

Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods

Mohammadhossein Ahmadian Khameneh¹, Hassan Afshin^{2*} ,
Mehrdad Emami Tabrizi³, Yasser Alilou⁴, Gholamreza Qudsi Sharif⁵

1. Master Student of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor of Structural Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
3. Assistant Professor of geotechnic Engineering, faculty of Civil & Environmental Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
4. Head of Civil Engineering and Architecture Working Group, Scientific, Research and Technology Organization of Alborz Province Technology, karaj, Iran.
5. Instructor of the Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Abstract

The use of shotcrete is increasing rapidly. Due to the advancements in equipment and additives in the construction industry, there is an excellent need for high-strength shotcrete. Using high-strength fiber-reinforced shotcrete for slope stabilization, masonry and concrete structures, and underground structures improves quality and adhesion and increases work speed. Also, with increasing strength and consequently reducing the dimensions of sections, designs become more economical. In this research, using different mix designs, the effects of aggregate gradation and additives such as micro silica, superplasticizer, retarder, and micro recycled steel fibers on the strength and performance of shotcrete in laboratory and field conditions by two methods of wet and dry spraying were investigated. Based on the results, achieving high-strength shotcrete in the wet spraying method is more feasible, and a 28-day compressive strength of 987 kg/cm² was obtained in wet fiber-reinforced shotcrete. Compressive strength and energy absorption increased by 80% and 77%, respectively, compared to conventional wet fiber-reinforced shotcrete. Also, based on the toughness tests, the use of micro-recycled steel fibers has been effective in preventing the spread of micro cracks and controlling deformations, and in high-strength shotcrete, it has led to an increase in compressive strength and energy absorption of 28% and 97%, respectively, compared to the same design without using fibers. Mix designs WHSSH-0% and WHSFSH-0% showed that using 1% by volume of recycled microfibers improves compressive strength by 28%. On the other hand, in the final mix design, different percentages of accelerators were used to make it possible to execute thick layers and spray to varying angles without excessive rebound. The results showed that using accelerators reduces compressive strength by an average of 25% and reduces the compressive strength growth rate by 80% up to 28 days of age. Also, based on the results, with the improvement of strength in the mix designs for wet and dry shotcrete, in addition to a significant increase in the maximum load in the flexural test, the slip of fibers during cracking is reduced, and some of the fibers are broken during deformation. By using 1% by volume of micro recycled steel fibers in all fiber-reinforced designs, the service level is met based on the required energy absorption (60-100 joules). In the high-strength fiber-reinforced shotcrete design (WHSFSH-0%), a 75% increase in energy absorption compared to conventional fiber-reinforced shotcrete (WNFSH) indicates better performance of high-strength fiber-reinforced shotcrete, especially wet high-strength shotcrete, in terms of maximum bearable load before cracking and continued load-bearing capacity after cracking at the service level. Based on the results of energy absorption at the ultimate performance level (at a central displacement of 40 mm), the use of 1% by volume of micro-recycled steel fibers increased energy absorption by (77, 74, 66 and 65) %, respectively, in the designs (WHSFSH-1%, WHSFSH-0% WHSFSH-3%, WHSFSH-2%) compared to the WNFSH design. Also, in all the mix designs, the minimum energy absorption of 360-400 joules at a displacement of 40 mm, which is suitable for permanent and temporary support in most ground conditions, is met.

Review History

Received: Apr 16, 2024

Revised: Jul 11, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Shotcrete
Absorbing energy
Steel fibers
Flexural toughness
High-strength
Accelerator

* Corresponding Author Email: hafshin@sut.ac.ir - ORCID: 0009-0001-6943-0688



بررسی امکان بهبود برخی از مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در دو روش تر و خشک

محمد حسین احمدیان خامنه^۱، حسن افشین^{۲*} ID، مهرداد امامی تبریزی^۳، یاسر علیلو^۴، غلامرضا قدسی شریف^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۴. مسئول کارگروه مهندسی عمران و معماری، سازمان علمی، پژوهشی و فناوری استان البرز، کرج، ایران.
۵. مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری

- دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸ استفاده از بتن پاششی به صورت فزاینده‌ای رو به رشد است. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تجهیزات و افزودنی‌ها، در صنعت ساخت‌وساز، نیاز به مقاومت بالا در بتن پاششی به طور قابل توجهی احساس می‌شود. به کارگیری بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، در پایدارسازی گودها و شیروانی‌ها، مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی و بتنی و سازه‌های زیرزمینی باعث بهبود کیفیت، چسبندگی و افزایش سرعت کار می‌شود. همچنین با افزایش مقاومت و به دنبال آن با کاهش ابعاد مقاطع، طرح‌ها اقتصادی‌تر می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از طرح اختلاط‌های متفاوت، آثار دانه‌بندی مصالح و مواد افزودنی از قبیل دوده سیلیس، فوق روان کننده، آنی‌گیر و الیاف فولادی بازیافتی میکرو روی مقاومت و عملکرد بتن پاششی به صورت آزمایشگاهی و میدانی به دو روش پاشش تر و خشک بررسی شدند.
- بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰ براساس نتایج دستیابی به بتن پاششی مقاومت بالا در روش پاشش تر، از امکان‌پذیری بالاتری برخوردار بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۹۷ مگاپاسکال در بتن پاششی الیافی تر به دست آمد و به ترتیب مقاومت فشاری و جذب انرژی ۸۰ و ۷۷ درصد نسبت به بتن پاششی الیافی معمولی‌تر افزایش یافت. همچنین بر اساس آزمایش‌های چقرمگی استفاده از الیاف فولادی بازیافتی میکرو، در جلوگیری از گسترش ریز ترک‌ها و کنترل تغییرشکل‌ها، نقش موثری داشته و در بتن پاششی مقاومت بالا موجب شد، به ترتیب مقاومت فشاری و جذب انرژی ۲۸ و ۹۷ درصد نسبت به همان طرح بدون استفاده از الیاف افزایش یابد.

کلمات کلیدی

بتن پاششی
جذب انرژی
الیاف فولادی
چقرمگی خمشی
مقاومت بالا
آنی‌گیر

۱- مقدمه

پشت شبکه مش بندی، موجب حذف مش بندی و گسترش استفاده از بتن پاششی الیافی شده است [2]. در ساخت‌وسازهای جدید برای افزایش فضای مفید، تمرکز روی بلندمرتبه‌سازی و استفاده از فضاهای زیرزمینی می‌باشد. پس نیاز به بتن پاششی مقاومت بالای

بتن پاششی تقویت شده با الیاف یک بتن حاوی الیاف ناپیوسته است که با کمک هوا و سرعت بالا روی سطح کار پخش و روی آن می‌چسبد [1]. زمان بر بودن، دشواری اجرا و عدم پر شدن کامل

* رایانامه نویسنده مسئول: hafshin@sut.ac.ir - ORCID: 0009-0001-6943-0688

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



الیافی در ساخت وسازها از اهمیت بسزایی برخوردار است. به کارگیری بتن پاششی مقاومت بالای الیافی موجب می شود با لایه های نازک تر، هزینه پایین تر و با سرعت بالاتر در حفاری تونل ها و گودها، ضمن جلوگیری از هوازدهی و کنترل کرنش های ذاتی توده های سنگ و خاک، بتوان از لایه های پاشیده شده به عنوان لایه باربر و نهایی استفاده کرد. از طرفی به کارگیری بتن فوق در مرمت و مقاوم سازی سازه های بنایی و بتن آرمه با توجه به چسبندگی و مقاومت بالاتر بسیار موثر خواهد بود. همچنین امروزه بتن پاششی برای ساخت سوله ها و خانه های سریع الاحداث به وفور مورد استفاده قرار می گیرد. در این سازه ها بتن پاششی به صورت المان پوسته ای اجرا و دارای عملکرد سازه ای است. بنابراین برای طراحی بهینه، سرعت اجرا و بهبود عملکرد لرزه ای این سازه ها استفاده از بتن پاششی مقاومت بالای الیافی ضروری است. آبی گیرها یکی از پرکاربردترین افزودنی های مورد استفاده در بتن پاششی می باشند و به کارگیری آنها موجب گیرش سریع بتن های پاششی و اجرای لایه های مقاوم و مستحکم بتنی در کوتاه مدت و کاهش پسرریز می شود [3]. آبی گیرها در دو نوع قلیایی و غیر قلیایی طبقه بندی [4, 5] و معمولاً همراه با هوای فشرده در هنگام اجرا روی سطح بتن با فشار پاشیده می شوند. با توجه به بهبود استحکام و خاصیت آب بندی و کاهش خطر واکنش قلیایی-سنگدانه و خطرات جانی کارگران ساختمانی در بتن پاشیده شده، بیشتر از آبی گیر غیرقلیایی استفاده می شود [6-8]. در بتن پاششی، دوده سیلیسی به عنوان یک پرکننده، برای بهبود چسبندگی و جلوگیری از جریان بتن پاششی عمل می کند. همچنین موجب بهبود ویژگی های رئولوژیکی مخلوط و کاهش پسرریز می شود. ولی از سوی دیگر فوق روان کننده موجب کاهش قوام مخلوط و افزایش پسرریز می شود [9, 10].

Külekçi با مقایسه نتایج بتن پاششی تقویت شده الیافی، در نمونه های میدانی اجرا شده در فضاها و زیرزمینی و نمونه های آزمایشگاهی، عملی بودن آزمایش های انجام شده در آزمایشگاه را با ارزیابی شرایط میدانی نشان داد [11]. Guler و همکاران با بررسی آثار الیاف فولادی ماکرو، فورتا و پلی آمید نشان دادند، برای افزایش مقاومت و چقرمگی بتن، الیاف فولادی موثرترین الیاف بوده است و پیشرفت سریع و کنترل نشده ترک ها را با ایجاد اثر پل زدن کاهش و با ایجاد اثر محصور کنندگی جانبی، تغییر شکل

عرضی را کاهش می دهد [12]. Yan و همکاران با بررسی تجربی خواص مکانیکی بتن پاششی سیلیسی تقویت شده با الیاف فولادی نشان دادند، نسبت به طرح پایه، مقاومت کششی، خمشی، برشی بتن پاششی بهبود یافته و به ترتیب ۷۷، ۷۳ و ۹۸ درصد افزایش یافت [13]. Cheolwoo Park به تعیین نسبت اختلاط بهینه بتن پاششی با عملکرد بالا با استفاده از خاکستر بادی پرداخت. براساس نتایج با استفاده از خاکستر بادی مقاومت فشاری در تمام سنین افزایش می یابد. همچنین علاوه بر بهبود استحکام طولانی مدت، استفاده از خاکستر بادی آثار قابل توجهی در ساخت پذیری، کیفیت، کاهش آسیب پذیری محیط زیست و هزینه های اجرایی دارد [14]. Shakhawat و همکاران با بررسی آثار انواع آبی گیرهای آلومیناتی، معدنی سیمانی و غیر قلیایی بر چقرمگی خمشی بتن پاششی تقویت شده الیافی نشان دادند، انواع آبی گیرها اثر مخرب روی عملکرد طولانی مدت دارند. ولی آبی گیر غیرقلیایی با توجه به عملکرد بهتر در طولانی مدت و حفظ سلامتی کارگران، مناسب تر است [15]. نتایج تحلیلی و میدانی تحقیق Hisatake نشان داد، بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در تونل های تحت فشار با استحکام اولیه بالا و شکل پذیری نهایی می تواند به عنوان یک پوشش اولیه مناسب برای تونل های حفر شده در زمین های سست و تونل های تحت فشار خاک های آماس کننده استفاده شود [16]. Armelin و همکاران با بررسی تاثیر الیاف فولادی بر مشخصات ظاهری و مکانیکی بتن پاششی تهیه شده با الیاف فولادی نشان دادند، عامل اصلی افزایش مقاومت فشاری به فرآیند پاشش مربوط بوده و الیاف نقش چندانی در این افزایش ندارد [17]. Gao Meng و همکاران به بررسی بتن پاششی سبک وزن با مقاومت بالا با هدف کاهش پسرریز پرداختند. بر اساس نتایج آنان، در حالت استفاده از ماسه خاکستر بادی، بتن با وزن مخصوص ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۲ مگاپاسکال و در حالت استفاده ترکیبی از ماسه خاکستر بادی و پلی استایرن، بتن با وزن مخصوص ۱۶۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۰ مگاپاسکال حاصل شد [18]. بر اساس مطالعات Lu و همکاران با کاهش اندازه مصالح، سرعت پاشش افزایش و به دنبال آن پخش روی بستر آسان تر می شود. علاوه بر این، افزایش ویسکوزیته گسترش را دشوار، اما در عین حال باعث افزایش چسبندگی و جلوگیری از لغزش می شود [10].

حفظ کارایی و چسبندگی، دو روش پاشش تر و خشک مورد بررسی قرار گرفت و برای بررسی نتایج، آزمون‌های مقاومت فشاری روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده و همچنین آزمون جذب انرژی روی پانل گرد به دو روش آزمایشگاهی و میدانی انجام شدند.

۲- توصیف مطالعات آزمایشگاهی

در این قسمت از مطالعه، مصالح به کارگرفته شده، طرح اختلاط‌های مربوطه و آزمایش‌های انجام یافته شرح داده شده است. برای مقایسه نتایج و بررسی تاثیر الیاف روی ویژگی‌های مکانیکی بتن پاششی، دو نوع بتن پاششی با رده مقاومتی معمولی و مقاومت بالا، در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده توسط الیاف به دو روش تر و خشک اجرا شد. همچنین برای بررسی تاثیر آبی‌گیر روی عملکرد فشاری و خمشی بتن هدف، با توجه به ملات‌های آزمایشی ساخته شده و آزمون زمان گیرش، آثار درصدهای مناسب آبی‌گیر مورد بررسی قرار گرفت. لزوم توجه به مباحث اقتصادی موجب شد، در روند این تحقیق، ماسه معادن موجود در محدوده شهر تبریز مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به استفاده از الیاف فولادی در روند این تحقیق، برای حفظ کارایی، کاهش پس ریز و استهلاک تجهیزات و تسریع اجرا، مصالح سنگی درشت دانه به کار گرفته نشد.

۲-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق با توجه به استفاده از حجم بالای بتن پاششی در پروژه‌های عمرانی، برای دستیابی به مقاومت‌های بالا از به کارگیری مواد گران قیمت همچون آبی‌گیرهای خاص، ماسه سیلیسی و سیمان‌های پرمقاومت پرهیز و مصالح استفاده شده به شرح زیر است.

۲-۱-۱- سیمان، فوق روان‌کننده، دوده سیلیسی، آب

سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند تیپ ۱ محصول کارخانه‌ی سیمان صوفیان بر اساس ASTM C150 [26]، فوق‌روان‌کننده مصرفی بر پایه پلی کربوکسیلات اتر (Carboxal HF5000) شرکت البرز شیمی آسیا با pH ۵-۷ و وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب بر اساس ASTM C1141 [27]، دوده سیلیسی تولیدی کارخانه صنایع فرو آلیاژ ازنا لرستان با سطح ویژه ۲۰ متر مربع

بر اساس مطالعات Bohac و همکاران استفاده از خاکستر بادی، متاکائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی موجب افزایش تنش تسلیم، بهبود چسبندگی و کاهش پس‌ریز بتن پاششی می‌شود [19]. Jawhar و همکاران به بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن، ضایعات پلاستیک و به صورت ترکیبی با درصد حجمی ۰/۳، ۰/۷ و ۱ درصد پرداختند. با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری، خمشی و کششی به ترتیب ۰/۳۵، ۱ و ۰/۷ درصد در بتن پاششی بهبود یافت [20]. در مطالعات Liao و همکاران، بارگذاری ضربه چرخه‌ای بر روی بتن پاششی تقویت‌شده با الیاف فولادی، بازالت، پلی‌پروپیلن و ذرات لاستیک انجام شد. براساس نتایج آنها، بطور کلی با افزایش تقویت‌کننده الیافی، خواص مکانیکی و دینامیکی بتن پاششی بهبود می‌یابد [21]. Bertrand به بررسی و مقایسه روش‌های پاشش تر و خشک، شرایط اجرایی و علل انتخاب هر یک از این روش‌ها پرداخت [22]. Morgan به بررسی دوام بتن‌های پاششی تر و خشک با استفاده از دوده سیلیس و الیاف فولادی پرداخت. بر اساس نتایج آن، بکارگیری این مصالح مقاومت فشاری بهبود یافت و تحت ذوب و یخبندان تغییرات چندانی در استحکام خمشی حاصل نشد [23]. Florain و همکاران به بررسی بتن‌های پاششی تر و خشک تحت سولفات‌ها پرداخت. بر اساس نتایج آنان، موادی همچون میکروسلیس موجب آثار مثبت در دو روش تر و خشک می‌شود [24]. در زمینه بتن پاششی بیشتر تحقیقات صورت گرفته برای بهبود مقاومت روی نوع آبی‌گیر تمرکز داشته است و بدین منظور بیشتر آبی‌گیرهای معدنی و یا دو جزئی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین برخی از پژوهشگران به بررسی بهبود استفاده سیمان‌های مقاومت بالا پرداخته‌اند. در این تحقیقات بیشترین مقاومت فشاری حاصله برابر ۶۶ مگاپاسکال بوده است و بیشتر بر روی روش پاشش تر تمرکز داشته‌اند [25]. بنابراین این تحقیق با هدف دستیابی به بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، با استفاده از مواد افزودنی رایج موجود در بازار، بدون بکارگیری مصالح و مواد گران قیمت همچون پودر و ماسه سیلیسی، آبی‌گیرهای خاص انجام شد. لازم به توضیح است، الیاف میکرو فولادی مورد استفاده در این تحقیق از نوع بازیافتی می‌باشد که نسبت به سایر الیاف فولادی میکرو موجود در بازار بسیار ارزان‌تر می‌باشد. بدین منظور با انجام اصلاحات در انتخاب مصالح و طرح اختلاط‌ها برای دستیابی همزمان به مقاومت بالا، با

ترتیب برابر ۱۹۲/۸، ۷۰/۲، ۵۵/۶۶، ۲۰، ۸/۵۰ دقیقه و با بکارگیری ۴ درصد وزنی سیمان آنی گیر پودری برابر ۳/۸۰ دقیقه است. بر این اساس بکارگیری درصدهای بالاتر آنی گیر، موجب تسریع گیرش اولیه و نهایی بتن می شود.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی دوده سیلیسی

Table 1. Chemical properties of micro silica

SiO_2	CaO	P	LOI	pH
90-95	0.5-1	0.04-0.06	1.5-2.5	8-9.5
S	Al_2O_3	MgO	K_2O	
0.04-0.08	0.6-1.2	0.6-1.2	0.4-0.8	
Fe_2O_3	Cl	C	Na_2O	
1.2-1.8	0.04-0.07	0.8-2	0.3-0.6	

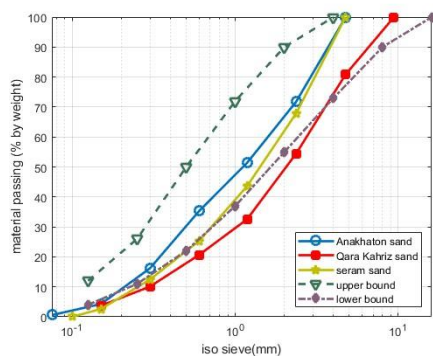
جدول ۲. مشخصات فیزیکی الیاف

Table 2. Physical properties of fibers

Micro recycled steel fibers	Length (mm)	Average aspect ratio	Tensile strength MPa
	10-30	95	2100

شکل ۱. الیاف فولادی بازیافتی میکرو

Fig. 1. Micro recycled steel fibers



شکل ۲. دانه بندی مصالح سنگی

Fig. 2. Grading of stone materials

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

Table 3. Physical properties of aggregates

Fineness modulus	Sand equivalent (%)	Specific weight			Absorbed water (%)	
		bulk (gr/cm^3)	apparent (gr/cm^3)	Saturated-surface dry (G_s) (gr/cm^3)		
3.48	94	2.66	2.73	2.68	1.04	Seram
3.21	91	2.57	2.62	2.59	0.81	Anakhaton
3.97	86	2.59	2.87	2.69	1.67	Qare kahriz

برگرم، وزن مخصوص ۲/۲ و ترکیب شیمیایی آن مطابق جدول (۱) دارای ۹۵-۹۰ درصد SiO_2 و آب مورد استفاده در طرح اختلاط های ریخته شده نیز آب شرب شهر تبریز می باشد.

۲-۱-۲ الیاف فولادی

در این تحقیق با هدف دستیابی به مقاومت فشاری و جذب انرژی بالا، بهبود خواص دینامیکی و ضربه ای بتن پاششی، از الیاف فولادی بازیافتی میکرو با مشخصات جدول (۲) استفاده شد. همچنین نمونه ای از الیاف به کارگرفته شده، در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱-۳ مصالح سنگی

در این تحقیق ابتدا ماسه معادن سرام و آناختون تبریز با حداکثر اندازه درشت دانه ۴/۷۵ میلی متر و ماسه قره کهریز خامنه با حداکثر اندازه درشت دانه ۹/۵ میلی متر از لحاظ دانه بندی، چگالی و ارزش ماسه ای و کاربرد آزمایشگاهی در بتن پاششی مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج مشخصات فیزیکی آن به شرح جدول (۳) است. همچنین دانه بندی این مصالح مطابق شکل (۲) است. براساس نتایج حاصل شده ماسه قره کهریز با مدول نرمی ۳/۹۷، وزن مخصوص اشباع با سطح خشک ۲/۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب و ارزش ماسه ای ۸۶ درصد برای ادامه تحقیق انتخاب شد.

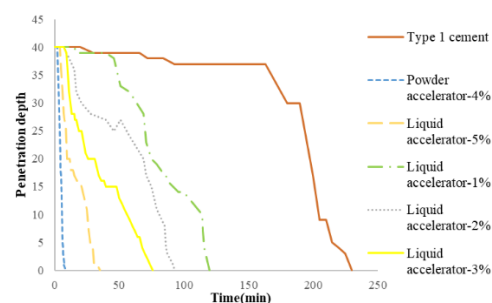
۲-۱-۴ آنی گیر

در این تحقیق با ساخت ملات و اندازه گیری زمان گیرش، انواع و درصدهای متفاوت آنی گیرکننده های بدون قلیایی موجود در بازار، بررسی شدند و در نهایت آنی گیر مایع و پودری شرکت البرز شیمی آسیا با توجه به آثار بهتر در بتن تازه و سخت شده، استفاده شد. در شکل (۳) نمودار گیرش سیمان مورد استفاده با درصدهای مختلف آنی گیر مورد استفاده نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمون سوزن و یکات، زمان گیرش اولیه خمیر سیمان با بکارگیری ۰، ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی سیمان آنی گیر مایع به

مختلفی صورت گرفته است. بر اساس تحقیقات Morat و همکاران، استفاده از آنی گیرها در دوزهای مصرفی بالا موجب محدودیت اثر فوق روان کننده می شود. بنابراین برای همزیستی این مواد افزودنی دوز مصرفی باید با حساسیت انتخاب شود. طبق بررسی صورت گرفته استفاده همزمان بیش از سه درصد موجب کاهش معنادار نتایج شد [28]. همچنین Burak به تسریع مقاومت اولیه نمونه های حاوی مواد افزودنی فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اتر در صورت بکارگیری نمک های نیترات و سدیم آلومینات اشاره کرد. آنها ترکیب ۱/۸ درصد پلی کربوکسیلات با ۱/۶ درصد نمک های نیتریک را موثرترین ترکیب برای تنظیم گیرش و استحکام اولیه بدون افت قوام معرفی کردند [29]. بنابراین پس از بررسی های صورت گرفته، در این تحقیق این مواد افزودنی به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۳- روش اجرا و تهیه نمونه های آزمایشی

طریقه ساخت بتن پاششی مقاومت بالای الیافی، مشابه روش معمول ساخت بتن الیافی است [30]. برای پخش مناسب الیاف فولادی بازیافتی میکرو در بتن پاششی، الیاف در طول اختلاط بتن به صورت تدریجی با استفاده از سرنده به مخلوط اضافه شد. با این تفاوت که در روش پاشش خشک، اختلاط مصالح به صورت خشک و معمولاً از آنی گیرهای پودری استفاده می شود و در نهایت آب و سایر افزودنی های مایع در سرنده اضافه می شود. ولی در روش پاشش تر فقط آنی گیر مایع به صورت پاششی در سرنده اضافه می شود. در این تحقیق برای بهتر مشخص شدن



شکل ۳. گیرش سیمان با درصد آنی گیر مورد استفاده

Fig. 3. Cement setting with the percentage of accelerator used

۲-۲- طرح مخلوط ها

در این تحقیق برای دستیابی به مقاومت بالا، طرح مخلوط های متعددی به صورت آزمایشگاهی و میدانی، به دو روش پاشش تر و خشک تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. بعد از بررسی نتایج اولیه، سه طرح در روش پاشش خشک و هفت طرح در روش پاشش تر، به عنوان طرح مخلوط های نهایی در انواع بتن پاششی معمولی، الیافی معمولی، مقاومت بالا و مقاومت بالای الیافی از میان طرح مخلوط های اجرا شده، مطابق جدول (۴) مورد بررسی قرار گرفتند. در برخی از این مخلوط ها مواد افزودنی فوق روان کننده و آنی گیر به صورت همزمان مورد استفاده قرار گرفتند. اگر چه این مواد افزودنی موجب آثار متضاد در خواص مکانیکی بتن پاششی می شوند ولی در بتن پاششی تازه، برای تنظیم گیرش و چسبندگی بهتر از آنی گیر و با توجه به درصد بالای دوده سیلیس بکارگرفته شده در این طرح ها، برای بهبود قوام و مشخصات مکانیکی بتن پاششی سخت شده، استفاده از فوق روان کننده ها ضروری است. برای استفاده همزمان آنی گیرها و فوق روان کننده ها تحقیقات

جدول ۴. طرح مخلوط های بتن پاششی مورد بررسی

Table 4. Mix details for examined shotcrete sets.

accelerator*	Fiber	super plasticizer	water	Micro silica	Cement	sand	Mixing plan	Spray type	
ACC(%C)	F(%volume)	$\frac{SP}{C + SF}$ (%)	$\frac{W}{C + SF}$	$\frac{SF}{C}$ (%)	C(Kg)	$S(\frac{Kg}{m^3})$			
4	-	-	0.48	-	480	1536	DNSH	Dry	1
4	1	-	0.45	-	464	1486	DNFSH	Dry	2
4.4	1	1.55	0.27	11.62	598	1592	DHSFSH	Dry	3
5	-	-	0.48	-	480	1536	WNSH	Wet	4
5	1	-	0.45	-	464	1485	WNFSH	Wet	5
-	-	1	0.28	11.62	585	1557	WHSSH-0%	Wet	6
-	-	-	-	-	-	-	WHSFSH-0%	-	7
1	1	1.55	0.27	11.62	598	1591	WHSFSH-1%	Wet	8
2	-	-	-	-	-	-	WHSFSH-2%	-	9
3	-	-	-	-	-	-	WHSFSH-3%	-	10

*در طرح های ردیف ۱ الی ۳ آنی گیر پودری شرکت البرز شیمی و در ردیف های ۴ الی ۱۰ از آنی گیر مایع البرز شیمی استفاده شده است.

مغزه‌گیری به عمل آمد و سپس بعد از کلاhek گذاری مغزه‌ها مقاومت فشاری تعیین شد. لازم به توضیح است که ضرایب اصلاحی مربوط به ابعاد نمونه‌ها در محاسبه نتایج اعمال شده است.

۲-۵- آزمایش چقرمگی خمشی

این آزمون برای محاسبه انرژی جذب شده براساس استاندارد ASTM C1550-08 [32] انجام گرفت که بیانگر توانایی بتن تقویت شده الیافی برای توزیع مجدد تنش در محدوده بعد ترک است. در این آزمون نمونه‌ها تحت ترکیب تنش‌های غشایی و پیچشی قرار دارند که معرف رفتار واقعی بتن پاشیده شده است. همچنین در این آزمون وجود سه تکیه‌گاه در زیر نمونه، موجب توزیع مشخص بار و عدم تاثیر اعوجاج سطحی بر بیشترین بار شکست می‌شود (شکل ۵).

۳- نتایج آزمون‌های میدانی و آزمایشگاهی

۳-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

با توجه به جدول (۵)، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح WHSFH-0% با مقاومت فشاری ۲۸ روزه، ۹۷ مگاپاسکال می‌باشد. دستیابی به مقاومت فشاری فوق با افزایش عیار سیمان به ۵۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب، استفاده از ماسه معدن قره‌کهریز با دانه‌بندی و مشخصات مکانیکی مناسب و استفاده از ۱۱/۶۳ درصد وزنی سیمان، دوده سیلیس و ۱/۵۵ درصد وزنی مواد سیمانی فوق روان‌کننده حاصل شد.



شکل ۴. نمونه‌ای از روش تهیه نمونه آزمایشی

Fig. 4. An example of the method of preparing a sample



شکل ۵. روش تهیه و آزمون نمونه‌های خمشی

Fig. 5. Method of making and testing flexural samples

آثار مخرب، آنی‌گیر در لحظات نهایی اختلاط بتن به میکسر اضافه شد. همچنین برای تهیه نمونه‌های میدانی از بتن پاششی مورد نظر، روز قبل اجرا در محیط آزمایشگاهی، مصالح توزین، به صورت خشک ترکیب و در نهایت در کیسه‌های ضدآب برای اجرای پاشش به محل اجرا منتقل شدند (شکل ۴). در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های مقاومت فشاری و آزمون چقرمگی خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C 1140 [31] و ASTM C1550 [32] قالب‌های مربوطه آماده‌سازی و طبق استانداردهای ASTM C171 [33] و ASTM C511 [34] شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها مهیا شد.

۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های اجرا شده، طبق استاندارد ASTM C42 [35] از پانل‌های تهیه شده

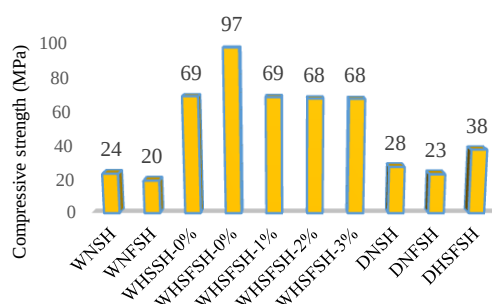
جدول ۵. نتایج آزمون مقاومت فشاری

Table 5. Compressive strength test results.

Percentile Increase (%)	Compressive Strength (28day) (Mpa)	Percentile Increase (%)	Compressive Strength (7days) (Mpa)	Specific weight (kg/m3)	Mixing plan
-	27.76	-	-	2269	DNSH
-19	23.39	-	-	2330	DNFSH
+27	38.04	-	-	2530	DHSFSH
-	23.73	-	19.87	2250	WNSH
-21	19.54	-23	16.18	2262	WNFSH
+66	69.16	+68	61.22	2410	WHSSH-0%
+75	96.80	+75	80.48	2534	WHSFSH-0%
+65	68.67	+69	65.17	2540	WHSFSH-1%
+65	67.80	+70	66.49	2552	WHSFSH-2%
+65	67.58	+62	65.62	2546	WHSFSH-3%

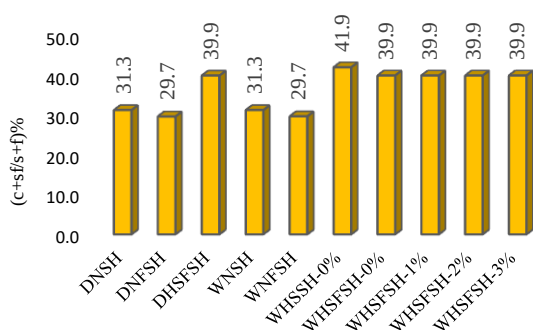
(3%, ۴۴ درصد مقاومت فشاری کمتری حاصل شد.

بر اساس شکل (۸) مقایسه مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن پاششی نشان می‌دهد، نرخ رشد مقاومت فشاری از سن ۷ تا ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری دمای بالا، متوسط برابر ۸ درصد می‌باشد که نسبت به شرایط عمل آوری معمولی با نرخ رشد متوسط ۱۵ درصد، ۷ درصد کاهش داشته است. همچنین نرخ رشد مقاومت در طرح مخلوط‌های نهایی با شرایط عمل آوری یکسان نشان داد، استفاده از آنی‌گیر به طور متوسط، ۸۰ درصد موجب کاهش نرخ رشد مقاومت از سن ۷ تا ۲۸ روزه شده است.



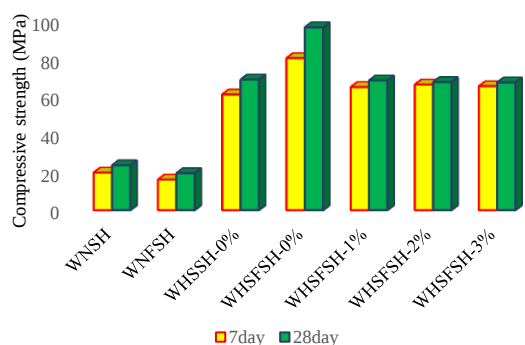
شکل ۶. مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط‌های بتن پاششی

Fig. 6. 28-day compressive strength of sprayed concrete



شکل ۷. نسبت مواد چسباننده به ماسه و الیاف در طرح اختلاط‌ها

Fig. 7. The ratio of binders to sand and fibers in the mix plan



شکل ۸. نرخ افزایش مقاومت فشاری از سن ۷ تا ۲۸ روزه

Fig. 8. Rate of increase in compressive strength from 7 to 28 days

بر اساس مشاهدات صورت گرفته در حین پاشش، این طرح دارای خاصیت پمپ پذیری مناسبی بوده و در طول این فرآیند، پس‌ریز کمتری داشته است. از طرفی مقایسه طرح اختلاط‌های WHSSH-0% و WHSFSSH-0% با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت نشان می‌دهد، استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو روی مقاومت فشاری بتن پاششی مقاومت بالای تر، تاثیر مثبت داشته و موجب افزایش ۲۸ درصدی مقاومت فشاری می‌شود. همچنین بر اساس نتایج شکل (۶)، با توجه به چسبندگی قابل قبول بتن پاششی مقاومت بالای الیافی در حالت بدون استفاده از آنی‌گیر، فقط برای دستیابی به گیرش و کسب مقاومت کوتاه مدت و امکان اجرای پاشش در زوایای مختلف بدون پس‌ریز زیاد و اجرای لایه‌های ضخیم‌تر با توجه به آزمون‌های زمان گیرش و ساخت ملات، درصدهای پایین آنی‌گیر در این بتن پاششی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از آنی‌گیر غیرقلیایی روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن پاششی مقاومت بالای الیافی تر تاثیر نامطلوبی داشته و به ترتیب با افزودن ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی سیمان آنی‌گیر، مقاومت فشاری به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد کاهش یافت.

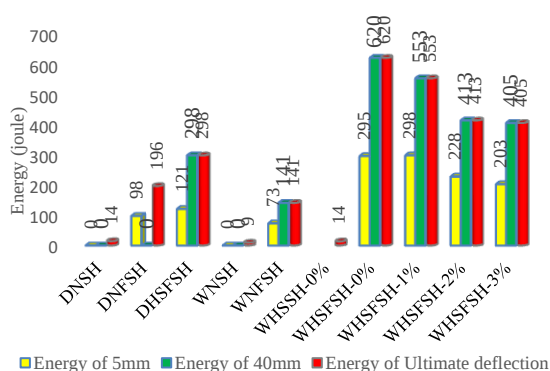
با توجه به شکل (۷) در بتن پاششی معمولی خشک و معمولی تر، نسبت $\left(\frac{c+s}{f+f}\right)$ که به عنوان شاخصی از چسبندگی می‌توان از آن یاد کرد، پایین است. استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو موجب کاهش چسبندگی در این طرح‌ها می‌شود و بتن پاشیده شده دارای ساختار تو خالی تری بوده و به موجب آن به طور متوسط ۲۰ درصد مقاومت فشاری بتن پاششی معمولی الیافی کمتر از بتن پاششی معمولی می‌شود. از طرفی با توجه به تفاوت ۱۹ درصدی وزن مخصوص در بتن پاششی معمولی و تفاوت ۶۲ درصدی وزن مخصوص در بتن پاششی معمولی الیافی، در طرح اختلاط یکسان در دو روش پاشش تر و خشک و از طرفی فشار هوای بیشتر در بتن پاششی خشک (۱۰-۱۲ بار) نسبت به بتن پاششی تر با فشار هوای متوسط (۸ بار)، نشانگر تراکم بهتر در بتن پاششی معمولی و الیافی معمولی خشک می‌باشد و به دنبال آن به طور متوسط ۳۰ درصد مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود.

همچنین در طرح مقاومت بالای الیافی خشک، مقاومت فشاری ۲۷ درصد نسبت به بتن پاششی خشک معمولی افزایش داشته است. ولی در بتن پاششی مقاومت بالای خشک (DHSFSSH) با توجه به حجم بالای مصالح پودری، در حین پاشش آب کافی به تمامی مصالح نرسیده و واکنش هیدراتاسیون به صورت کامل انجام نمی‌پذیرد و نسبت به بتن پاششی مقاومت بالای تر (WHSFSSH)

جدول ۶. نتایج آزمون چقرمگی خمشی

Table 6. Flexural toughness test results

Type of shotcrete	Peak Load	Deflection at peak load (δ_{peak})	Ultimate deflection (δ_u)	Energy of 5mm	Increase	Energy of 40mm	Increase	Energy of Ultimate deflection
	KN	mm	mm	joule	(%)	joule	(%)	joule
DNSH	28	0.91	0.91	0	-100	0	-100	14
DNFSH	27	0.57	35.89	98	----	0	----	196
DHSFSH	34	0.89	42.09	121	19.26	298	100	298
WNSH	20	0.86	0.87	0	-100	0	-100	9
WNFSH	21	0.69	40	73	----	141	----	141
WHSSH-0%	37	0.8	0.8	0	-100	0	-100	14
WHSFSH-0%	80	2.12	52.85	295	75.23	620	77.31	620
WHSFSH-1%	72	1.11	49.28	298	75.42	553	74.53	553
WHSFSH-2%	60	2.27	47.63	228	67.85	413	65.92	413
WHSFSH-3%	58	3.91	46.20	203	63.89	405	65.23	405



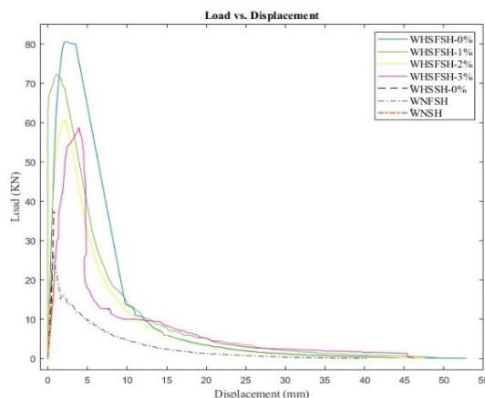
شکل ۹. جذب انرژی طرح‌های بتن پاششی

Fig. 9. Energy absorption of sprayed concrete mixtures



شکل ۱۰. پارگی الیاف تحت خمش در طرح WHSFSH-0%

Fig. 10. Rupture of fibers under bending in WHSFSH-0% plan



شکل ۱۱. نمودار نیرو-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت تر

Fig. 11. force- Displacement diagram of wet shotcrete mixes

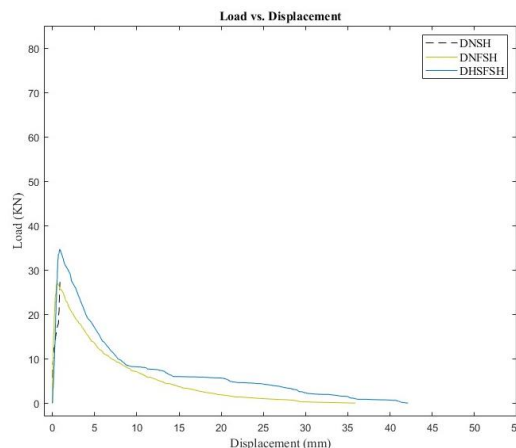
۲-۳- نتایج آزمایش چقرمگی خمشی

نتایج آزمایش چقرمگی خمشی در جدول (۶) و شکل (۹) ارائه شده است. در طرح مخلوط‌های بتن پاششی معمولی (بدون الیاف)، بعد از بار حداکثر، در نمونه‌ها رفتار شکننده مشاهده شد و بر این اساس در این طرح‌ها شکل پذیری و جذب انرژی پایینی حاصل شد. به کارگیری الیاف فولادی در بتن پاششی موجب شد، نمونه‌ها در محدوده بعد از بار حداکثر (محدوده پلاستیک) دارای رفتار شکل پذیر بوده و ظرفیت باربری بعد ایجاد ترک در نمونه‌ها با ایجاد پل توسط الیاف ادامه یابد. با توجه به جدول (۴) درصد حجمی الیاف فولادی باز یافتی مورد استفاده در تمامی طرح‌های بتن پاششی الیافی، یک درصد حجمی ثابت می‌باشد، پس تفاوت‌های ایجاد شده در جدول (۶) مربوط به بخش ماتریس بتنی می‌باشد. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود با بهبود مقاومت در طرح مخلوط‌های مربوط به بتن پاششی تر و خشک، علاوه بر افزایش قابل توجه بار حداکثر در آزمایش خمشی، طبق شکل (۱۰) در رفتگی الیاف در حین ترک کاهش یافته و بخشی از الیاف در حین تغییر شکل پاره می‌شوند و به موجب آن طبق شکل‌های (۱۱ و ۱۲) در محدوده تغییر مکان مرکزی ۲ تا ۱۰ میلی متر، شیب نمودار نیرو-تغییر مکان کاهش یافته است. از طرفی وجود الیاف در طرح اختلاط یکسان WHSSH-0% و WHSFSH-0% موجب افزایش ۵۳/۵۰ درصدی حداکثر بار قبل از ترک شده است.

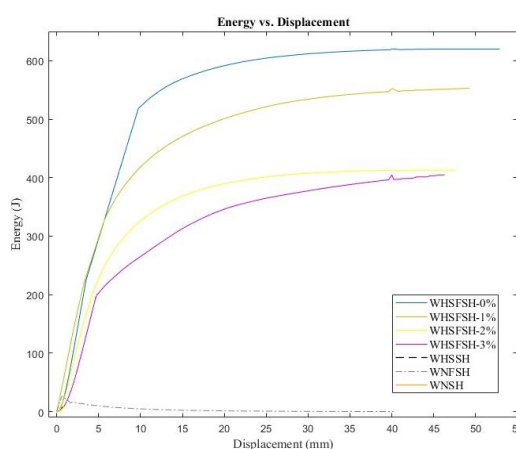
در شکل‌های (۱۳ و ۱۴)، قابلیت جذب انرژی طرح مخلوط‌های اجرا شده در دو روش پاشش تر و خشک تا تغییر مکان مرکزی حداکثر قابل تحمل آورده شده است. در بتن پاششی بر اثر عواملی همچون حرکت توده سنگ و خاک انتظار می‌رود،

گیری الیاف موجب عملکرد مرکب و افزایش ظرفیت باربری خمشی بتن پاششی می‌شود. مدول الاستیسیته بالای الیاف فولادی موجب عملکرد مناسب و مقرون به صرفه بتن پاششی در پوشش‌هایی با انتظار عرض ترک محدود می‌شود. عرض ترک عامل اصلی در عملکرد بعد از ترک بتن پاششی می‌باشد و جذب انرژی نمونه‌های پانل دایروی در تغییر مکان مرکزی ۵ و ۴۰ میلی‌متر به ترتیب معرف توانایی ادامه باربری بتن در عرض ترک ۱/۵ و ۷ تا ۱۳ میلی‌متر می‌باشد. بررسی نتایج جذب انرژی در تغییر مکان مرکزی ۵ میلی‌متری که معرف سطح سرویس دهی می‌باشد نشان داد، بتن پاششی غیر مسلح توانایی ادامه باربری بعد ترک را ندارد و با استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو در تمامی طرح‌های الیافی با توجه به جذب انرژی مورد نیاز (۶۰-۱۰۰ ژول)، سطح سرویس دهی برآورده می‌شود [36]. در طرح بتن پاششی مقاومت بالای الیافی (WHSFSH-0%) با افزایش ۷۵ درصدی جذب انرژی نسبت به بتن پاششی الیافی معمولی (WNFSH) در روش تر و افزایش ۱۹ درصدی در طرح (DHSFSH) نسبت به طرح (DNFSH) در روش پاشش خشک و از طرفی افزایش ۴۰ درصدی جذب انرژی در طرح (WHSFSH-0%) نسبت به طرح (DHSFSH)، بیانگر عملکرد بهتر بتن پاششی مقاومت بالای الیافی به ویژه بتن پاششی مقاومت بالای تر، در حداکثر بار قابل تحمل قبل ترک و ادامه ظرفیت باربری بعد ترک در سطح سرویس دهی می‌باشد.

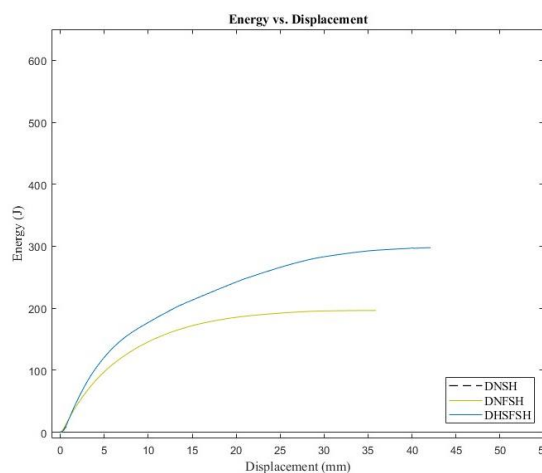
همچنین استفاده از آنی‌گیر در طرح‌های (WHSFSH-1%)، (WHSFSH-2%)، (WHSFSH-3%) موجب کاهش متوسط ۲۲ درصدی جذب انرژی نسبت به طرح (WHSFSH-0%) در سطح سرویس دهی می‌شود. با توجه به موارد کاربرد بتن پاششی مقاومت بالای الیافی و از طرفی استفاده از الیاف فولادی، بررسی شکل پذیری این نوع از بتن پاششی بیشتر در سطح بهره‌برداری (در جابه‌جایی مرکزی ۵ میلی‌متر) مقرون به صرفه و مورد توجه می‌باشد. نتایج جذب انرژی در سطح عملکرد نهایی (در تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلی‌متر) برای مقایسه جذب انرژی تحت تغییر شکل‌های بزرگ انجام می‌شود. همانند نتایج جذب انرژی در سطح سرویس دهی، استفاده از یک درصد حجمی الیاف فولادی بازیافتی میکرو موجب شد در طرح‌های (WHSFSH-1%)، (WHSFSH-0%)، (WHSFSH-2%)، (WHSFSH-3%) به ترتیب شاهد افزایش ۷۷،



شکل ۱۲. نمودار نیرو-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک
Fig. 12. Force- Displacement diagram of dry shotcrete mixes



شکل ۱۳. نمودار انرژی-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت تر
Fig. 13. Energy- Displacement diagram of wet shotcrete mixtures



شکل ۱۴. نمودار انرژی-تغییر مکان طرح اختلاط‌های شاتکریت خشک
Fig. 14. Energy-Displacement diagram of dry shotcrete mixtures

بتن پاشیده شده در هنگام ساخت و یا در هنگام بهره‌برداری دچار ترک شود ولی دچار گسیختگی نشود. بنابراین بررسی سطوح شکل پذیری و جذب انرژی در بتن پاششی مهم است. به کار

۷۴، ۶۶ و ۶۵) درصدی در جذب انرژی نسبت به طرح WNFISH باشیم. همچنین استفاده از آبی گیر در این طرح‌ها موجب کاهش متوسط ۲۶ درصدی جذب انرژی شد. از طرف دیگر در تمامی طرح اختلاط‌های فوق، حداقل جذب انرژی ۳۶۰-۴۰۰ ژول در جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متری که برای پشتیبانی دائمی و موقت در اکثر شرایط زمین مناسب است، برآورده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در نهایت در مقایسه کارهای انجام شده در این تحقیق با پژوهش‌های سایر محققین می‌توان گفت؛ همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ای که در تحقیقات دیگران دیده شد، برابر ۶۶ مگاپاسکال بوده‌است. در روند این تحقیق در روش پاشش تر با افزایش ۴۶ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۹۷ مگاپاسکال حاصل شد. بر اساس مطالعات صورت گرفته عملکرد بهتر الیاف فولادی در سایر تحقیقات مشاهده شد. ولی الیاف فولادی ماکرو موجب کاهش کارایی و پمپ پذیری بتن پاششی می‌شود. بنابراین در این پژوهش، الیاف فولادی بازیافتی میکرو استفاده و آثار این الیاف در مقاومت فشاری و چقرمگی خمشی بتن‌های پاششی تر و خشک در دو بتن رده مقاومتی معمولی و مقاومت بالا سنجیده شد. بدین منظور از تست خمش پانل دایره‌ای که نتایج دقیق‌تری نسبت به تست‌های خمش نمونه تیری و پانل مربعی دارد و به ندرت توسط سایر پژوهشگران بکارگرفته شده است، استفاده شد. بر اساس نتایج این آزمون، بهبود مقاومت فشاری موجب گشت با درصد حجمی ثابت الیاف فولادی، بتن پاششی مقاومت بالا در هر دو رده عملکردی سرویس دهی و نهایی عملکرد مناسبی داشته و نیاز به مسلح کننده‌های دیگری نباشد. علاوه بر این در اکثر تحقیقات صورت گرفته مقایسه آنی‌گیرهای متفاوت صورت گرفته و مشترکاً آنی‌گیرهای غیرقلیایی را مناسب دانسته‌اند. در این تحقیق بررسی درصدهای مختلف آنی‌گیر غیرقلیایی روی مشخصات مکانیکی بتن پاششی مقاومت بالا انجام شد.

و در نهایت به صورت خلاصه با توجه به نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی انجام گرفته، می‌توان به موارد زیر تحت عنوان نتایج اصلی این تحقیق اشاره کرد.

- با توجه به مشاهدات صورت گرفته در حین پاشش، طرح مخلوط نهایی WHSFSH_0% دارای کارایی، روانی و قابلیت

پاشش قابل قبول است.

- در طرح مخلوط نهایی WHSFSH_0% با اصلاحات صورت گرفته، بیشترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه حاصل و به ترتیب برابر با ۸۰/۴۸ و ۹۶/۸۰ مگاپاسکال است که نسبت به طرح WNFISH (بتن پاششی الیافی معمولی)، مقاومت فشاری و جذب انرژی به ترتیب ۷۹ و ۷۰ درصد افزایش یافت.
- دستیابی به مقاومت‌های بالا در روش پاشش تر از امکان پذیری بالاتری نسبت به روش خشک برخوردار است.
- با به کارگیری الیاف فولادی بازیافتی میکرو، در طرح نهایی WHSFSH_0% (بتن پاششی مقاومت بالای الیافی) نسبت به طرح WHSSH_0% (بتن پاششی مقاومت بالا) در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، مقاومت فشاری و جذب انرژی به ترتیب ۲۸ و ۹۷ درصد افزایش یافت.
- با توجه به درصد حجمی ثابت الیاف فولادی (۱درصد)، در تمامی طرح اختلاط‌های بتن پاششی الیافی تر، تفاوت در جذب انرژی این طرح‌ها مربوط به ماتریس بتنی می‌باشد و در روند این تحقیق با افزایش ۸۰ درصدی مقاومت فشاری، جذب انرژی ۷۷ درصد افزایش یافت.
- براساس نتایج، آنی‌گیرها در حدود ۲۵ درصد موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این مقاله کمال قدردانی واحترام را از تمامی حامیان این تحقیق بخصوص آقای مهندس میثم مولایی کارشناس محترم آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز و آقای مهندس مهدی فتحی مدیر عامل شرکت طرح و ساخت یادمان بنا را، دارند.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان با هم برابر است (۲۰٪ برای هر نویسنده).

منابع مالی

از منابع مالی نویسندگان و به صورت مساوی استفاده شده است.

References

- [1] ACI 506R-90, A., *Guide to shotcrete* in Reported by ACI committee 506.
- [2] Wang, X., Islam, M.M. and Zhang, Q., 2024. Influence of materials and nozzle geometry on spray and placement behavior of wet-mix shotcrete. *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e02852.
- [3] Leung, C.K., Lai, R. and Lee, A.Y., 2005. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. *Cement and concrete research*, 35(4), pp.788-795.
- [4] Prudencio Jr, L.R., 1998. Accelerating admixtures for shotcrete. *Cement and concrete composites*, 20(2-3), pp.213-219.
- [5] Pan, Z., Wang, X. and Liu, W., 2014. Properties and acceleration mechanism of cement mortar added with low alkaline liquid state setting accelerator. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29(6), pp.1196-1200.
- [6] Paglia, C., Wombacher, F. and Böhni, H., 2001. The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior. *Cement and concrete research*, 31(6), pp.913-918.
- [7] Salvador, R.P., Cavalaro, S.H., Segura, I., Figueiredo, A.D. and Pérez, J., 2016. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 111, pp.386-398.
- [8] Won, J.P., Hwang, U.J. and Lee, S.J., 2015. Enhanced long-term strength and durability of shotcrete with high-strength C12A7 mineral-based accelerator. *Cement and Concrete Research*, 76, pp.121-129.
- [9] Zhang, F., Cai, Y.B., Ding, J.T., Ning, F., Yang, S. and Wang, Z.L., 2017. Performance and action mechanism of new alkali-free liquid accelerators. *Water Resources and Power*, 35(5), pp.140-144.
- [10] Pan, G., Li, P., Chen, L. and Liu, G., 2019. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. *Construction and Building Materials*, 224, pp.1069-1080.
- [11] Liu, G., Cheng, W., Chen, L., Pan, G. and Liu, Z., 2020. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. *Construction and Building Materials*, 243, p.118180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180>.
- [12] Küllekcı, G., 2021. Comparison of field and laboratory result of fiber reinforced shotcrete application. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2), pp.463-473.
- [13] Guler, S., Öker, B. and Akbulut, Z.F., 2021, June. Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete. In *Structures* (Vol. 31, pp. 781-791). Elsevier Elsevier.
- [14] Yan, X., Liu, L.M., Zhang, J.P., Li, Y.H. and Wang, H., 2018. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Siliceous Wet Shotcrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), p.1637261.
- [15] Park, C.W., Lee, H.G. and Kang, T.S., 2010. Evaluation of durability characteristics of high performance shotcrete using fly ash. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(3), pp.305-311.
- [16] Hossain, M.S., Han, S., Kim, S.K. and Yun, K.K., 2021. Long-term effect of accelerator content on flexural toughness of steel fiber reinforced shotcrete for tunnel construction. *Case Studies in Construction Materials*, 15, p.e00706.
- [17] Hisatake, M., 2003. Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 18(2-3), pp.197-204.
- [18] Armelin, H.S. and Helene, P., 1995. Physical and mechanical properties of steel-fiber reinforced dry-mix shotcrete. *Materials Journal*, 92(3), pp.258-267.
- [19] Meng, C. and Jin-yang, Z., 2013, June. Studies on lightweight high-strength shotcrete. In *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation* (pp. 1231-1234). IEEE.
- [20] Jawhar, A.A., Al-Hadithi, A.I. and Mansoor, Y.A., 2024, February. An experimental investigation of mechanical properties of wet-mixed shotcrete reinforced with different types of plastic fiber. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3009, No. 1). AIP Publishing.
- [21] Liao, H., Fang, Y., Yao, Z., Yu, T., Luo, H., Zhu, N., Wang, Y. and Li, M., 2023. Effects of fiber and rubber materials on the dynamic mechanical behaviors and damage evolution of shotcrete under cyclic impact load. *Journal of Building Engineering*, 73, p.106763.
- [22] Bertrand, J., 2006. Shotcrete Supply: Dry or Wet? A Shotcrete Supplier's Perspective. *Shotcrete, Spring*.
- [23] Morgan, D.R., Kirkness, A.J., McAskill, N. and Duke, N., 1988. Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibres. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 10(2), pp.96-102.
- [24] Steindl, F.R., Galan, I., Baldermann, A., Sakoparnig, M., Briendl, L., Juhart, J., Thumann, M., Dietzel, M., Röck, R., Kusterle, W. and Mittermayr, F., 2020. Sulfate durability and leaching behaviour of dry-and wet-mix shotcrete mixes. *Cement and concrete research*, 137, p.106180.
- [25] Dressler, I., Freund, N. and Lowke, D., 2020. The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing. *Materials*, 13(2), p.374.
- [26] Bohac, M., Kubatova, D., Kotlanova, M.K.,

- Khongova, I., Zezulova, A. and Stanek, T., 2021. The role of SCM's on rheology of sprayed mortar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1039, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1039/1/012001>.
- [27] ASTM, C., 2007. 150 Standard Specification for Portland Cement, ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, United States. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-19A.
- [28] Timur, M. and Topçu, İ.L.K.E.R., 2023. Analysis of the Combined Usage of Plasticizer and Accelerator Effects on Microstructure for Mortar.
- [29] Felekoğlu, B., Tosun, K. and Baradan, B., 2011. Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(3), pp.1466-1473.
- [30] ASTM C 1141/C1141M-15, Standard Specification for Admixtures for Shotcrete.
- [31] ASTM C1140-11, Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels.
- [32] ASTM International, 2012. Standard C-1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). ASTM, West Conshohocken.
- [33] ASTM C 171 Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete.
- [34] ASTM C 511 Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.
- [35] ASTM C 42 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.
- [36] Papworth, F., 2002. Design guidelines for the use of fiber-reinforced shotcrete in ground support. *Shotcrete Magazine*, 1, pp.16-21.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Khameneh, M.A., Afshin, H., Emami Tabrizi, M., Alilou, Y. and Qudsi Sharif, G., 2025. Investigating the possibility of improving some of the mechanical Properties of fiber-reinforced high-strength shotcrete in two wet and dry methods. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.33-45.

DOI: 10.22034/25.3.4

