

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

صادق دردائی^۱، رضا آقاییاری^{۲*}، بابک نیک نیا^۳

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 می یابد. 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 شاهین دژ که از پوزولانهای در دسترس در استان آذربایجان غربی می باشد، 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 آقاییاری

پست الکترونیکی: reza_agh@razi.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.40462 شناسه دیجیتال

http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.40462

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

۱- مقدمه

رایج‌ترین کاربرد بتن غلتکی (یا بتن 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 به کار گرفته شده است [۱]. مزایای کاربرد بتن غلتکی را می‌توان عدم نیاز به قالب‌بندی با توجه به روش 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 می‌شود که بتنی با اسلامپ صفر را بتوان توسط تجهیزات مورد استفاده در عملیات خاکی حمل، بتن‌ریزی و تراکم 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 بتن‌های متعارف مورد استفاده قرار گیرد.

مخلوط‌های بتن غلتکی با توجه به مقدار مواد سیمانی (سیمان+پوزولان) در سه رده طبقه بندی می‌شود:

- مخلوط‌هایی با مواد سیمانی کم (مواد سیمانی کمتر از 100 kg/m^3)
- مخلوط‌هایی با مواد سیمانی زیاد (مواد سیمانی بیشتر از 150 kg/m^3)
- بتن غلتکی با عیار متوسط (مقدار متوسط مواد سیمانی)

طبق بررسی‌های انجام شده، تعداد قابل توجهی از سدهای بتن غلتکی موجود از مخلوط‌های کم عیار با مواد سیمانی کمتر از 100 کیلوگرم بر مترمکعب استفاده نموده‌اند. در این نوع مخلوط‌ها، با به حداقل رساندن مقدار سیمان و پوزولان، در هزینه‌های مربوط به تهیه و حمل مصالح 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 75 میکرون می‌توان به نفوذپذیری در حد بتن غلتکی پرسیمان با نفوذپذیری معمولی رسید [۳]. نفوذپذیری مخلوط‌های مواد سیمانی زیاد نیز معمولاً کم می‌باشد. درصد قابل توجهی از مواد سیمانی را پوزولانها شامل می‌شوند و در نتیجه کسب مقاومت اولیه اینگونه مخلوط‌ها 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 مخلوط‌ها بیشتر مستعد ترک خوردن می‌باشند. حدود 22 درصد از سدهای بتن غلتکی ساخته شده تا سال 1998 میلادی از بتن غلتکی با عیار متوسط (با مواد سیمانی بین 100 الی 150 کیلوگرم بر مترمکعب) استفاده کرده‌اند. در بعضی از سازه‌ها ترکیبی از انواع این بتن استفاده شده است، به عنوان نمونه بخش خارجی سد Copperfield استرالیا از بتن غلتکی با عیار متوسط (80 kg/m^3 سیمان 30 kg/m^3 پوزولان) ولی بخش داخلی بدنه آن با بتن کم عیار اجرا گردیده است [۴].

همزمان با گسترش استفاده از بتن غلتکی در دنیا در دهه اخیر گزینه استفاده از سدهای بتن غلتکی مورد توجه صنعت سدسازی ایران نیز قرار گرفته است. سد پای پل (تنظیمی کرخه)، سد جگین، سد زبردان از جمله نمونه‌های کاربرد این فناوری در کشورمان بوده است. بتن غلتکی مصالح و روشی نوین برای ساخت اقتصادی سازه‌های 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 در حال مطالعه می‌باشد لزوم تحقیق در خصوص امکان استفاده و تاثیرات انواع پوزولان‌های 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 [5] عبارتست از: "مواد خام یا کلسینه شده‌ای که خواص پوزولانی داشته باشد. به‌عنوان نمونه از خاکسترهای آتشفشانی یا پومیس، چرتها یا پالینی، شیلها، توفها و برخی از خاکهای 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 به دلیل 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 از جمله می‌توان به مناطق موجود در رشته کوه البرز، زون سنندج - سیرجان، زون ارومیه - دختر و ایران مرکزی که سطح وسیعی از مساحت 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) و نیز 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 ارس ۲ 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 زمینه 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 بتن RCC تغییر خواهد نمود؟ آیا میزان تاثیر اختلاط توف سبز در بتن RCC تاثیرگذار است؟ و آیا نتایج آنالیزهای صورت گرفته جایگزینی توف سبز و پوزولان را در بتن RCC تأیید 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 آنجایی که مصالح سنگی بخش عمده (۷۵-۸۵ درصد) حجم بتن غلتکی را تشکیل می‌دهند، لذا کمیت و کیفیت مصالح 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، جداسدگی 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 در طرح 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 به حداقل 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 مصالح و پس ماندهای موجود حاصل از یک خاکبرداری تامین شوند.

مصالح 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 مصالح گرد گوشه یا شکسته و حتی سرند مجدد را در برگیرد [۵]. در این تحقیق از مصالح سنگی مورد استفاده در کارگاه سد سیلوه استفاده شده است. این مصالح از بستر رودخانه "لاوین چای" برداشت می‌شود.

۲-۱-۱- مصالح سنگی درشت دانه

یکی از اهداف اصلی در طرح اختلاط بتن غلتکی استفاده از حداکثر اندازه درشت دانه می باشد تا مقدار مواد سیمانی مصرفی کاهش و در نتیجه حرارت هیدراتاسیون کمتری تولید شود. مشکل عمده در استفاده از حداکثر اندازه سنگدانه، مشکل جداسازی در سنگدانه‌ها است. در حالت کلی مخلوط‌هایی با حداکثر بعد اندازه سنگدانه کوچکتر، جداسازی کمتری را نشان می‌دهند. امروزه حداکثر سنگدانه‌ها را به عموماً به ۲ اینچ (۵۰ میلی‌متر) محدود می‌کنند. وجود سنگ دانه های پهن و سوزنی شکل در بتن حجیم متعارف به شدت محدود گردیده است. با این وجود در مخلوط بتن غلتکی 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 میزان ۴۰ درصد مصالح سنگی پهن و سوزنی شکل که مطابق استاندارد ASTM D۴۷۹۱ با ضریب شکل ۳ به ۱ تعریف شده‌اند، مشکل خاصی ایجاد نمی‌نمایند [۷]. گروه مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا نیز برای مصالح سنگی پهن و سوزنی شکل درصدی حدود ۲۵ درصد را تعریف نموده است. به‌هرحال در صورتی که بتوان با مصالح 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 بتن غلتکی ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای با دانه بندی مورد استفاده در بتن متعارف متفاوت باشد. استفاده از سنگدانه‌های بزرگتر به طور چشمگیری احتمال جداسازی سنگدانه‌ها را در حین فرایند حمل و پخش بتن غلتکی افزایش می‌دهد و این در حالی است که تأثیر چندانی بر کاهش هزینه‌های بتن غلتکی ندارد [۸]. راه حل کنترل جداسازی سنگدانه‌ها، استفاده از رده‌های بیشتری از مصالح سنگی و درصدهای زیاد از مصالح ریزدانه می‌باشد. در کل با افزایش قطر حداکثر دانه‌ها، خطر جداسازی به شدت افزایش می‌یابد در حالی که استفاده از درشت دانه های شکسته و ریزدانه‌های گرد گوشه این خطر را به میزان قابل توجهی کاهش خواهد داد.

۲-۱-۲- مصالح 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 تأثیر دارد. ماسه‌هایی با دانه‌بندی متداول بتن 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 سنگدانه‌ها (ریزتر از ۷۵ میکرون)

در بتن غلتکی با عیار مواد سیمانی 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 غلتکی برای افزایش کارایی و پرکردن فضاهای خالی به کار می‌رود. این مواد ریز افزوده معمولاً از جنس سیلت طبیعی غیر پلاستیک و ماسه 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 کارایی، نسبت آب به مواد سیمانی کاهش و مقاومت دراز مدت نیز به تبع آن افزایش می‌یابد.

۲-۲- مواد سیمانی

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 سیمان آذربادگان خوی استفاده شد. سیمان تیپ II معمولاً به منظور پیشگیری از حمله سولفات‌ها و حفاظت میلگردها در برابر حمله نمکهای کلر استفاده می‌شود. سیمان تیپ II مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ASTM-C150 [9] تولید می‌شود مشخصات سیمان پرتلند نوع II تولیدی کارخانه سیمان خوی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: ارزیابی مواد اولیه سیمان تیپ II خوی

ارزیابی	درصد اکسیدها		اکسیدهای سیمان
	استاندارد	سیمان	
مجاز	۶۳ الی ۶۶	۶۴،۵۹	CaO
مجاز	۲۰ الی ۲۲	۲۲،۰۵	SiO ₂
مجاز	۷،۵ تا ۵،۵	۵،۰۴	Al ₂ O ₃
مجاز	۳ الی ۴،۵	۳،۴۷	Fe ₂ O ₃
مجاز	۱ الی ۳	۱،۷۳	SO ₃

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند نوع II

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

۲-۳- مواد افزودنی

امروزه استفاده از مواد افزودنی جایگزین سیمان با توجه به مزایای فنی (کاهش حرارت هیدراتاسیون) و مزایای اقتصادی و فراوانی منابع معدنی پوزولان جایگاه ویژه‌ای در طرح اختلاط بتنهای غلتکی دارد. همچنین در صورت احتمال آلودگی قلیائی مصالح 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 معمولاً 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 سندانج- 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 سد در حال احداث و مطالعه در استان آذربایجان غربی قرار دارد، انتخاب گردید. این معدن در نزدیکی شهرستان شاهین دژ و سدهای در حال مطالعه آجرلوی شاهین دژ، باروق میاندوآب و سدهای در حال ساخت سد سیمینه رودشاهین دژ، سد سیلوه و سد 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.

جدول ۳: ترکیبات شیمیایی توف سبز شاهین دژ

ترکیب شیمیایی	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	سایر ترکیبات
درصد	۱،۲۵	۲،۹۵	۲،۱۲	۸،۳۰	۵،۲۵	۹،۶۰	۶۷،۰۸	۳،۴۵

در تهیه نمونه‌های بتنی از آب کارگاه سد سیلوه که آزمایشات لازم جهت استفاده در بتن 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 سولفاتی می‌باشد. در این پژوهش به منظور رسیدن به نسبت آب به سیمان حداقل با حفظ کارایی مناسب بتن، از مقادیر مختلف فوق روان کننده استفاده شد تا یک نسبت ثابت برای همه طرح‌ها به دست آید. فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق با وزن مخصوص ۱/۱۹ گرم بر سانتیمتر مکعب دارای نام تجاری MaxFlow بوده و بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر با استانداردهای ASTM-C1017 [۱۰] و ASTM-C494 [۱۱] مطابقت داشت.

۲-۶- آزمایش های انجام شده بر روی مصالح

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

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

جدول ۴: 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	-	-	-

جدول ۵: دانه بندی شن درشت (بادامی)

شماره از 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	-	-	-

جدول ۶: دانه بندی ماسه، مدول نرمی و ارزش ماسه‌ای

شماره از 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			۸۵٪	
نرمی			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 استوانه‌ای 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 برزبلی و ۶ نمونه جهت اخذ مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی در نظر گرفته شد. زمان Vebe بتن تازه سخت نشده در این تحقیق ۱۱ تا ۱۷ ثانیه به دست آمد. طرح اختلاط منظور شده در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی مطابق با استاندارد [۱۲] ACI در جدول ۸ ارائه می‌گردد.

جدول ۷: 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

جدول ۸: طرح های اختلاط برای نمونه بتن غلتکی

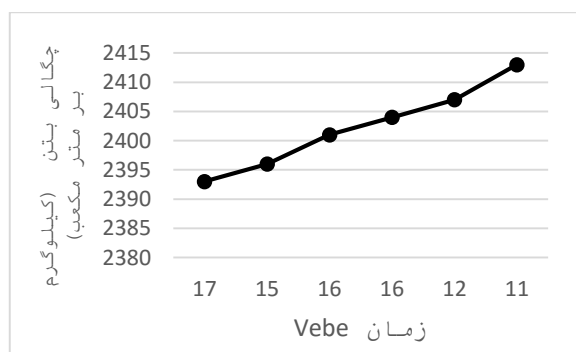
نمونه	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
آب	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵
مواد سیمانی	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
توف سبز	۴۰	۵۵	۶۵	۳۵	۲۰	۲۰
سیمان	۱۳۰	۱۱۵	۱۰۵	۱۱۵	۱۳۰	۱۳۰
ماسه طبیعی	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
شن ریز	۷۳۵	۷۳۵	۷۳۵	۷۲۰	۷۲۰	۷۲۰
شن درشت	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰

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)

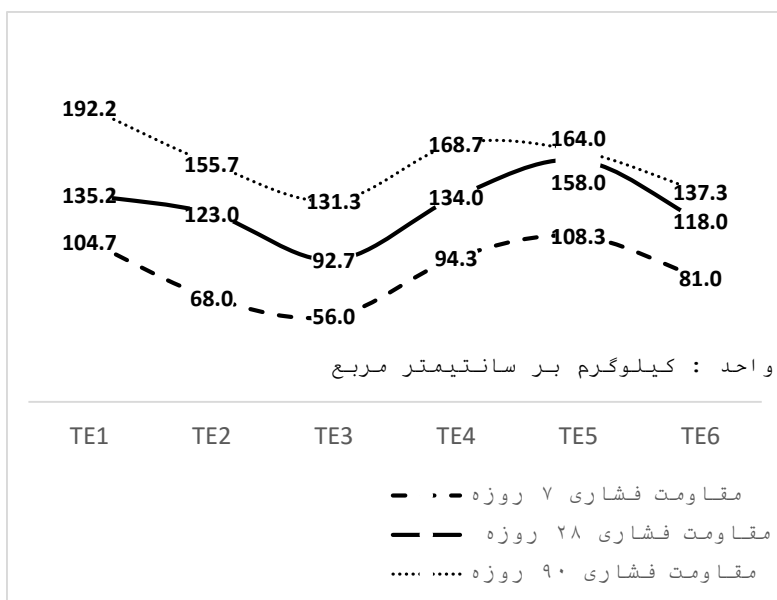
زمان Vebe نمونه بتن تازه در این تحقیق مابین ۱۱ تا ۱۷ ثانیه به دست آمد که می توان نتیجه گرفت بتن تولید شده در این تحقیق قابلیت استفاده به عنوان بتن غلتکی را دارد. همچنین با توجه به میزان آب و مواد سیمانی موجود در مخلوط بتن تولیدی نتایج بدست آمده مناسب می باشد. با توجه به نمودار شکل ۲ که تغییرات میزان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



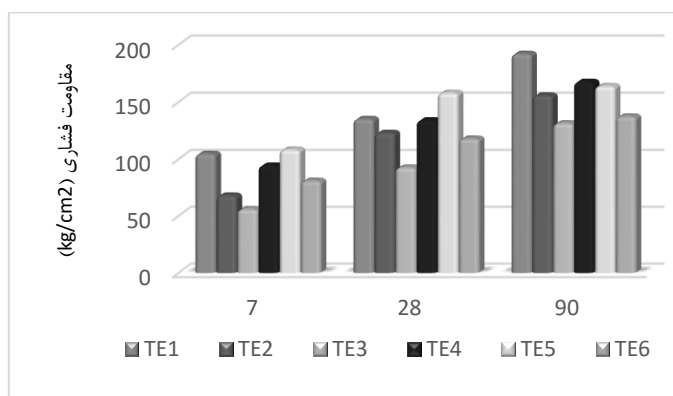
شکل ۱: نمودار تغییرات چگالی بتن و زمان Vebe.

۲-۳- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری یکی از متداولترین آزمایشات بتن سخت شده، می‌باشد. نمونه‌ها پس از رسیدن به سن مورد نظر از محل حوضچه عمل آوری خارج و تحت سرعت بارگذاری 250 kg/s مقاومت فشاری آنها توسط دستگاه تعیین مقاومت فشاری به دست آمد. در شکل‌های ۲ الی ۶ تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی به‌ازای پارامترهای مختلف بررسی شده است.



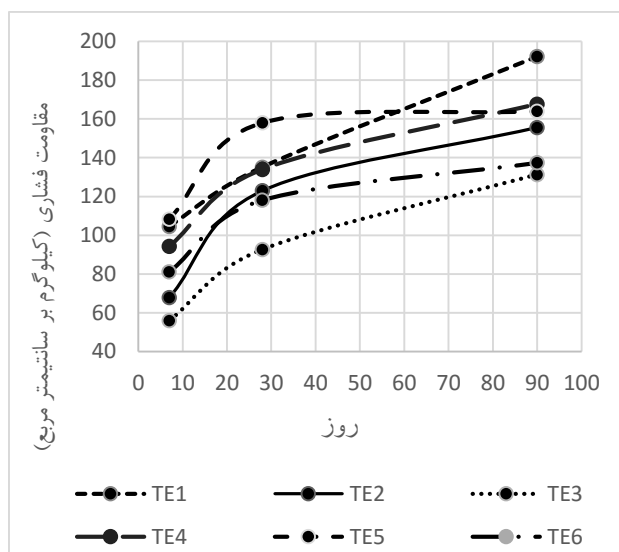
شکل ۲: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف.



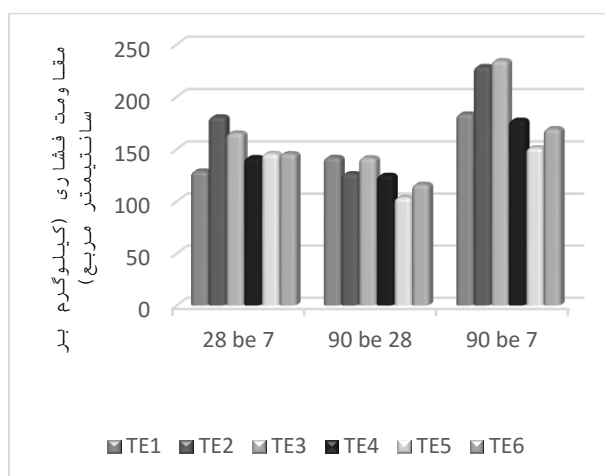
شکل ۳: مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف.

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.

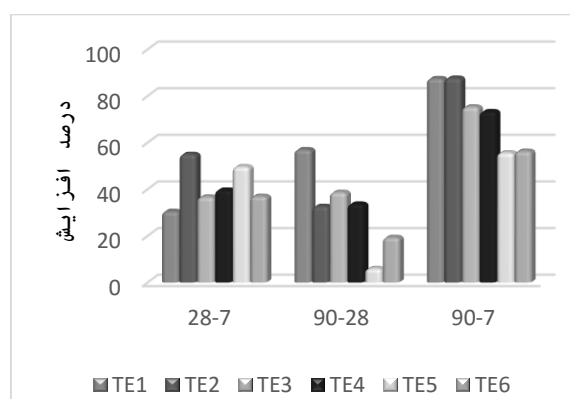
در مقایسه مقاومت ۹۰ و ۷ روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 و کمترین آن مربوط به TE5 می‌باشد. در مقایسه مقاومت ۹۰ و ۲۸ روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 می‌باشد و کمترین آن مربوط به TE5 می‌باشد. در مقایسه مقاومت ۷ و ۲۸ روزه، ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE2 و کمترین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



شکل ۴: رشد مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه.



شکل ۵: رشد نسبی مقاومت نمونه‌ها از سن ۷ به ۲۸ روزه.



شکل ۶: رشد نسبی مقاومت نمونه‌ها از سن ۲۸ به ۹۰ روزه.

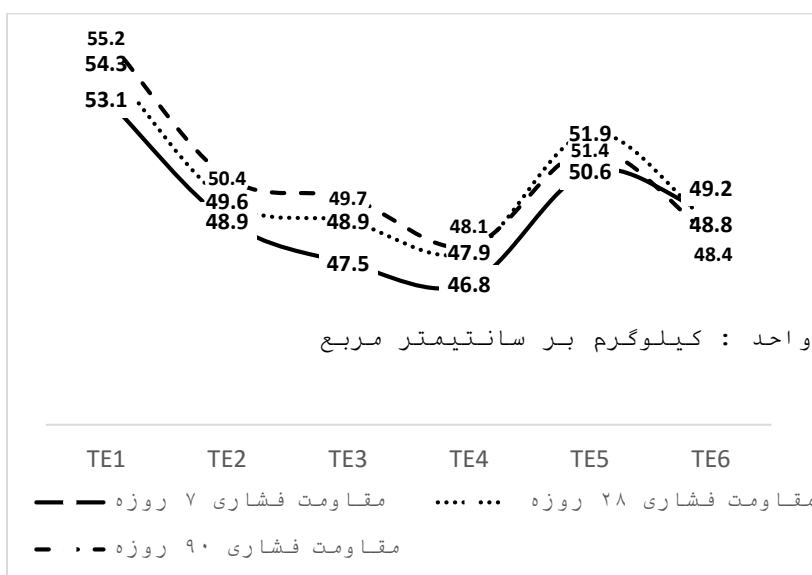
همانگونه که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است افزایش مقاومت در نمونه TE5 بعد از سن ۲۸ روزه تقریباً متوقف شده است. با توجه به شکل ۶ ماکزیمم رشد مقاومت در مقایسه مقاومت‌های ۷ و ۹۰ روزه مربوط به نمونه‌های TE1 و TE2 می‌باشد و کمترین آن مربوط به نمونه‌های TE5 و TE6 می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده به استناد نمودارهای ۲ الی ۶ می‌توان نتیجه‌گیری 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 نمونه‌های TE1 و TE2 و بیشترین میزان درصد رشد در نمونه TE3 اتفاق افتاده است که بیشترین میزان توف سبز را در ترکیب خود داشته‌اند. 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.

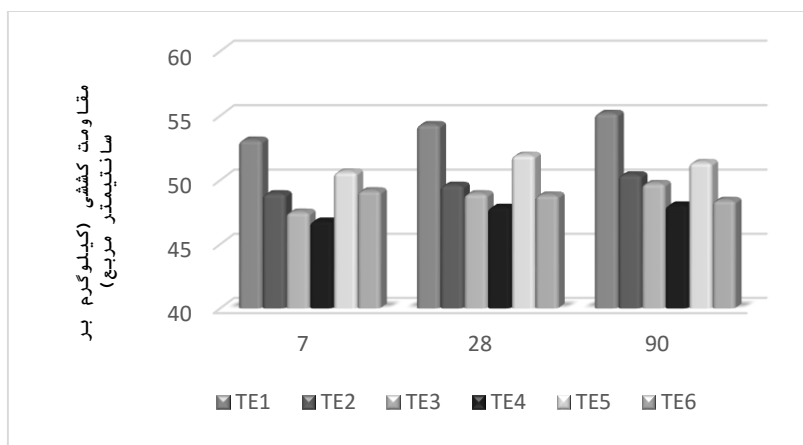
۳-۳- مقاومت کششی

برای انجام آزمایش گسیختگی (Splitting Test) از نمونه استوانه‌ای 150×300 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 به وجود می‌آید. بار با سرعت ثابتی اعمال می‌گردد، به نحوی که تنش کششی طبق استاندارد (ASTM) بین $0/011$ تا $0/023$ مگاپاسکال در ثانیه قرار گیرد. از نمودارهای شکل‌های ۷ الی ۱۱ که تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود:

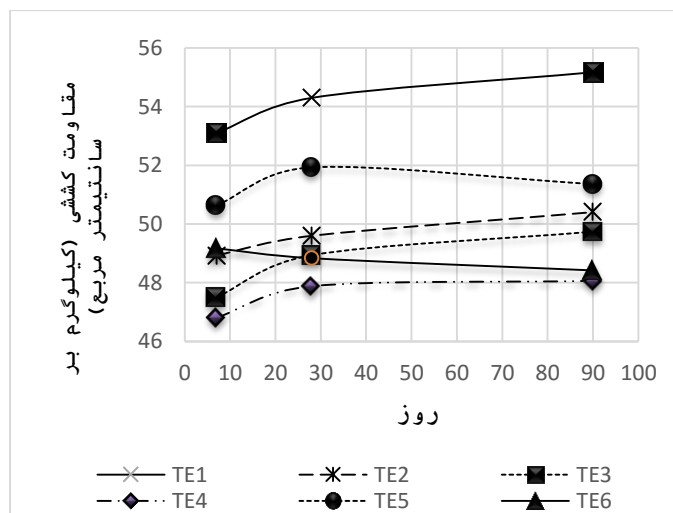
- ماکزیمم مقاومت کششی برای مقاومت ۹۰ روزه مربوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE4 می‌باشد.
- ماکزیمم مقاومت کششی برای مقاومت ۲۸ روزه مربوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE4 می‌باشد.
- ماکزیمم مقاومت کششی برای مقاومت ۷ روزه مربوط به نمونه TE1 و کمترین آن مربوط به نمونه TE4 می‌باشد.
- ماکزیمم درصد رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 می‌باشد 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 می‌باشد. (اختلاف چندانی میان درصد TE1، TE2، TE3 وجود ندارد)
- در مقایسه مقاومت ۷ و ۲۸ روزه، حداکثر رشد مقاومت مربوط به نمونه TE3 و کمترین آن مربوط به TE6 می‌باشد.
- با توجه به شکل ۷ 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 نمونه‌های TE1 و بیشترین میزان درصد رشد در نمونه TE3 اتفاق افتاده است که بیشترین میزان توف سبز را در ترکیب خود داشته‌اند. لذا می‌توان نتیجه‌گیری 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



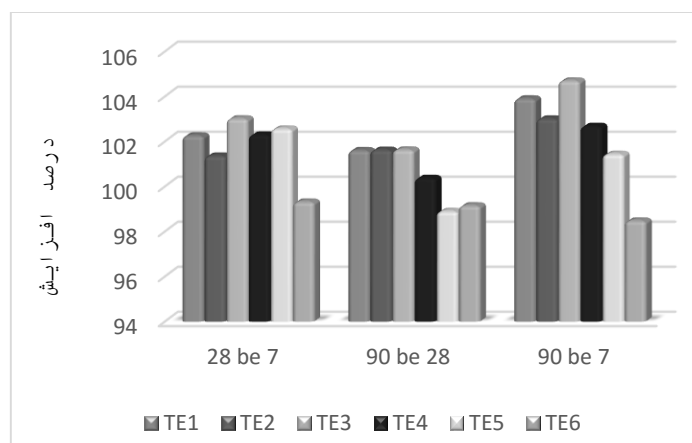
شکل ۷: تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف.



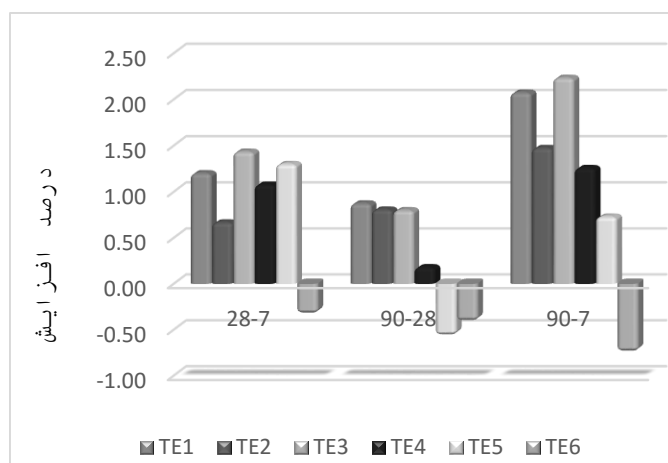
شکل ۸: مقایسه میزان مقاومت کششی در سنین مختلف.



شکل ۹: رشد مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف.



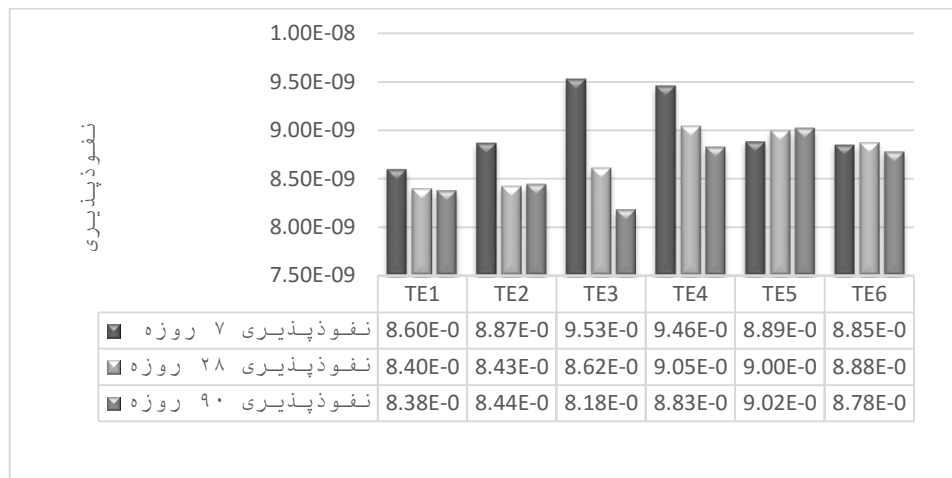
شکل ۱۰: رشد نسبی مقاومت کششی نمونه‌ها.



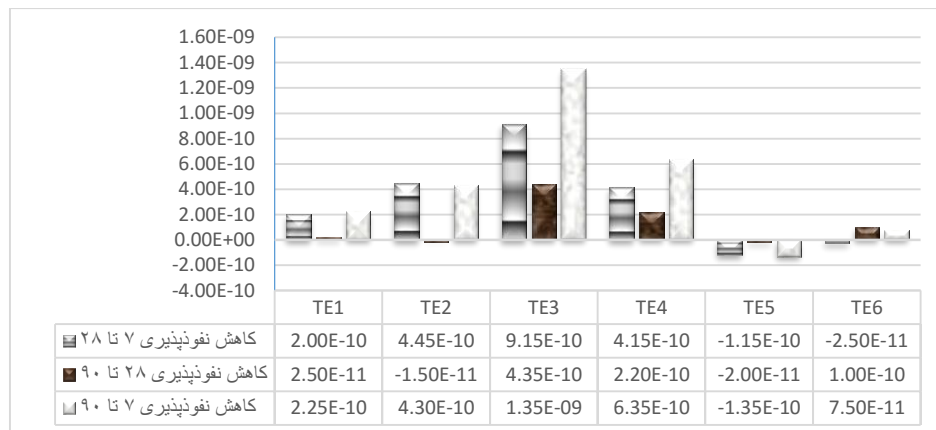
شکل ۱۱: مقایسه رشد مقاومت کششی در سنین مختلف.

۳-۴- نفوذپذیری

نمونه‌های مورد استفاده جهت قرارگیری در دستگاه نفوذپذیری نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 میلیمتری می‌باشند. نتایج نفوذپذیری سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی در ادامه ارائه می‌گردد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ 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 نمونه‌ها 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: اولاً به طور کل با گذشت زمان مقدار نفوذپذیری در بتن با ترکیب توف سبز کاهش می‌یابد، ثانیاً 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. ثالثاً با افزایش مقدار آب در ترکیب بتن مقدار نفوذپذیری بیشتر می‌شود.



شکل ۱۲: مقادیر نفوذپذیری نمونه‌ها در سنین مختلف.



شکل ۱۳: کاهش میزان نفوذپذیری در نمونه‌های 7، 28 و 90 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 تقریباً پس از سن 28 روز اتفاق می‌افتد و در سن 90 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 30٪ سیمان می‌باشد که با توجه به نتایج می‌تواند معیاری برای انجام طرح‌های 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.
- [4] 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.