حال، با استفاده از مقدار مناسبی از روان‌کننده ممتاز، نه تنها کارایی بتن بهبود می‌یابد، بلکه یکنواختی بافت آن نیز افزایش پیدا می‌کند. این امر مشروط به انتخاب و مصرف دقیق روان‌کننده و نحوه و طرح اختلاط مناسب خواهد بود.

وزن مخصوص دوده سیلیس حدود ۲/۲ است. پوزولان و سیمان پرتلند یا به صورت دانه و کلینکر در آسیا مخلوط و آسیاب می‌شود و یا به صورت پودر مخلوط می‌شوند و یا اینکه در مخلوط کن در هنگام ساخت بتن ریخته می‌شوند. بنابراین روش‌های کاربرد پوزولان مانند سرباره آهن گدازی می‌تواند متنوع باشد. میکروسیلیس و نانو سیلیس و ژل آن به عنوان یک ماده مکمل نقش اساسی را در افزودن مقاومت بتن سبک و بهبود خواص دیگر آن ایفا می‌کند. میکروسیلیس با ریزی بسیار زیاد و فعالیت پوزولانی قابل ملاحظه بر ایجاد واکنش‌های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم سبب کاهش تخلخل و نفوذ پذیری و افزایش دوام و مقاومت در بتن‌ها می‌شود. در این تحقیق به عینه دیده شد که افزودن میکروسیلیس به بتن کارایی آن را کاهش می‌دهد و مصرف میکروسیلیس در بتن دقت در تمام جزئیات اجرایی را ایجاب می‌نماید.

۳-۱-۲- نانو سیلیس

ذرات نانو سیلیس دارای واکنش پوزولانی مؤثرتری نسبت به میکروسیلیس می‌باشد. بنابراین اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم به شکل چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و مقاومت اولیه خمیر سیمان سخت شده افزایش می‌یابد. اضافه کردن نانو سیلیس باعث افزایش گرمادهی و تسریع در مراحل گیرش و سخت شدن سیمان می‌شود (K.L. Lin et al., 2008). می‌توان انتظار داشت که نانو سیلیس، نه تنها به عنوان فیلر می‌تواند ریز ساختارهای ملات سیمان را بهبود بخشد بلکه می‌تواند به عنوان ارتقاء دهنده واکنش پوزولانی نیز عمل کند (رحمانی، ۲۰۱۵).

۴-۱-۲- روان کننده

روان کننده یا کاهنده آب بتن که بر پایه نفتالین سولفونات است. روان کننده بتن بر پایه تکنولوژی تولید پلیمرها تولید می‌شود، و سوپر روان کننده بتن یا ابر روان کننده بتن بر پایه پلی کربوکسیلات اصلاح شده است که برای تولید بتن‌های خودتراکم و فوق روان مناسب می‌باشد. در این پژوهش روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات از شرکت آروین پادیر تهران تهیه و استفاده شده که آنالیز آن در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- نتایج آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و دانه بندی اجزاء تشکیل دهنده بتن

برای ساخت بتن از آب شرب معمولی، فوق روان کننده با مشخصات جدول ۱، سیمان پرتلند نوع ۲، فلی اش، سوپر فلائی اش، میکرو سیلیس، ژل نانو سیلیس با مشخصات شیمیایی طبق جدول ۲، مصالح سنگی با مشخصات شیمیایی جدول ۳ و مشخصات فیزیکی جدول ۴ و منحنی دانه بندی ماسه ۶-۰ شکل ۱، منحنی دانه بندی شن ۱۵-۵ شکل ۲ و منحنی دانه بندی ۲۵-۱۵ شکل ۳ استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی، فیزیکی فوق روان کننده مصرفی

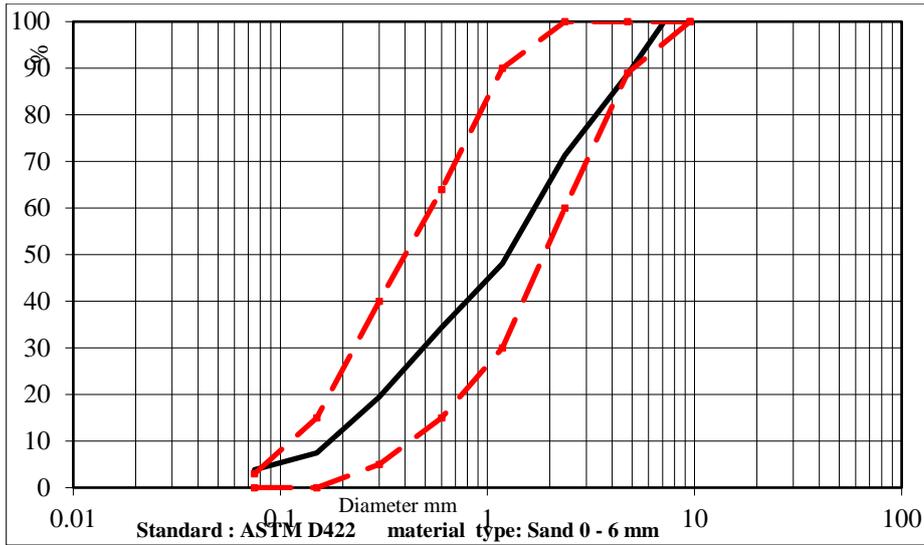
نسل جدید سوپرپلاستی سائزر بر پایه پلی کربوکسیلات	
ماید	نوع
زرد	رنگ
۰,۰۲ ± ۱,۰۸۵	دانسیته
۲±۶	PH
≤/۱,۰	درصد سدیم (Na2o)
≤/۱,۰	درصد کلر (Cl)

جدول ۲: مشخصات شیمیایی مصالح

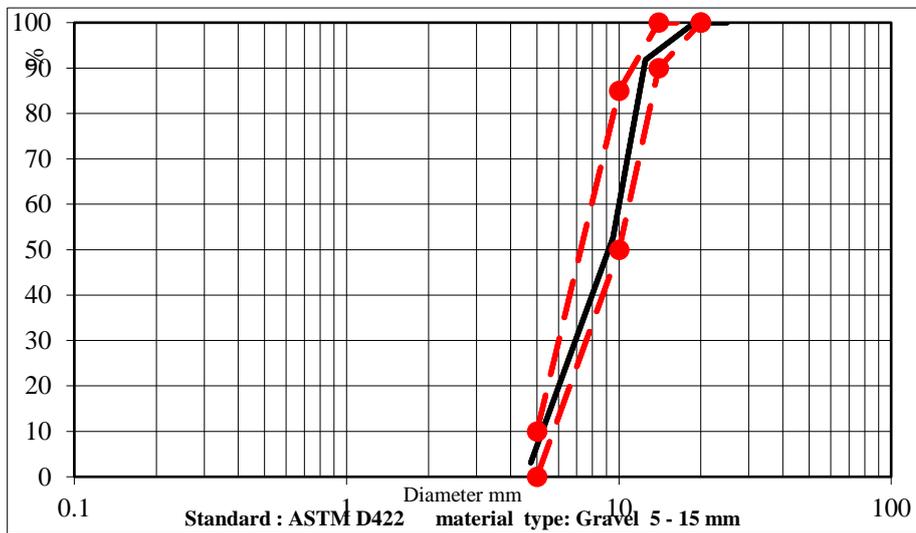
مصالح	Sio ²	Al ² O ³	fe ² O ³	Cao	Mgo	So ₂	درصد وزنی در اثر حرارت
سیمان تیپ II	۲۱/۸۸	۴/۵۴	۴/۰۴	۶۳/۲۶	۱/۲۴	۱/۸۶	۱/۹۹
فلای اش	۶۰/۵۳	۳۰/۳۳	۲/۲۵	۳/۹۴	۱/۲۶	۰/۴۶	۰/۳۷
سوپر فلای اش	۶۱/۸۷	۳۱/۱۱	۰/۹۱	۳/۱۱	۰/۷۸	۰/۵۴	۰/۷۱
میکرو سیلیس	۹۶/۷۴	۰/۵۱	۰/۷۶	۰/۱۳	۰/۱ <	So ₃ ۰/۳۵	۱/۷۶
نانو سیلیس	۹۴/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۳۷	۰/۱	۰/۰۹	So ₃ ۰/۰۲۶	۴/۲۶

جدول ۳: نتایج آزمایشات فیزیکی مصالح سنگی

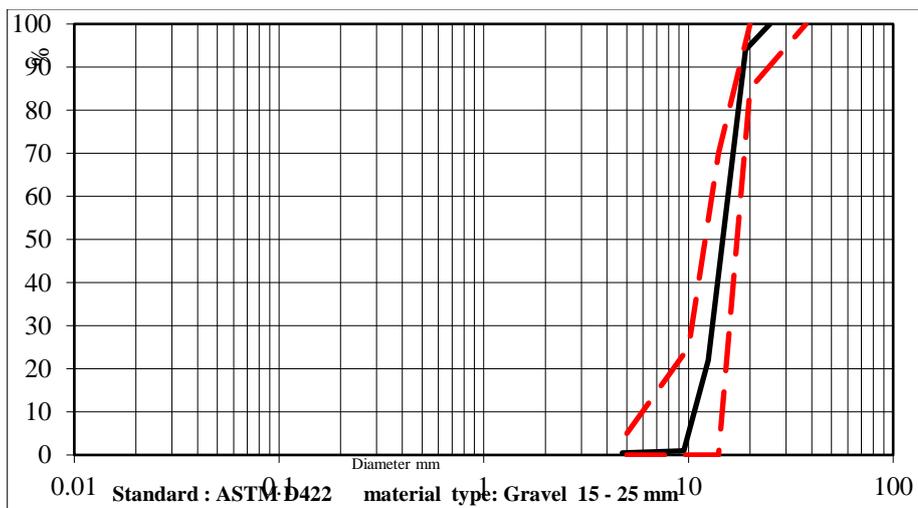
چگالی و جذب آب سنگدانه های ریزتر و درشت تر از ۴,۷۵ میلیمتر						
وزن مخصوص مصالح ریزتر از ۴,۷۵ میلیمتر ASTM C128			وزن مخصوص مصالح درشت تر از ۴,۷۵ میلیمتر ASTM C127			نوع مصالح / آزمایش
جذب آب %	ظاهری	حقیقی	جذب آب %	ظاهری	حقیقی	
۲/۵	۲/۷۸۱	۲/۶۰۲	۱/۳	۲/۷۴	۲/۶۵	۰ - ۶
-	-	-	۱/۱	۲/۷۱	۲/۶۳۶	۵ - ۱۵
-	-	-	۱/۱	۲/۷۱۸	۲/۶۴۲	۱۵ - ۲۵



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه ۰-۶



شکل ۲: منحنی دانه بندی ماسه ۵-۱۵



شکل ۳: منحنی دانه بندی ماسه ۱۵-۲۵

۳- روش و آزمایش‌های تحقیق

در این تحقیق از آزمایش دما و جریان اسلامپ بر روی بتن تازه و مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر روی بتن سخت شده بشرح مختصر ذیل انجام گرفته است:

۳-۱- تعیین دمای بتن

برای مقایسه دمای بتن با حداکثر و حداقل مجاز در آئین نامه و مشخصات فنی پروژه لازم است دمای بتن تازه در هنگام ریختن آن در قطعه مشخص گردد. گاه محدودیتی را در پایان اختلاط ارائه می دهند و لازم است در این مرحله نیز دمای بتن را اندازه گیری نمود. دماسنج با حداکثر دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و با دقت ۰/۵ درجه لازم است. نوک میله دماسنج باید تا عمق حداقل ۷۵ میلیمتر فرو برده شود و از هر طرف نیز باید حداقل ۷۵ میلیمتر بتن وجود داشته باشد. حداقل فاصله مزبور سه برابر حداکثر اندازه سنگدانه می باشد. دماسنج باید ۲ دقیقه در بتن بماند تا به وضعیت ثابتی برسد. خاتمه اندازه گیری بیش از ۵ دقیقه پس از نمونه گیری نباشد. دقت گزارش نتیجه ۰/۵ درجه است.

۳-۲- آزمایش اندازه گیری اسلامپ بتن

آزمایش جریان اسلامپ، روانی بتن به منظور تعیین آزادی حرکت بتن در سطح افق به هنگام نبود مانع صورت می گیرد. آزمایش کارایی، اسلامپ و روانی برای بتن خود تراکم بر اصولی استوار است که آزمایش اسلامپ معمولی بر آن نهاده شده است. که از قالب مخروط ناقص با قطر پایینی ۲۰۳ میلیمتر و قطر بالایی ۱۰۲ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۵ میلیمتر استفاده شده و فاصله بین بالاترین سطح بتن تا تراز قالب اندازه گیری شده و به عنوان اسلامپ بتن گزارش می گردد.

روش انجام آزمایش:

ابتدا صفحه فلزی بدنه داخلی مخروط اسلامپ را مرطوب کرده و آن را روی یک سطح تخت، نفوذ ناپذیر و صلب قرار داده، مخروط را در سه لایه که هر کدام یک سوم حجم مخروط می باشد، از بتن پر شود و در هر لایه را با ۲۵ ضربه میله مخصوص به قطر ۱۶ میلیمتر و طول ۵۰ تا ۶۰ سانتی متر به نحوی که ضربه ها بطور یکنواخت روی مقطع هر لایه توزیع گردد کوبیده می شود. برای لایه زیرین لازم است میله را کمی کج کرده و تقریباً نصف ضربه ها را در نزدیکی محیط باشد. سپس بقیه ضربه ها به صورت قائم و در مسیری مارپیچ به سمت مرکز، ادامه داده شوند. ضربه های لایه زیرین باید طوری باشد که میله در تمام عمق لایه نفوذ نماید. ضربات در لایه دوم و لایه بالایی به گونه ای باشد که میله در تمام عمق لایه نفوذ نماید. در هنگام پر کردن لایه بالایی و قبل از آغاز ضربه ها، آنقدر بتن به داخل قالب ریخته می شود تا به صورت برآمده از قالب بیرون بزند. اگر ضربه زدن باعث شد که سطح بتن از لبه بالای قالب پایین تر بیاید، مقداری بتن اضافه شود، طوری که همیشه مقداری بتن اضافی در بالای قالب وجود داشته باشد. پس از آن که ضربه زدن لایه بالایی پایان یافت، با غلتاندن میله روی لبه قالب، بتن اضافی را برداشته شود. سپس بلافاصله قالب را با دقت و بطور قائم به طرف بالا کشیده و از روی بتن بر دارید. قالب را بدون هیچگونه حرکت جانبی یا پیچشی در فاصله زمانی 2 ± 5 ثانیه به فاصله ۳۰۵ میلیمتر بالا بیاورید. آزمایش باید از آغاز پر کردن تا برداشتن قالب بدون هیچ وقفه ای انجام شود و زمان آن بیش از ۲ و نیم دقیقه بطول نیانجامد. بلافاصله با اندازه گیری فاصله قائم بین بالای قالب و مرکز سطح بالای نمونه تغییر شکل یافته، اسلامپ را تعیین نمایید. مانند شکل ۴ و این آزمایش ۶ مرتبه دیگر در ساعت اول تا ششم تکرار می شود (Standard ASTM: C143).



شکل ۴: اندازه گیری اسلامپ بتن در زمان مشخص

۳-۳- تعیین مقاومت فشاری نمونه مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر

بتن را در قالب مکعبی مورد نظر در ۳ لایه ریخته و توسط میله تراکم در هر لایه ۲۵ ضربه وارد می کنیم. پس از پر شدن لایه سوم، با کاردک یا خط کش فلزی سطح بتن را صاف می نماییم، پس تسطیح نهایی باید تمهیدات لازم جهت جلوگیری از افت یا تبخیر آب نمونه‌ها به کار گرفته شود، و روی نمونه‌ها با یک رویه غیرجاذب و نفوذ ناپذیر پوشانیده شود، اگر از پارچه های مرطوب جهت جلوگیری از افت رطوبت استفاده می شود از تماس آنها با سطح بتن خودداری شود. نمونه باید حداکثر تا ۴۸ ساعت در قالب و در هوای مرطوب نگهداری شود سپس قالب‌ها باز و در محل عمل آوری نهایی (درون حوضچه آب اشباع) قرار می گیرند، پس از ۷ و ۲۸ روز نمونه ها را از آب بیرون آورده، آنها را مدتی در هوای آزاد می گذاریم تا آب اضافی از سطح آنها خارج شود. سپس آنها را وزن کرده و با کولیس ابعادشان را اندازه می گیریم و از این طریق وزن مخصوص نمونه ها را محاسبه می کنیم. در پایان هر نمونه را داخل دستگاه پرس هیدرولیکی قرارداد، به گونه ای که دقیقاً در مرکز صفحه ماشین درون دستگاه قرار گیرد باید دقت گردد که سطح نمونه و صفحات فلزی دستگاه کاملاً تمیز باشند. دستگاه را تحت بارگذاری یکنواخت قرارداد، به محض شکستن قسمتی از نمونه، بارگذاری دستگاه متوقف شده و حداکثر نیروی وارده بر سطح تماس نمونه با صفحات فلزی بر روی نمایشگر دستگاه بر حسب تن نشان داده می شود، با داشتن حداکثر نیروی وارده و سطح بارگذاری شده و می توان مقاومت فشاری آزمونه ها را تعیین کرد (Standard BS: 1881, 1983). (Standard ASTM: C31).

۴- طرح اختلاط

در این تحقیق اقدام به اجرای ۸ طرح اختلاط با مصالح سنگی منطقه نموده که شامل ۳ طرح با خاکستریادی، ۳ طرح با میکرو سیلیس و ۲ طرح اختلاط با ژل نانوسیلیس طبق جدول ۴ می باشد که تست دما، اسلامپ برای بتن تازه و برای هر طرح ۴ نمونه مکعبی $15 \times 15 \times 15$ (دو نمونه برای تعیین مقاومت فشاری ۷ روزه دو نمونه برای تعیین مقاومت فشاری ۲۸ روزه گرفته شد).

جدول ۴: طرح های اختلاط نمونه ها

Concrete mixes	Sand ۰-۶ SSD	Gravel ۱۰-۱۵ SSD	Gravel ۱۵-۲۵ SSD	Cement	Fly Ash	S.F.A	Silica	Nano Jell	Plasticizer	Water
	Kg/m ^۳									
A	۱۰۴۳	۳۹۴	۴۲۳	۳۸۵	۸۰	۱۰	-	-	۶,۲	۱۳۰
B	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۳۸۵	۸۰	۱۰	-	-	۶,۱	۱۲۷
C	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۳۸۵	۸۰	۱۰	-	-	۶,۵	۱۲۵
D	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۴۰۰	-	-	-	۲۴	۵,۸	۱۳۹
E	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۴۰۰	-	-	-	۲۳	۵,۶	۱۳۵
F	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۴۰۰	-	-	۳۰	-	۶	۱۳۶
G	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۴۰۰	-	-	۱۹,۸	-	۴,۶	۱۴۷
H	۱۰۷۰	۴۲۰	۴۵۵	۴۰۰	-	-	۲۷	-	۳,۶	۱۵۶

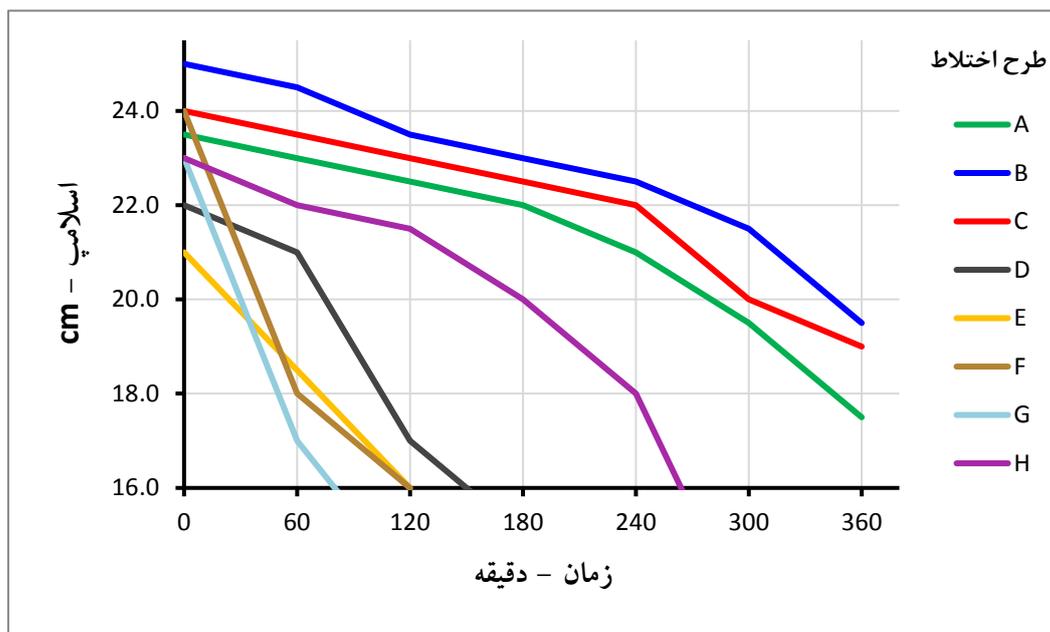
۵- نتایج آزمایش ها

نتایج دما و اسلامپ اولیه و نهایی بتن، و مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ روزه، بر اساس جدول ۵ می باشد.

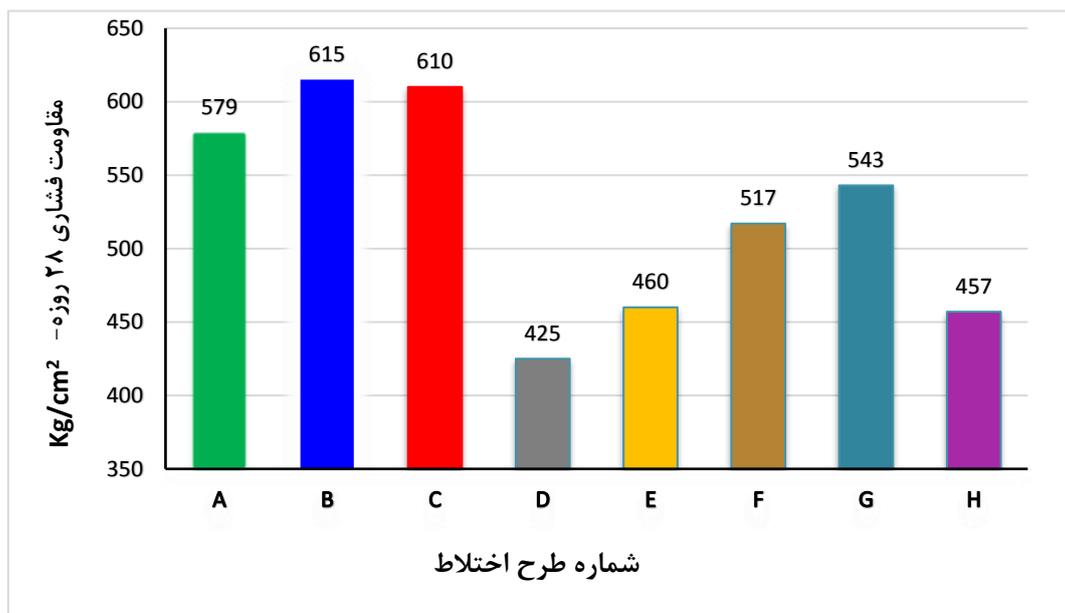
جدول ۵: دمای بتن، اسلامپ و مقاومت فشاری نمونه ها

Concrete mixes	دمای اولیه بتن ©	دمای نهایی بتن ©		اسلامپ اولیه cm	سطوح اسلامپ نهایی cm		مقاومت فشاری ۲۸ روزه Kg/cm ^۲
		بعد از ۶ ساعت	بعد از ۲ ساعت		بعد از ۶ ساعت	بعد از ۲ ساعت	
A	۳۲	بعد از ۶ ساعت	۳۵	۲۳,۵	بعد از ۶ ساعت	۱۷,۵	۵۷۹
B	۲۸	بعد از ۶ ساعت	۳۰	۲۵	بعد از ۶ ساعت	۱۹,۵	۶۱۵
C	۳۱	بعد از ۶ ساعت	۳۲	۲۴	بعد از ۶ ساعت	۱۹	۶۱۰
D	۲۸	بعد از ۲ ساعت	۳۰	۲۲	بعد از ۲ ساعت	۱۷	۴۲۵
E	۳۰	بعد از ۲ ساعت	۳۱	۲۱	بعد از ۲ ساعت	۱۶	۴۶۰
F	۲۴	بعد از ۲ ساعت	۲۷	۲۴	بعد از ۳ ساعت	۱۶	۵۱۷
G	۲۲	بعد از ۱ ساعت	۲۳	۲۳	بعد از ۱ ساعت	۱۷	۵۴۳
H	۲۴	بعد از ۶ ساعت	۲۶	۲۳,۵	بعد از ۶ ساعت	۱۳	۴۵۷

بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده شکل ۵ نمودار منحنی تغییرات اسلامپ طرح ها تا حاکثر ۶ ساعت را نشان می دهد و شکل ۶ نمودار میله ای مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح ها را ترسیم نموده است.



شکل ۵: منحنی اسلامپ - زمان هر طرح طی ساعات مشخص



شکل ۶: نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح های اختلاط

بر اساس تحقیق و پژوهش انجام شده با توجه به جدول ۵ نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد ترکیب و نسبت مواد افزودنی در طرح‌های اختلاط اجرا شده مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح B با خاکستر بادی ۶۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بیشترین و سپس طرح C و طرح A و بعد از آن طرح G و F و E و در آخر طرح H به ترتیب مقاومت لازم را داشته‌اند و طرح D با ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مقاومت لازم مشخصات طراحی پروژه را تصاحب نکرد و عملاً این پژوهش نظرات: استفاده از خاکستر بادی در بتن دوام و کارایی بتن را بهبود می‌بخشد (Helmuth, 1987) و بخش مربوطه به خاکستر بادی را در تحقیق: "Mokal et. al (2023)" استفاده از سرباره و خاکستر بادی با حجم بالا، پیک دما ۱۱ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد کاهش و مقاومت فشاری ۸ تا ۱۰ مگاپاسکال افزایش یافت؛ همچنین افزایش دوام بتن نیز مشاهده شد" را تأیید نموده و افزایش مقاومت برای دوده سیلیسی را رد می‌کند.

همچنین نتایج آزمایش نشان می دهد که اسلامپ در زمان تولید برای طرح های خاکستری B و C عالی و برای A خوب و ۵ طرح با دوده سیلیسی غیر قابل قبول بوده اند. بهترین کارایی بتن برای ساعت های بعدی تا ششم به ترتیب طرح اختلاط B با 19.5cm و سپس طرح C با 19cm کارایی بسیار خوبی داشته اند، که در این مورد نیز "Luo et. al. (2023). نتایج نشان داد که سرباره فولاد در مقایسه با خاکستری کاهش گرمایی بهتر، تخلخل کمتر، کاهش روانی کندتر و مقاومت فشاری بهتری را نشان می دهد" این نظرات رد شده و در بخش خاکستری تحقیق "بابایی و همکاران (۱۴۰۱) جایگزین نمودن میکروسیلیس و خاکستری به جای سیمان در بتن به طور کلی باعث افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن گردید" و اضافه کردن نانو سیلیس باعث افزایش گرمادهی و تسریع در مراحل گیرش و سخت شدن سیمان می شود (K.L. Lin et al., 2008). مورد تأیید قرار گرفته است.

۶- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، دستیابی به طرح اختلاط بتن خودتراکم با حداقل اسلامپ ۲۴ سانتی متر در زمان تولید و حفظ روانی حداقل ۱۸ سانتی متر پس از ۶ ساعت، و کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه حداقل ۴۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است. برای نیل به این هدف، ۸ طرح اختلاط با استفاده از ۲۴٪ خاکستر بادی (شامل فلاش و سوپرفلاش) و مقادیر متغیر ۵٪ تا ۷٫۵٪ دوده سیلیسی مورد آزمایش قرار گرفتند. یافته های کلیدی این پژوهش به شرح زیر خلاصه می شوند:

نتایج نشان می دهند که ذرات کروی و ریز خاکستر بادی با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان، منجر به افزایش تراکم خمیر سیمان و بهبود قابل توجه کارایی و روانی بتن می شوند. علاوه بر این، فعالیت پوزولانی خاکستر بادی، ساختار میکروسکوپی بتن را متراکم تر کرده و در نتیجه، مقاومت نهایی آن را افزایش داده است.

در مقابل، طرح های اختلاط حاوی دوده سیلیس، اگرچه به جز طرح D، مقاومت فشاری مد نظر را کسب کردند، اما در زمینه حفظ کارایی در طول زمان، عملکرد بسیار ضعیفی در مقایسه با طرح های حاوی خاکستر بادی از خود نشان دادند. همان طور که در جداول و نمودارهای مقاومت فشاری و اسلامپ ثبت شده است، طرح اختلاط G (حاوی ۵٪ میکروسیلیس) مقاومت فشاری قابل قبولی داشت، اما در حفظ کارایی در طول زمان، نتوانست با طرح های حاوی خاکستر بادی رقابت کند. این ضعف در حفظ کارایی برای طرح های H و D (با ۶٫۸٪ و ۶٪ دوده سیلیس) و طرح های F و E (با ۷٫۵٪ و ۵٫۸٪ دوده سیلیس) نیز مشهود بود.

در نهایت، طرح های C و B در حفظ اسلامپ پس از ۶ ساعت، کارایی بسیار خوبی از خود نشان دادند. در میان طرح های اختلاط مورد بررسی، طرح B (حاوی خاکستر بادی (Fly Ash, S.F.A^۲) عملکرد بهتری در حفظ کارایی مطلوب داشت؛ به ویژه با ۵۰٪ برتری در حفظ روانی تا ۶ ساعت (که اهمیت خاصی در پروژه داشت) و ۱۳٪ افزایش مقاومت نسبت به بتن های حاوی دوده سیلیس. این یافته ها برتری خاکستر بادی را در ارتقاء خواص مکانیکی از طریق فعالیت پوزولانی تأیید می کند، و قابلیت استفاده برای بتن خودتراکم در سازه های با ابعاد پیچیده مانند دیوارهای دیافراگمی با عمق بیش از ۳۰ متر را نیز تضمین می نماید.

پیشنهاد می شود با توجه به نتایج تحقیقات صورت گرفته پژوهشگران و تجربه عملی در این تحقیق، نسبت به انجام طرح های اختلاط با درصدهای متفاوت دوده سیلیسی در دماهای هوای متعدد اقدام شود زیرا دوده سیلیسی به شدت به دمای بالای هوا حساس بوده و کارایی (اسلامپ) خود را از دست می دهد.

سپاسگزاری

بدینوسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از جناب آقای مهندس جعفر خنیور، ریاست محترم کارگاه فاز دوم طرح توسعه مجتمع بندری شهید رجایی بندرعباس، بخاطر همکاری شایسته ایشان در انجام آزمایش‌ها و تایید امکان انتشار نتایج اعلام می‌داریم.

مراجع

- American Concrete Institute. (2007). *Bylaw, Regulation ACI 237R-07 Self-Consolidating Concrete*.
- American Society for Testing and Materials. (1990). *Standard ASTM: C31/C31m-96*.
- American Society for Testing and Materials. (1990). *Standard ASTM: C143-90a*.
- Babaei, Y., Mousavi Ghasemi, S.A., & Zandi, Y. (2022). *Comparative Evaluation of the Effect of Fly Ash and Micro-silica on the Growth Trend, Compressive Strength, and Electrical Resistance of Concretes Exposed to Sulfate Waters*. *Structural and Construction Engineering*, 9(11), 122-139. Persian
- Bidast, A. (2014). *Effect of Fly Ash on Concrete Durability in Marine Environment*. *Second International Congress on Structure-Architecture and Urban Development*. Persian
- Bo Zhou., & Yuichi Uchida, (2017). *Influence of flowability, casting time and formwork geometry on fiber orientation and mechanical properties of UHPFRC*. *Cem Concr. Res.* pp. 164-177
- British Standard. (1983). *Standard BS1881: part 116. Method for Determination of compressive strength of concrete cubes*.
- De, Schutter, G., Bartos, P.J.M., Domone, P.L., & Gibbs, J. (2008). *Self-Compacting Concrete*. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK.
- European Federation of National Trade Associations (EFNARC). (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. UK, pp. 32.
- Gaikwad, Prathamesh., & Sathe, Sandeep. (2025). *Effect of fly ash on compressive strength, carbonation and corrosion resistance of reinforced concrete: a systematic review*. *World Journal of Engineering*, Vol. 22 No. 1, pp.40-60
- Gautam, Lilesh., Purbe., Mukesh, Kumar., Sharma., Kul, Vaibhav., et al. (2025). *Environmental impact mitigation and durability enhancement of concrete through fly ash substitution: a comprehensive review*. *J.Build Rehabil* 10,99
- Ghodratnama, M., Rajae, A., Masoodi, A. R., Abrishami, S., Davarpanah, T. A., & Pournoori, P. (۲۰۲۵). *Enhancing the fracture toughness of eco-friendly self-compacting concrete with waste glass coarse aggregates and steel fibers: A mixed-mode I/II fracture analysis using SCB specimens*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, ۱۰۴۹۶۹
- Helmuth, R. (1987). *Fly ash in cement and concrete*. Portland Cement Association.
- I.C, Yeh. (2007). *Modeling slump flow of concrete using second-order regressions and artificial neural networks*. *Cem. Concr. Compos.*, 29 (6), pp. 474-480
- Ige, O.E., Olanrewaju, O.A., Duffy, K.J., & Collins, O.C. (2022). *Environmental Impact Analysis of Portland Cement (CEM1) Using the Midpoint Method*. *Energies*, 15(7), 2708.
- K.L, Lin., W.C, Chang., D.F, Lin., H.L, Luo., & M.C, Tsai. (2008). *Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash*. *Cement Mortar Journal of Environmental Management*, 88, 708-714.
- Lecompte, T., & A, Perrot. (2017). *Non-linear modeling of yield stress increase due to SCC structural build-up at rest*. *Cement and Concrete Research*, 92: p. 92-97
- Luo, T., Wang, X., & Zhuang, S. (2023). *Value-added utilization of steel slag as a hydration heat controlling material to prepare sustainable and green mass concrete*. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02619.
- L, Yang., X, An., & S, Du. (2021). *Estimating workability of concrete with different strength grades based on deep learning*. *Measurement*, 186, Article 110073
- Mazloom, M., Ramezani pour, A.A., & Brooks, J.J. (2004). *Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete*. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 347-357.
- Mokal, M.P., Mandal, R., Nayak, S., & Panda, S.K. (2023). *Efficacy of high-volume fly ash and slag on the physicomechanical, durability, and analytical characteristics of high-strength mass concrete*. *Journal of Building Engineering*, 76, 107295.

- Nili, M. (2015). *Evaluation of Setting Time and Compressive Strength Development of Concretes Containing Pozzolanic Materials*. Modares Civil Engineering Journal, Vol. 15. Persian
- Omer, Brwa., Dilshad, Kakasor., Ismael, Jaf., Sirwan, Khuthur Malla., et al. (2024). *Exploring the potential of soft computing for predicting compressive strength and slump flow diameter in fly ash-modified self-compacting concrete*. *Archiv. Civ.Mech.Eng* 24, 95.
- Pachideh,G., Gholhaki,M., & Ketabdari, H. (2020). *Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars*. *Journal of Building Engineering*, 29 101178
- Pournoori, P., Davarpanah, TQ.A., Rajae, A., Ghodrathnama, M., Abrishami, S., & Masoodi, A. R. (۲۰۲۴). *Experimental exploration of fracture behavior (pure mode III) in eco-friendly steel fiber-reinforced self-compacting concrete with waste tempered glass as coarse aggregates*. *Scientific Reports*, ۱۴(۱), ۹۰۴۳
- Rahmani,H. (2015). *Combined Effect of Nano-silica and Micro-silica on the Durability of High-Strength Concretes Against Sulfuric Acid Attack*. Modares Civil Engineering Journal, Summer. Persian
- Shoaei, S., Shoaei, A., & Danandeh Mehr, A. (2024). *Prediction of Service Life and Life Cycle Assessment of Pozzolanic Concretes*. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 54, No. 227, pp. 29-36. Persian
- Shojamoghadam, S., Rajae, A., & Abrishami, S. (۲۰۲۴). *Impact of various additives and their combinations on the consolidation characteristics of clayey soil*. *Scientific Reports*, ۱۴(۱), ۳۱۹۰۷
- Soo-Duck, Hwang., Kamal, H.Khayat., Olivier, Bonneau. (2006). *Performance-Based Specifications of Self Consolidating Concrete Used in Structural Applications*. *ACI Materials Journal*, 2006, 121-129.
- Y, Cai., & Q, Liu. (2023). *Research progress on the stability of concrete mixtures and its influence on the durability of engineering structures*. *J. Xi'an Univ. Arch. Tech.*, 55 (4), pp. 492-503
- Yuxin, Cai., & Qing-feng, Liu. (2022). *Numerical investigation on aggregate settlement and its effect on the durability of hardened concrete*. in: *Proceedings of the 7th International Conference on Durability of Concrete Structures*, Jinan, China
- Yuxin, Cai., & Qing-feng, Liu. (2023). *Stability of fresh concrete and its effect on late-age durability of reinforced concrete: An overview*. Elsevier. *J. Build. Eng.* Article 107701