بررسی تاثیر استفاده از توف سبز شاهین دژ بر مشخصات مکانیکی بتن‌های غلتکی

صادق دردائی[1]، رضا آقایاری*[2]، بابک نیک نیا[3]

۱- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، شرکت آب منطقه ای آذربایجان غربی، آذربایجان غربی، ایران

چکیده

طبق تعریف کمیته فنی شماره ۲۰۷ انجمن بتن آمریکا (ACI) بتن غلتکی یا RCC نوعی بتن با اسلامپ صفر می باشد که عملیات حمل، پخش و تراکم آن با استفاده از ماشین آلات عملیات خاکی صورت می پذیرد. بتن غلتکی مخلوطی از سیمان، مصالح سنگی و آب است که برای ساخت پروژه های راهسازی، سدها، بازسازی سدها و ایجاد فرازبندها و بعضی نیازهای دیگر به کار برده می شود. این نوع بتن به منظور ایجاد تراکم مناسب، بایستی وزن ماشین آلات متراکم کننده را تحمل نموده و در خمیر آن برای پوشانیدن کلیه سنگدانه‌ها رطوبت کافی موجود باشد. با توجه به مصرف فزاینده و اقبال روز افزون به سازه های بتنی به ویژه بتن غلتکی استفاده از پوزولان‌ها و جایگزین کردن آنها با سیمان اهمیت بسزایی می‌یابد. امروزه استفاده از مواد افزودنی جایگزین سیمان با توجه به مزایای فنی (کاهش حرارت هیدراتاسیون) و مزایای اقتصادی، جایگاه ویژه ای در طرح اختلاط بتنهای غلتکی دارد و به ویژه به دلیل فراوانی منابع معدنی پوزولان در ایران، استفاده از آنها امری منطقی و اقتصادی است. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از توف سبز شاهین‌دژ که از پوزولانهای در دسترس در استان آذربایجان غربی می‌باشد، خواص بتن تولیدی مورد آزمایش قرار گرفته و تاثیر این نوع پوزولان بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و نفوذپذیری بتن غلتکی نیز بررسی گردد.

کلمات کلیدی: بتن غلتکی، توف سبز شاهین دژ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری.

***نویسنده مسئول: رضا آقایاری**
پست الکترونیکی: reza_agh@razi.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۵

شناسه دیجیتال DOI: 10.22065/jsce.2016.40462
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.40462

۱- مقدمه

رایج‌ترین کاربرد بتن غلتکی (یا بتـن RCC) در ساخت سدهای مخزنی و انحرافی است، اما در موارد متعدد در ترمیم سدهای قدیمی و افزایش ارتفاع آنها، عملیات اجرایی دریایی و اخیراً در صنعت راهسازی به عنوان مصالح روسازی جاده‌ها، بزرگراه‌ها و باند فرودگاه‌ها به صورت گسترده‌ای به‌کار گرفته شده است[۱]. مزایای کاربرد بتـن غلتکی را می‌توان عدم نیاز به قالب‌بندی با توجه به‌روش اجرای لایه‌ای، کاهش سیمان مصرفی و به تبع آن کاهش حرارت هیدراتاسیون تولید شده و حذف سیستم خنک کننده در بدنه سد، امکان استفاده از تجهیزات متداول جهت حمل و نقل بتن‌ریزی و امکان استفاده از مواد ارزان قیمتی چون خاکستر بادی، پوزولان‌ها و سرباره کوره‌های آهن گدازی به عنوان جایگزین سیمان نام برد.

واژه تراکم غلتکی به عنوان فرآیندی جهت تراکم بتن، توسط غلتک همراه با ویبره تعریف می‌گردد [۲]. ایده استفاده از بتن غلتکی زمانی مطرح می شود که بتنی با اسلامپ صفر را بتوان توسط تجهیزات مورد استفاده در عملیات خاکی حمل، بتن ریزی و متراکم نمود. پروژه‌های بتن غلتکی ایده‌آل شامل نواحی وسیع بتن‌ریزی با حداقل آرماتوربندی و یا بدون نیاز به تسلیح با آرماتور می‌باشند. این نوع بتن از نظر اقتصادی دارای قدرت رقابت با سایر روش‌های ساخت و ساز بوده در ساخت سکوهای پرتاب موشک، روسازی راه، فونداسیون حجیم، سدهای انحرافی به عنوان جایگزینی برای بتن های متعارف مورد استفاده قرار گیرد.

مخلوط های بتـن غلتـکی با توجه به مقدار مواد سیمانی (سیمان+پوزولان) در سه رده طبقه بندی می‌شود:

- مخلوط هایی با مواد سیمانی کم (مواد سیمانی کمتر از ۱۰۰ kg/m^3)
- مخلوط هایی با مواد سیمانی زیاد (مواد سیمانی بیشتر از ۱۵۰kg/m^3)
- بتـن غلتـکی با عیار متوسط (مقدار متوسط مواد سیمانی)

طبق بررسی‌های انجام شده، تعداد قابل توجهی از سـدهای بتـن غلتـکی موجود از مخلوط‌های کم عیار با مواد سیمانی کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده نموده‌اند. در این نوع مخلوط ها، با به حداقل رساندن مقدار سیمان و پوزولان، در هزینه های مربوط به تهیه و حمل مصـالح صرفه‌جویی میگردد. کمبود مواد سیمانی باعث وجود خلل و فرج بیشتر و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر می‌گردد که با طرح اختلاط مناسب و افزودن مواد ریزدانه بی اثر ریزتر از ۷۵ میکرون می توان به نفوذپذیری در حد بتـن غلتکی پرسیمان با نفوذپذیری معمولی رسید [۳]. نفوذپذیری مخلوط های مواد سیمانی زیاد نیز معمولاً کم می‌باشد. درصد قابل توجهی از مواد سیمانی را پوزولانها شامل می‌شوند و در نتیجه کسب مقاومت اولیه اینگونه مخلوط ها بیشتر به طول می‌انجامد. از معایب این مخلوط‌ها می‌توان به بالا بودن ضریب الاستیسیته و حرارت هیدراتاسیون نام برد، در نتیجه سدهای ساخته شده با این گونه مخلوط ها بیشتر مستعد ترک خوردن می‌باشند. حدود ۲۲ درصد از سـدهای بتن غلتکی ساخته شده تا سال ۱۹۹۸ میلادی از بتـن غلتکی با عیار متوسط (با مواد سیمانی بین ۱۰۰ الی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) استفاده کرده‌اند. در بعضی از سازه‌ها ترکیبی از انواع این بتن استفاده شده است، به عنوان نمونه بخش خارجی سـد Copperfield استرالیا از بتـن غلتـکی با عیار متوسط (۸۰kg/m^3 سیمان ۳۰kg/m^3 پوزولان) ولی بخش داخلی بدنه آن با بتـن کم عیار اجرا گردیده است [۴].

همزمان با گسترش استفاده از بتن غلتکی در دنیا در دهه اخیر گزینه استفاده ازسدهای بتن غلتکی مورد توجه صنعت سدسازی ایران نیز قرار گرفته است. سد پای پل (تنظیمی کرخه)، سد جگین، سد زیردان از جمله نمونه‌های کاربرد این فناوری در کشورمان بوده است. بتن غلتکی مصالح و روشی نوین برای ساخت اقتصادی سازه های حجیم از جمله سدهای وزنی می‌باشد. با توجه به گسترش کاربرد مواد پوزولان طبیعی در تولید سیمان و تکنولوژی بتن و نیز وجود چندین سد در حال مطالعه و اجرا در استان آذربایجان غربی از جمله سد بتنی غلتکی بداولی که درحال مطالعه می باشد لزوم تحقیق در خصوص امکان استفاده و تاثیرات انواع پوزولان های قابل استحصال در منطقه آذربایجان غربی مانند معدن توف سبز شاهین‌دژ بر مشخصات بتن غلتکی الزام آور می‌نماید. پوزولان طبیعی طبق تعریف آئین نامه ACI-

232 [۵] عبارتست از: "مواد خام یا کلسینه شده‌ای که خواص پوزولانی داشته باشد. به‌عنوان نمونه از خاکسترهای آتشفشانی یا پومیس، چرتها یا پالینی، شیلها، توفها وبرخی ازخاکهای دیاتومه.

استفاده از پوزولان در بتن موجب کاهش ریسک واکنش قلیائی، کاهش حرارت هیدراسیون، افزایش مقاومت در برابر سولفاتها، کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش دوام آن می‌گردد. در بتن غلتکی به دلیل نیاز به اجرای سریع، کاهش حرارت هیدراسیون از اهمیت زیادی برخوردار است. به علاوه به‌دلیل مشکوک بودن مصالح سنگی به واکنش قلیائی، استفاده از پوزولان می‌تواند منجر به کاهش ریسک واکنش قلیائی نیز شود. در ایران سنگهای آتشفشانی و آذر آواری به وفور یافت می‌شود که ازجمله می‌توان به مناطق موجود در رشته کوه البرز، زون سنندج - سیرجان، زون ارومیه – دختر و ایران مرکزی که سطح وسیعی ازمساحت کشور را پوشش می‌دهند، اشاره نمود. در همین راستا معدن توف سبز شاهین دژ به عنوان یکی از معادن پوزولان طبیعی منطقه که در مجاورت چندین سد در حال مطالعه در استان آذربایجان غربی قرار دارد و تاثیرات استفاده از آن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به عنوان موضوع تحقیق انتخاب گردید. با توجه به نزدیکی شهرستان شاهین دژ و معدن توف سبز به سدهای در حال مطالعه آجرلو (شاهین دژ) ، باروق (میاندوآب) ونیز در حال ساخت بودن چندین سد در سطح استان مانند سد سیمینه رود (شاهین دژ)، سد سیلوه و سد گرده بین (پیرانشهر)، کانی سیب (سردشت)، باراندوز و نازلو (ارومیه)، غازان(خوی) و ارس۲ و کرم آباد (پلدشت) و نیز سدهای در حال مطالعه بداولی و فیشل در منطقه ماکو که اولی از نوع بتنی غلتکی می‌باشد، لزوم تحقیق بیشتر در این زمینـه را موجب می‌گردد. در این تحقیق سعی شده است تا به پرسشهای مطرح شده در خصوص تاثیر استفاده از توف سبز شاهین دژ در خواص بتن غلتکی از جمله موارد زیر پاسخ داده شود:

در صورت جایگزینی توف سبز با پوزولان آیا مشخصات فنی و مکانیکی بتـن RCC تغییییر خواهد نمود؟ آیا میزان تاثیر اختلاط توف سبز در بتـن RCC تأثیرگذار است؟ و آیا نتایج آنالیزهای صورت گرفته جایگزینی توف سبز و پوزولان را در بتـن RCC تائید می‌نماید؟

۲- مواد و روش ها

انتخاب و تعیین کمیت و کیفیت مصالح در ارائه طرح اختلاط بتن غلتکی اهمیت خاصی دارد. به دلیل دامنه گسترده‌تر کیفیت مصالح سنگی در بتن غلتکی طیف تغییرات ممکن در خواص بتن غلتکی نسبت به بتن حجیم معمولی گسترده‌تر می‌باشد. بنابر این برای انتخاب مصالح مصرفی ابتدا کیفیت هر یک از مصالح و سپس کیفیت کل مصالح در مخلوط مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعیین کیفیت مصالح توسط بررسی‌های آزمایشگاهی روی هر یک از مصالح و گروه مصالح و مقایسه با استانداردهای معتبر امکان پذیر می‌باشد.

۲-۱- مصالح سنگی

از انجایی که مصالح سنگی بخش عمده (۸۵- ۷۵ درصد) حجم بتـن غلتـکی را تشکیل می‌دهند، لذا کمیت و کیفیت مصـالح سنگی معدنی از عوامل تاثیر گذار بر طرح اختلاط بتن غلتکی و در نتیجه خواص بتن غلتکی خواهد بود. در انتخاب مصالح سنگی بایستی دقت کافی به حفظ پیوستگی دانه بندی داشت تا به تبع آن مقدار خمیر لازم برای پر کردن فضاهای خالی سنگدانه‌ها و مقدار سیمان مصرفی کاهش یافته و حرارت هیدراتاسیون کمتری ایجاد شود. همچنین مخلوطهای بتن غلتکی با دانه‌بندی پیوسته، جداشدگی کمتر نسبت به مصالح با دانه‌بندی غیر پیوسته و گسسته دارند. در ساخت اکثر سدهای بتن غلتکی از سنگدانه‌هایی که همه الزامات استاندارد ASTM (C۳۳) برای سنگدانه‌های بتن حجیم (به‌جز محدودیت عبور از الک ۲۰۰) را ارضا می‌کنند [۶].

اصول اولیه درطرح بتن غلتکی و هر نوع بتن دیگر، بکارگیری حداکثر میزان مصالح سنگی، حداقل میزان آب و به تبع آن حداقل مواد سیمانی مصرفی می‌باشد. استفاده از مصالح سنگی با دانه‌بندی خوب در بتن جهت به‌حداقل رساندن حجم خلل و فرج ما بین سنگدانه‌ها می‌باشد. مصالح سنگی می‌توانند از منابع قرضه آبرفتی یا کوهستانی (شن و ماسه با درصدهای مختلف از ریزدانه‌های فعال و غیر فعال)، معادن سنگ و مصـالح و پس ماندهای موجود حاصل از یک خاکبرداری تامین شوند.

مصـالح به دست آمده از این منابع به روش مناسبی بهسازی می‌گردند. این بهسازی می‌تواند شامل یک سرند ساده بوده یا کلیه مراحل دانه بندی، شستشو، آسیاب و تولید مواد ریز، اضافه کردن مصـالح گرد گوشه یا شکسته و حتی سرند مجدد را در برگیرد [۵]. در این تحقیق از مصـالح سنگی مورد استفاده در کارگاه سـد سیلوه استفاده شده است. این مصـالح از بستر رودخانه "لاوین چای" برداشت می‌شود.

۲-۱-۱- مصـالح سنگی درشت دانه

یکی از اهداف اصلی در طرح اختلاط بتـن غلتـکی استفاده از حداکثر اندازه درشت دانه می باشد تا مقدار مواد سیمـانی مصرفی کاهش و در نتیجه حرارت هیدراتاسیون کمتری تولید شود. مشکل عمده در استفاده از حداکثر اندازه سنگدانه، مشکل جداشدگی در سنگدانه‌ها است. در حالت کلی مخلوط هایی با حداکثر بعد اندازه سنگدانه کوچکتر، جداشدگی کمتری را نشان می دهند. امروزه حداکثر سنگدانه ها را به عموما به ۲ اینچ (۵۰ میلی‌متر) محدود می‌کنند. وجود سنگ دانه های پهن و سوزنی شکل در بتـن حجیم متعارف به شدت محدود گردیده است. با این وجود در مخلوط بتـن غلتـکی مشاهده شده که خواص مکانیکی کمتر تحت تأثیر مصالح پهن یا سوزنی شکل می باشد که دلیل آن را نیز میتوان ناشی از کاربرد غلتکهای لرزاننده و سنگین جهت تراکم دانست. بر اساس توصیه ارائه شده در ACI و بر اساس نتایج کارگاهی بدست آمده، تا میزان۴۰ درصد مصـالح سنگی پهن و سوزنی شکل که مطابق استاندارد ASTM D۴۷۹۱ با ضریب شکل ۳ به ۱ تعریف شده‌اند، مشکل خاصی ایجاد نمی نمایند[۷]. گروه مهندسین ارتش ایالات متحده آمریکا نیز برای مصـالح سنگی پهن و سوزنی شکل درصدی حدود ۲۵ درصد را تعریف نموده است. به‌هرحال در صورتی که بتوان با مصـالح موجود الزامات پروژه را برآورده ساخت استفاده از آن بلامانع می باشد. حداکثر بعد اسمی سنگدانه‌های مصرفی که در گروههای مهندسی اجرای بتن غلتکی، حمل و متراکم شده‌اند ۷۵ میلیمتر (۳ اینچ) می‌باشد. اما دانه‌بندی سنگدانه‌های بتـن غلتـکی ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای با دانه بندی مورد استفاده در بتـن متعارف متفاوت باشد. استفاده از سنگدانه‌های بزرگتر به طور چشمگیری احتمال جداشدگی سنگدانه ها را در حین فرایند حمل و پخش بتـن غلتـکی افزایش می‌دهد و این در حالی است که تاثیر چندانی بر کاهش هزینه‌های بتن غلتکی ندارد[۸]. راه حل کنترل جداشدگی سنگدانه‌ها، استفاده از رده‌های بیشتری از مصالح سنگی و درصدهای زیاد از مصالح ریزدانه می‌باشد. در کل با افزایش قطر حداکثر دانه ها، خطر جداشدگی به شدت افزایش می‌یابد در حالی که استفاده از درشت دانه های شکسته و ریزدانه‌های گردگوشه این خطر را به میزان قابل توجهی کاهش خواهد داد.

۲-۱-۲- مصـالح سنگی ریزدانه

نوع و دانه‌بندی ماسه تأثیر بسیار مهمی در مقدار خمیر مخلوط و قابلیت تراکم مخلوط دارد. دانه‌بندی ماسه روی مقدار آب و مواد سیمانی لازم برای پرکردن خلل و فرج بین سنگدانه‌ها و پوشش دادن سطح آنها تاثیر دارد. ماسـه هایی با دانه‌بندی متداول بتـن معمولی مطابق با استاندارد ASTM می‌تواند برای تهیه بتن غلتکی مورد استفاده قرار گیرد. اما بایستی توجه داشت در مخلوط بتن غلتکی با مواد سیمانی کم، لازم است کمبود پرکننده‌ها از طریق کاربرد ماسه همراه با پرکننده‌های افزون بر حد ذکر شده در ASTM جبران شود. مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) مورد استفاده در این تحقیق از ایستگاه تولید مصالح سنگی کارگاه سد سیلوه تامین شده است. این مصالح رودخانه‌ای بوده و فاقد مصالح شکسته بودند.

۲ –۱ –۳- مواد ریزافزودنی به سنگدانه ها (ریزتر از ۷۵ میکرون)

در بتن غلتکی با عیار مواد سیمـانی کم، مصالح سنگی مورد نیاز رد شده از الک نمره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) بیش از مقدار مورد نیاز در بتن متعارف می‌باشد که بخش عمده‌ای از آن در بافت بتن غلتـکی برای افزایش کارایی و پرکردن فضاهای خالی به کار می‌رود. این مواد ریز افزوده معمولا از جنس سیلت طبیعی غیر پلاستیک و ماسـه ریز یا ریزدانه‌های مصنوعی می‌باشند. لازم بذکر است این مواد ریز موجب افزایش نیاز به آب و در نتیجه کاهش مقاومت نیز می‌شوند. در صورت استفاده از پوزولانها به عنوان ریزدانه‌های طبیعی علاوه بر بهبود میزان کارآیی، نسبت آب به مواد سیمانی کاهش و مقاومت دراز مدت نیز به تبع آن افزایش می‌یابد.

۲ – ۲- مواد سیمـانی

باتوجه به اهمیت کاهش حرارت هیدراتاسیون در بتن ریزی‌های حجیم، انتخاب نوع سیمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این تحقیق از سیمان پرتلند اصلاح شده (تیپ II) تولیدی کارخانه سیمـان آذرآبادگان خوی استفاده شد. سیمـان تیپ II معمولا به منظور پیشگیری از حمله سولفاتها وحفاظت میلگردها در برابر حمله نمکهای کلر استفاده می‌شود. سیمان تیپ II مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ASTM-C۱۵۰ [۹] تولید می‌شود مشخصات سیمان پرتلند نوع II تولیدی کارخانه سیمان خوی در جدول ۱و ۲ ارائه شده است.

جدول۱ : ارزیابی مواد اولیه سیمـان تیپ II خوی

اکسیدهای سیمـان	درصد اکسید ها		ارزیابی
	سیمـان	استاندارد	
CaO	۶۴،۵۹	۶۳ الی ۶۶	مجاز
SiO_2	۲۲،۰۵	۲۰ الی ۲۲	مجاز
Al_2O_3	۵،۰۴	۵،۵ تا ۷،۵	مجاز
Fe_2O_3	۳،۴۷	۳ الی ۴،۵	مجاز
SO_3	۱،۷۳	۱ الی ۳	مجاز

جدول۲ : مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمـان پرتلند نوع II

سطح مخصوص (بلین) cm^2/gr	زمان گیرش (دقیقه)		آب مصرفی برای غلظت نرمال ٪
	اولیه	نهایی	
۳۰۴۹	۱۵۴	۱۸۱	۲۳،۸

۲-۳- مواد افزودنی

امروزه استفاده از مواد افزودنی جایگزین سیمـان با توجه به مزایای فنی (کاهش حرارت هیدراتاسیون) و مزایای اقتصادی و فراوانی منابع معدنی پوزولان جایگاه ویژه‌ای در طرح اختلاط بتـنهای غلتـکی دارد. همچنین در صورت احتمال آلودگی قلیائی مصـالح سنگی استفاده از پوزولان در کاهش ریسک واکنش قلیائی موثر خواهد بود. پوزولان تأثیرات عمده‌ای بر ویژگیهای ملات سیمانی از قبیل مقاومت، زمان گیرش، انبساط حجمی و دوام دارد. پوزولانهای طبیعی معمولا شامل کانیهای سیلیکاتی مثل کوارتز، فلدسپات، میکا، هورنبلند، پیروکسن، کریستوبالیت، کانیهای رسی، شیشه‌های آتشفشانی آمورف بوده که از جمله انواع آن میتوان به خاکسترهای آتشفشانی یا پومیس، چرتهای اپالینی، شیلها، توفها و برخی از خاکهای دیاتومه پوزولان اشاره نمود. در ایران سنگهای آتشفشانی و آذرآواری در مناطقی از جمله رشته کوه البرز، زون سنندج- سیرجان، زون ارومیه- دختر به وفور یافت می‌شود. در همین راستا معدن توف سبز شاهین دژ به عنوان یکی از معادن پوزولان طبیعی منطقه که در مجاورت چندین سـد درحال احداث و مطالعه در استان آذربایجان غربی قراردارد، انتخاب گردید. این معدن در نزدیکی شهرستان شاهین دژ و سـدهای در حال مطالعه آجرلوی شاهین دژ، باروق میاندوآب و سدهای در حال ساخت سـد سیمینه رودشاهین دژ، سـد سیلوه و سـد گرده بین پیرانشهر، کانی سیب سردشت، باراندوز و نازلوی ارومیه، غازان خوی و کرم آباد پلدشت می‌باشد. تصویر توف سبز مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است. ترکیبات شیمیایی توف سبز مورد استفاده در جدول ۳ آمده است.

جدول۳ : ترکیبات شیمیایی توف سبز شاهین دژ

ترکیب شیمیایی	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	سایر ترکیبات
درصد	۱،۲۵	۲،۹۵	۲،۱۲	۸،۳۰	۵،۲۵	۹،۶۰	۶۷،۰۸	۳،۴۵

۲-۴- آب

در تهیه نمونه‌های بتنی از آب کارگاه سد سیلوه که آزمایشات لازم جهت استفاده در بتـن بر روی آن انجام شده بود، استفاده گردید.

۲-۵- فوق روان کننده

هدف از بکارگیری مواد افزودنی در بتن، بهبود کارایی، تسریع یا تعویق زمان گیرش، کنترل افزایش مقاومت و دوام در برابر یخ زدگی، ترک خوردگی حرارتی، انبساط قلیایی سنگدانه و محلولهای اسیدی و سـولفاتی می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور رسیدن به نسبت آب به سیمان حداقل با حفظ کارایی مناسب بتن، از مقادیر مختلف فوق روان‌کننده استفاده شد تا یک نسبت ثابت برای همه طرح‌ها به‌دست آید. فـوق روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق با وزن مخصوص ۱/۱۹ گرم بر سانتیمتر مکعب دارای نام تجـاری MaxFlow بوده و بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر با استانداردهای ASTM-C۱۰۱۷ [۱۰] و ASTM-C۴۹۴ [۱۱] مطابقت داشت.

۲ -۶ - آزمایش های انجام شده بر روی مصـالح

آزمایش‌های زیر برای تعیین مشخصات مصـالح سنگی انجام شد که نتایج آن در جداول ۴ الی ۷ ارائه می‌گردد.

- دانه بندی مصـالح سنگی درشت دانه
- نسبت بهینه اختلاط مصـالح سنگی درشت دانه
- دانه بندی مصـالح سنگی ریز دانه
- دانسیته و درصد جذب آب سنگدانه ها
- آزمایش تعیین ارزش ماسـه ای (SE)
- تعیین مدول نرمی ماسـه

جدول۴ : دانه بندی شن ریز (نخودی)

شماره الک	وزن مانده (gr)	درصد مانده	درصد مانده تجمعی	در صد عبوری از الک
۱/۵	۰	۰	۰	۱۰۰
۱	۰	۰	۰	۱۰۰
۳/۴	۰	۰	۰	۱۰۰
۱/۲	۳۴	۱,۱۳	۱,۱۳	۹۸,۸۷
۳/۸	۶۳۹	۲۱,۲۹	۲۲,۴۲	۷۷,۵۸
۴	۱۹۷۴	۶۵,۷۸	۸۸,۲	۱۱,۸
Pan	۳۵۴	۱۱,۸	۱۰۰	۰
مجموع	۳۰۰۱	-	-	-

جدول۵ : دانه بندی شن درشت (بادامی)

شماره الک	وزن مانده (gr)	درصد مانده	درصد مانده تجمعی	در صد عبوری از الک
۱/۵	۰	۰	۰	۱۰۰
۱	۰	۰	۰	۱۰۰
۳/۴	۶,۱	۲۰,۰۳	۲۰,۰۳	۷۹,۹۷
۱/۲	۱۸۸۰	۶۲,۶۷	۸۲,۷	۱۷,۳
۳/۸	۳۵۰	۱۱,۶۷	۹۴,۳۷	۵,۶۳
۴	۱۴۴	۴,۸	۹۹,۱۷	۰,۸۳
Pan	۲۵	۰,۸۳	۱۰۰	۰,۰۰
مجموع	۳۰۰۰	-	-	-

جدول۶ : دانه بندی ماسه، مدول نرمی و ارزش ماسه‌ای

شماره الک	وزن مانده (gr)	درصد مانده	درصد مانده تجمعی	در صد عبوری از الک
۳/۸	۰	۰	۰	۱۰۰
۴	۰	۰	۰	۱۰۰
۸	۷۰	۷,۶۹	۷,۶۹	۹۲,۳۱
۱۶	۲۰۲	۲۱,۲	۲۸,۸۹	۷۱,۱۱
۳۰	۲۱۹	۲۴,۰۶	۵۲,۹۵	۴۷,۰۵
۵۰	۲۹۰	۳۱,۸۷	۸۴,۸۲	۱۵,۱۸
۱۰۰	۱۰۸	۱۱,۸۷	۹۶,۶۹	۳,۳۱
pan	۲۱	۲,۳۱	۹۹	۱
مجموع	۱۰۰۰	-	-	-
ارزش ماسه‌ای نرمی			٪۸۵ ۲,۶۷	

۲ –۷ - ارائه طرح اختلاط بتن غلتکی

در این تحقیق با فرض دو مقدار ۱۵۰ و ۱۷۰ کیلوگرم برای مواد سیمانی (توف سبز شاهین دژ) ۶ طرح اختلاط تعیین و از طرح اختلاط ۲۴ نمونه استوانه ای تهیه شد. از ۲۴ نمونه تهیه شده، ۹ نمونه جهت انجام مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ، ۹ نمونه جهت انجام مقاومت کششی به روش برزیلی و ۶ نمونه جهت اخذ مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی در نظر گرفته شد. زمان Vebe بتـن تازه سخت نشده دراین تحقیق ۱۱ تا ۱۷ ثانیه به‌دست آمد. طرح اختلاط منظور شده در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای بتـن غلتکی مطابق با استاندارد ACI [۱۲] در جدول ۸ ارائه می‌گردد.

جدول۷ : درصد جذب (رطوبت SSD) و وزن مخصوص

مصالح ریزدانه	رطوبت	وزن مخصوص (gr/cm^3)
ماسه	۲,۶۳	۲,۶۳
فیلر	۲,۶۵	-
توف سبز شاهیندژ	-	۲,۴۵
سیمان	-	۳,۱۵
شن نخودی	۱,۲۱	۲,۵۳۵
شن بادامی	۰,۹۱۴	۲,۶۵
ماکادام	۲,۵۶	۲,۵۶

جدول۸ : طرح های اختلاط برای نمونه بتن غلتکی

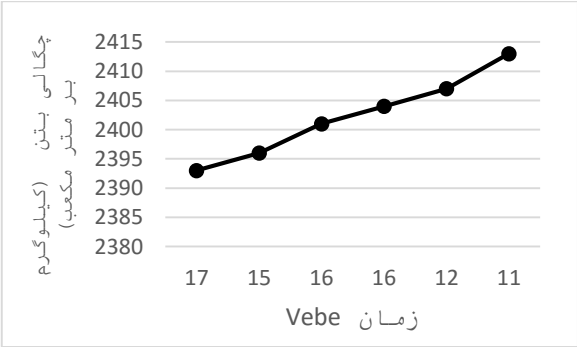
نمونه	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
آب	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵
مواد سیمانی	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
توف سبز	۴۰	۵۵	۶۵	۳۵	۲۰	۲۰
سیمان	۱۳۰	۱۱۵	۱۰۵	۱۱۵	۱۳۰	۱۳۰
ماسه‌طبیعی	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
شن ریز	۷۳۵	۷۳۵	۷۳۵	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰
شن درشت	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰

۳- نتایج آزمایشات

در این قسمت نتایج آزمایشات مربوط به بتن تازه و خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و نفوذپذیری بتن سخت شده ارائه می گردد.

۳-۱- بررسی مشخصات نمونه های بتن تازه (سخت نشده)

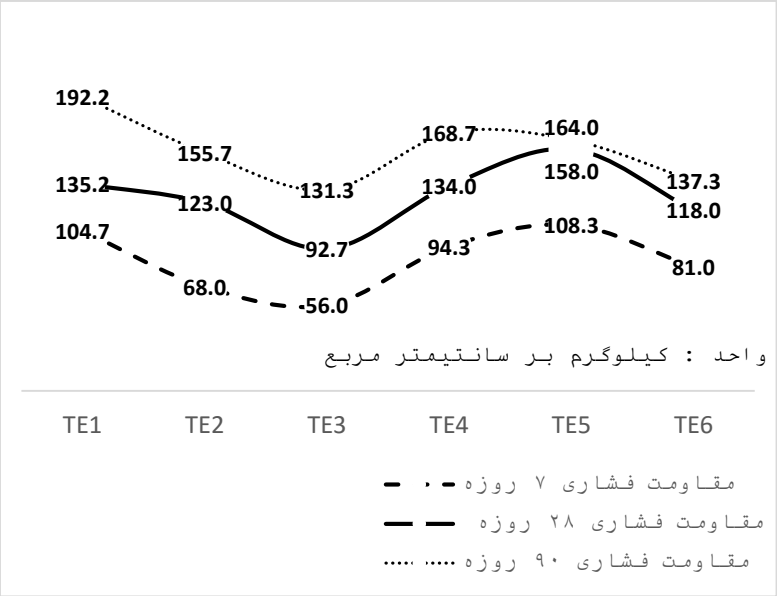
زمان Vebe نمونه بتن تازه در این تحقیق مابین ۱۱ تا ۱۷ ثانیه به دست آمد که می‌توان نتیجه گرفت بتن تولید شده در این تحقیق قابلیت استفاده به عنوان بتن غلتکی را دارد. همچنین با توجه به میزان آب و مواد سیمانی موجود در مخلوط بتن تولیدی نتایج بدست آمده مناسب می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۲ که تغییرات میزان چگالی و زمان Vebe را نشان می‌دهد، می‌توان گفت که با افزایش چگالی امکان پر شدن فضاهای خالی میان سنگدانه ها بیشتر شده و این عمل لغزش راحت‌تر مصالح سنگی و کاهش زمان Vebe را موجب می‌گردد.



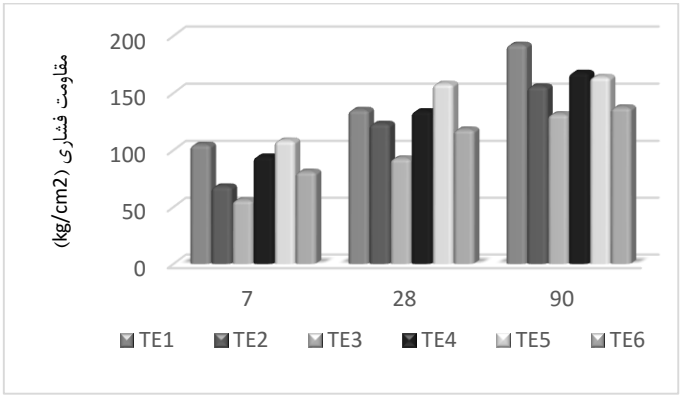
شکل۱ : نمودار تغییرات چگالی بتن و زمان Vebe.

۳-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری یکی از متداولترین آزمایشات بتـن سخت شده، می‌باشد. نمونه ها پس از رسیدن به سن مورد نظر از محل حوضچه عمل آوری خارج و تحت سرعت بارگذاری ۲۵۰ kg/s مقاومت فشاری آنها توسط دستگاه تعیین مقاومت فشاری به‌دست آمد. در شکل‌های ۲ الی ۶ تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتن غلتکی به‌ازای پارامترهای مختلف بررسی شده است.



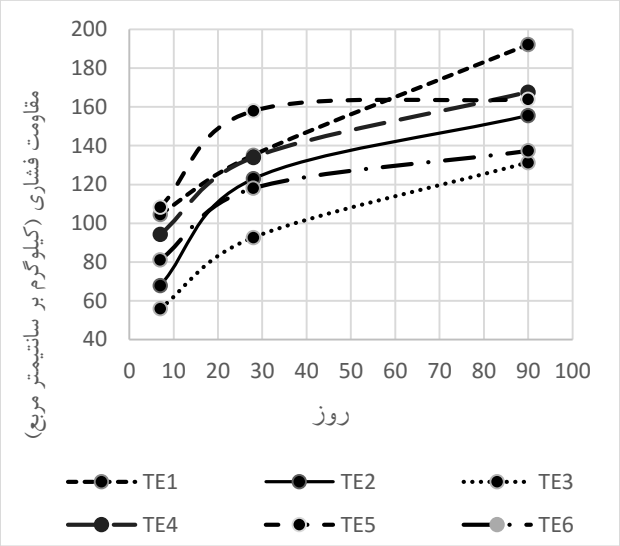
شکل۲ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف.



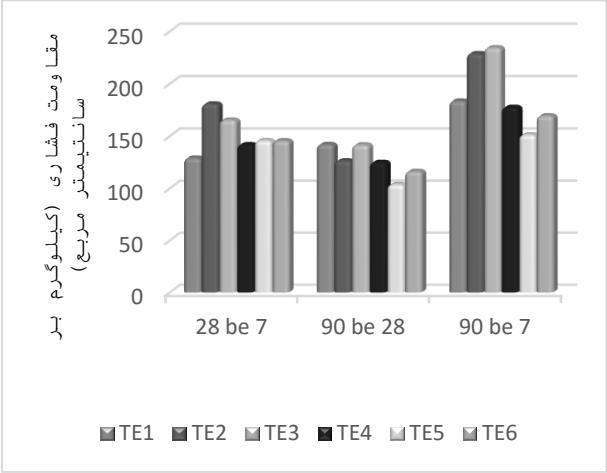
شکل۳ : مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف.

همانطوریکه مشاهده می‌گردد، ماکزیمم مقاومت فشاری مقاومت ۹۰ روزه مربوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE3 ماکزیمم مقاومت فشاری برای مقاومت ۲۸ روزه مربوط به نمونه TE5 و کمترین آن مربوط به نمونه TE3 و بالاخره ماکزیمم مقاومت فشاری برای مقاومت ۷ روزه مربوط به نمونه TE5 و کمترین آن مربوط به نمونه TE3 می‌باشد.

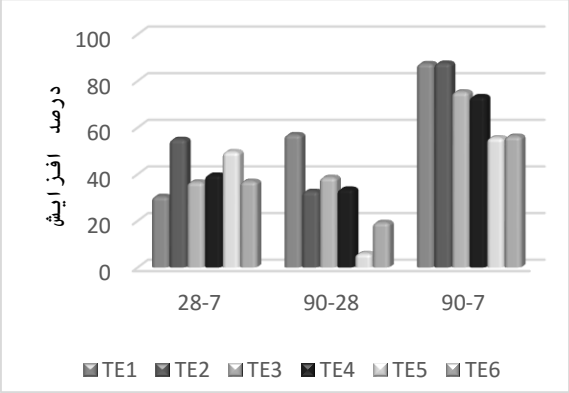
در مقایسه مقاومت ۹۰ و ۷ روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 و کمترین آن مربوط به TE5 می‌باشد. در مقایسه مقاومت ۹۰ و ۲۸روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 می‌باشد و کمترین آن مربوط به TE5 می‌باشد. در مقایسه مقاومت ۷ و ۲۸روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE2 و کمترین آن مربوط به TE1 می‌باشد.



شکل۴ : رشد مقاومت فشاری در سنین ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روزه.



شکل۵ : رشد نسبی مقاومت نمونه‌ها از سن ۷ به ۲۸ روزه.



شکل۶ : رشد نسبی مقاومت نمونه ها از سن ۲۸ به ۹۰ روزه.

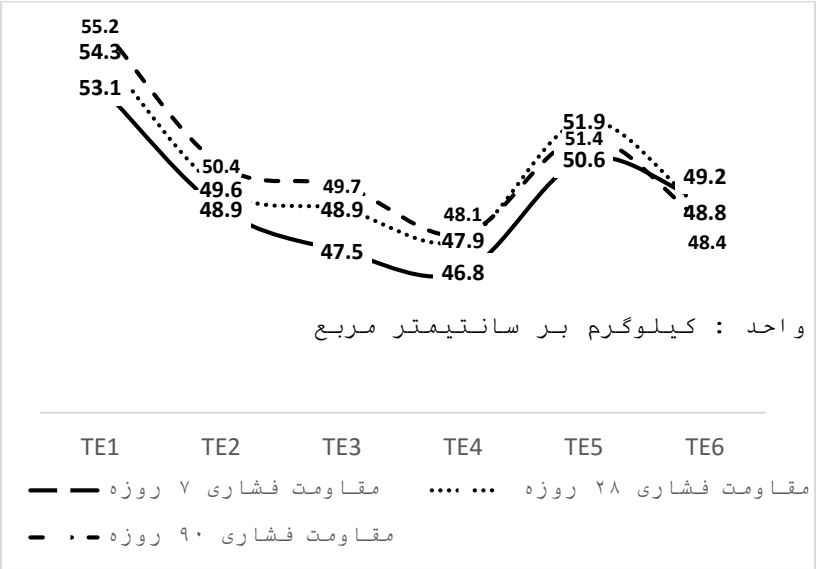
همانگونه که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است افزایش مقاومت در نمونه TE5 بعد از سن ۲۸ روزه تقریبا متوقف شده است. با توجه به شکل ۶ ماکزیمم رشد مقاومت در مقایسه مقاومت‌های ۷ و ۹۰ روزه مربوط به نمونه‌های TE1 و TE2 می‌باشد و کمترین آن مربوط به نمونه‌های TE5 و TE6 می‌باشد. با توجه به مطالب گفتـه شـده به استناد نمودارهای ۲ الی۶ می‌توان نتیجه گیری نمود که توف سبز شاهین دژ به عنوان پوزولان در ترکیب بتن غلتکی عملکرد مفیدی داراست.

با توجه به نمودار شکل ۶، بیشترین میزان رشد مقاومت در سن ۹۰ روزه در نمونه های TE1 و TE2 و بیشترین میزان درصد رشد در نمونه TE3 اتفاق افتاده است که بیشترین میزان توف سبز را در ترکیب خود داشته اند. به عبارت بهتر توف سبز و فرآیندهای شیمیایی آن در مقاومت فشاری ۲۸ روز اول تاثیر چشمگیری نداشته و تاثیرات آن پس از سن ۲۸ روز آشکارتر می‌گردد. همچنین با مقایسه نتایج TE2 و TE4 می‌توان گفت که در صورت استفاده از مصالح سنگی ریزتر به دلیل پر شدن خلل و فرج و امکان تراکم بهتر مقاومت بیشتری کسب می‌شود.

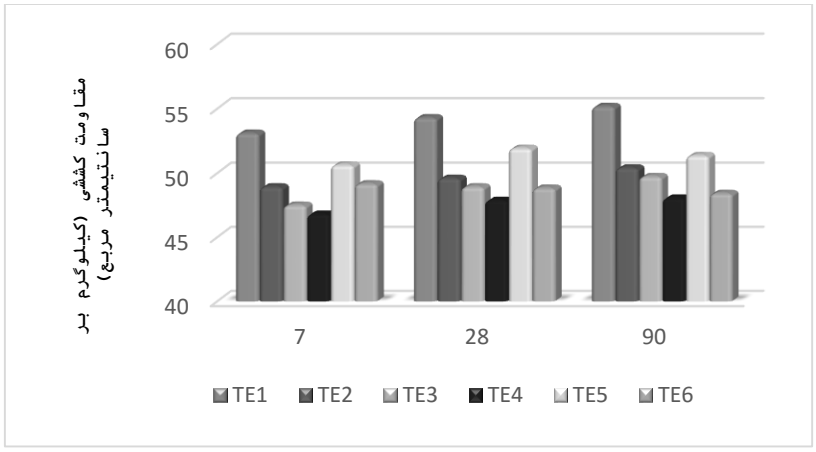
۳-۳- مقاومت کششی

برای انجام آزمایش گسیختگی (Splitting Test) از نمونه استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلیمتری استفاده می‌شود. نمونه روی محور افقی مابین صفحات جک هیدرولیکی قرار می‌گیرد بطوری که بار اعمال شده در طول قطری از استوانه که بطور قائم قرار دارد، وارد شود. به این ترتیب یک تنش کششی تقریباً یکنواخت در جهت عمود بر سطح بارگذاری به‌وجود می‌آید. بار با سرعت ثابتی اعمال می‌گردد، به نحوی که تنش کششی طبق استاندارد (ASTM) بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۲۳ مگاپاسکال در ثانیه قرار گیرد. از نمودارهای شکلهای ۷ الی ۱۱ که تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد، می‌توان چنین نتیجه گیری نمود:

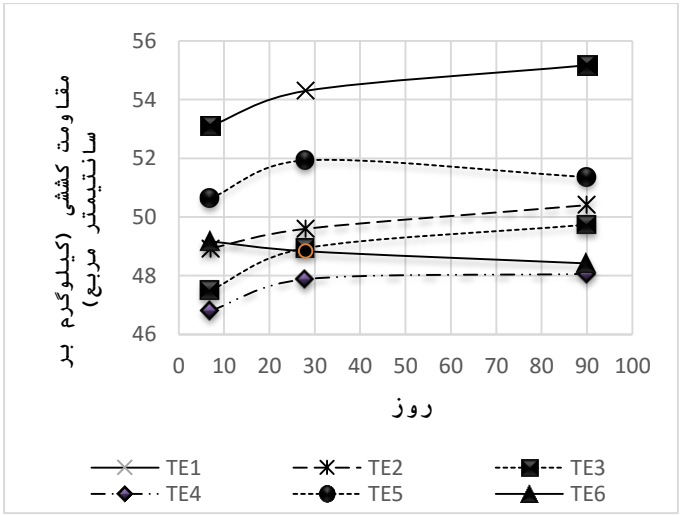
- ماکزیـمم مقاومـت کششی برای مقاومـت ۹۰ روزه مربـوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE4 می‌باشد.
- ماکزیـمم مقاومت کششی برای مقاومـت ۲۸ روزه مربـوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربـوط به نمـونه TE4 می‌باشد .
- ماکزیـمم مقاومت کششی برای مقاومـت ۷ روزه مربـوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربـوط به نمـونه TE4 می‌باشد.
- ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 می باشد و کمترین آن مربوط به TE6 می‌باشد.
- در مقایسه مقاومت ۹۰ و ۷ روزه، حداکثر رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 و کمترین آن مربوط به TE5 می-باشد.(اختلاف چندانی میان درصد TE1، TE2 و TE3 وجود ندارد)
- در مقایسه مقاومت ۷ و ۲۸روزه، حداکثر رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 و کمترین آن مربوط به TE6 می‌باشد.
- با توجه به شکل۷ مقاومت کششی نمونه TE5 بعد از سن ۲۸ روزه کاهش یافته است.
- با توجه به شکل شماره ۹، در مقایسه مقاومت‌های ۷ و ۹۰ روزه،حداکثر رشد مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های TE3 و TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE6 می‌باشد. نمونه TE6 در بازه ۹۰ روزه به نسبت ۲۸ و هفت روزه با کاهش مقاومت مواجه شده است.
- با توجه به نمودارهای فوق بیشترین میزان رشد مقاومت کششی در سن ۹۰ روزه در نمونه های TE1 و بیشترین میزان درصد رشد در نمونه TE3 اتفاق افتاده است که بیشترین میزان توف سبز را در ترکیب خود داشته‌اند. لذا می‌توان نتیجه گیری کرد که میزان سیمان در ترکیب بتن تاثیر بیشتری در مقاومت کششی اولیه بتن داشته و توف سبز و فرآیندهای شیمیایی آن در مقاومت کششی در سنین اولیه کم تاثیر بوده بطوریکه اثرات آن پس از سن ۲۸ روز و در بلند مدت مشهودتر می‌گردد



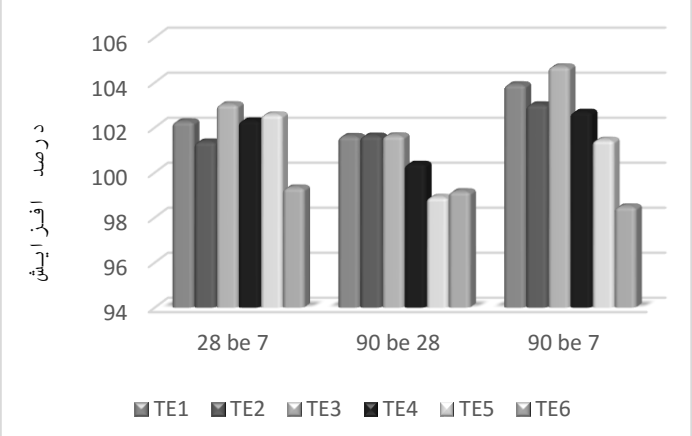
شکل۷ : تغییرات مقاومت کششی نمونه ها در سنین مختلف.



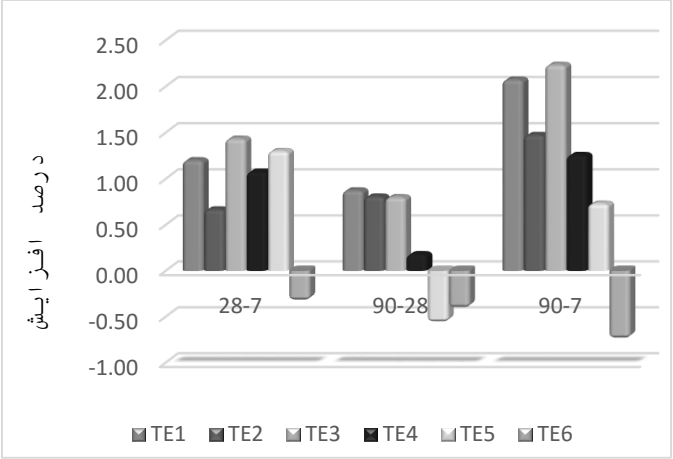
شکل۸ : مقایسه میزان مقاومت کششی در سنین مختلف.



شکل۹ : رشد مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف.



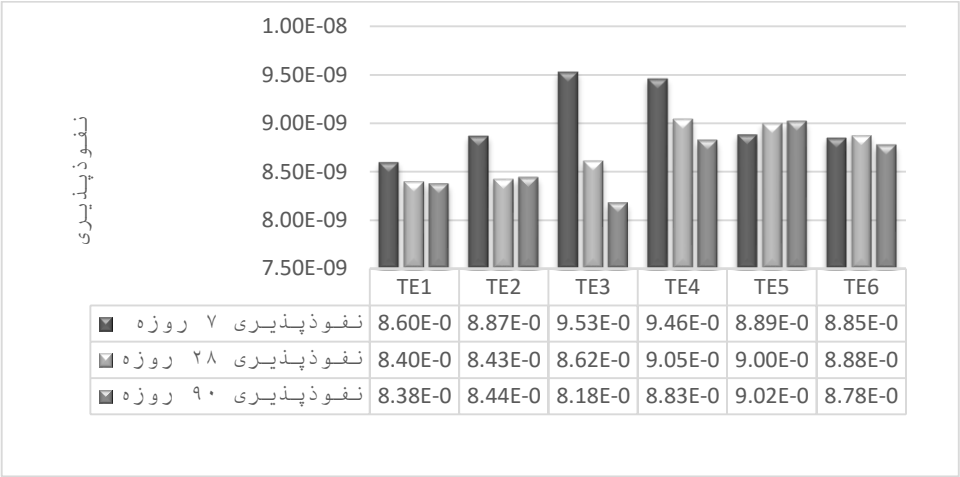
شکل۱۰ : رشد نسبی مقاومت کششی نمونه‌ها.



شکل۱۱ : مقایسه رشد مقاومت کششی درسنین مختلف.

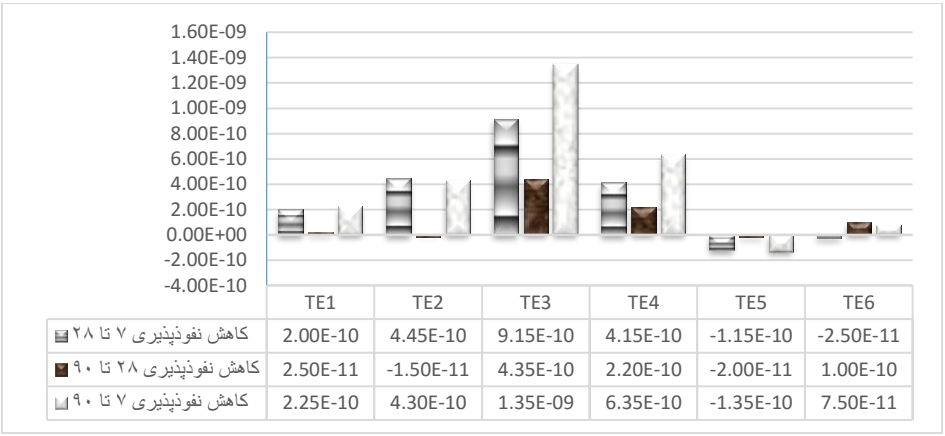
۳-۴-نفوذپذیری

نمونه‌های مورد استفاده جهت قرارگیری در دستگاه نفوذپذیری نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلیمتری می‌باشند. نتایج نفوذپذیری سنین ۷، ۲۸ و۹۰ روزه نمونه‌های بتنی در ادامه ارائه می‌گردد. در شکلهای ۱۲ و۱۳ که نمودارهای مربوط به مقادیر نفوذپذیری نمونه‌ها و کاهش میزان نفوذپذیری را نشان می‌دهند، مشاهده می‌گردد که در نمونه‌های ۷ روزه کمترین میزان نفوذپذیری در نمونه TE1 و بیشترین مقدار آن در نمونه TE3، در نمونه‌های ۲۸ روزه، کمترین میزان نفوذپذیری در نمونه TE1 و بیشترین مقدار آن در نمونه TE4 و در نمونه‌های ۹۰ روزه کمترین میزان نفوذپذیری در نمونه TE3 و بیشترین مقدار آن در نمونه TE5 رخ داده است. نکته قابل توجه در همه نمونه ها کاهش مقدار نفوذپذیری به مرور زمان می‌باشد. در ۲۸ روز اول بیشترین مقدار کاهش در نفوذپذیری مربوط به نمونه TE3 و کمترین مقدار کاهش مربوط به TE5 می‌باشد. در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز از نمونه‌گیری بیشترین مقدار کاهش در نفوذپذیری مربوط به نمونه TE3 و کمترین مقدار کاهش مربوط به TE5 می‌باشد و در فاصله زمانی ۷ تا ۹۰ روز از نمونه‌گیری بیشترین مقدار کاهش در نفوذپذیری مربوط به نمونه TE3 و کمترین مقدار کاهش مربوط به TE5 می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات نفوذپذیری می‌توان گفت: اولا به طور کل با گذشت زمان مقدار نفوذپذیری در بتن با ترکیب توف سبز کاهش می‌یابد، ثانیا مقدار توف سبز در ترکیب بتن و مقدار نفوذپذیری ارتباط معکوسی با هم دارند. البته این رابطه در نمونه‌هایی با سن بیشتر از ۲۸ روز مشهودتر می‌گردد. ثالثا با افزایش مقدار آب در ترکیب بتن مقدار نفوذپذیری بیشتر می‌شود.



	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
نفوذپذیری ۷ روزه	8.60E-0	8.87E-0	9.53E-0	9.46E-0	8.89E-0	8.85E-0
نفوذپذیری ۲۸ روزه	8.40E-0	8.43E-0	8.62E-0	9.05E-0	9.00E-0	8.88E-0
نفوذپذیری ۹۰ روزه	8.38E-0	8.44E-0	8.18E-0	8.83E-0	9.02E-0	8.78E-0

شکل۱۲ : مقادیر نفوذپذیری نمونه‌ها در سنین مختلف.



	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
کاهش نفوذپذیری ۷ تا ۲۸	2.00E-10	4.45E-10	9.15E-10	4.15E-10	-1.15E-10	-2.50E-11
کاهش نفوذپذیری ۲۸ تا ۹۰	2.50E-11	-1.50E-11	4.35E-10	2.20E-10	-2.00E-11	1.00E-10
کاهش نفوذپذیری ۷ تا ۹۰	2.25E-10	4.30E-10	1.35E-09	6.35E-10	-1.35E-10	7.50E-11

شکل۱۳ : کاهش میزان نفوذپذیری در نمونه‌های ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روزه.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از توف سبز شاهین دژ در ترکیب بتن‌های غلتکی می‌تواند مشخصات مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و نفوذپذیری را بهبود دهد، همچنین تاثیر استفاده از توف سبز در مشخصات بتن به ویژه در مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مشهودتر می‌باشد. تاثیر استفاده از توف سبز در ترکیب بتن غلتکی برای همه مشخصات فیزیکی مورد آزمایش تقریبا پس از سن ۲۸ روز اتفاق می‌افتد و در سن ۹۰ روزه این تاثیر بیشتر می‌گردد. با توجه به طرح‌های اختلاط مورد بررسی می‌توان گفت مخلوط نمونه بتنی TE1 بهترین ترکیب را داشته و نتایج مناسب‌تری برای مقاومت فشاری، کششی و نفوذپذیری را دارا می‌باشد. مقدار توف سبز در ترکیب TE1 به میزان ۳۰٪ سیمان می‌باشد که با توجه به نتایج می‌تواند معیاری برای انجام طرح های اجرایی قرار گیرد.

مراجع

[1] Dussart, J. et al. (1998). *Roller compacted concrete for the petit South dam*. Travaux Magazine, No.688, 14-21.
[2] Nagayama, I., Jikan, S. (2003). *30 Years History of Roller Compacted Concrete Dams in Japan*. Proceedings of 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete. Madrid, pp. 27–38.
[3] Schrader. E. k. (1994). Roller Compacted Concrete Dams-Properties and Cracking Myths, Misconceptions, New and Controversial Issue, *International Scientific Workshop on Roller Compacted Concrete Dams*. University of Laval.
[۴] داسمه اردشیر . (۱۳۷۸) *عوامل موثر بر فرصت کاری بتن غلتکی* . پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده فنی ، دانشگاه تهران.
[5] American Concrete Institute. (1999). *Roller Compacted Mass Concrete*, ACI 07.5R.99.
[6] ASTM C33M-16e1. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken.
[7] ASTM D4791-10. (2010). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*, ASTM International, West Conshohocken.
[8] United State Army Corps of Engineering (2000). *Roller Compacted Concrete*. EM 1110-2-2006
[9] ASTM C150M-16e1. (2016). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
[10] ASTM C1017M-13e1 (2013). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*. ASTM International. West Conshohocken, PA.
[11] ASTM C494M-16. (2016). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
[12] American Concrete Institute. (2002). *Guide for Selecting Properties for No Slump Concrete*. ACI 211.3 R-02.