نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
TUNNELING & UNDERGROUND SPACE ENGINEERING (TUSE)
http://tuse.shahroodut.ac.ir/
دوره‌ی ۱- شماره‌ی ۱/زمستان ۱۳۹۱

طراحی بهینه‌ی پوشش تونل با بتن الیافی پلیمری بر مبنای ظرفیت جذب انرژی

محمد صافی*
استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی آب و محیط زیست؛ دانشگاه صنعت آب و برق

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی
پوشش تونل
جذب انرژی
الیاف پلیمری
آزمایش پانل
طرح اختلاط

چکیده
پتانسیل بالای جذب انرژی بتن‌های الیافی، این نوع مصالح را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای انواع کاربری‌ها مطرح نموده است. این کاربرد به ویژه در محیط‌های تحت تغییر شکل و جابجایی‌های قابل توجه مانند انواع سازه‌های زیرزمینی اهمیت بیش‌تری دارد. با تامین ظرفیت جذب انرژی بالاتر، انعطاف‌پذیری سازه‌ی نگهدارنده افزایش و ضخامت و میزان مصالح مورد نیاز برای پوشش کاهش می‌یابد و سازه‌ی اقتصادی‌تری بدست می‌آید. برای افزایش ظرفیت جذب انرژی در ترکیبات مسلح به الیاف، در حالت عادی به محتوای الیاف بیش‌تری نیاز است. این امر، استفاده از این مصالح را با محدودیت‌های اقتصادی مواجه نموده است. این مقاله به معرفی یک پوشش بتنی مسلح به الیاف پلیمری بهینه می‌پردازد که حداقل محتوای الیاف ممکن و حداکثر ظرفیت جذب انرژی را دارد. نتایج این پژوهش حاصل مجموعه‌ای نسبتاً جامع از آزمایش‌ها با انواع مختلف افزودنی‌ها و محتوای الیاف است و پیشنهاداتی را برای دستیابی به یک طراحی بهینه بر مبنای نتایج تجربی ارایه داده است. بدین منظور از آزمایش‌های استاندارد تیر و پانل برای تعیین ظرفیت جذب انرژی و سایر خصوصیات مورد نیاز طراحی استفاده شده است. در نهایت با استفاده از نتایج طرح‌های اختلاط بهینه، نمودار پیشنهادی طراحی پوشش‌های تونل بر مبنای ظرفیت جذب انرژی ارایه شده است.

۱- مقدمه

استفاده از ترکیبات بتنی مسلح به الیاف امروزه در انواع مختلف سازه‌ها گسترش یافته است. کارایی و دوام بسیار بالای این نوع از مصالح، آن‌ها را به یک گزینه‌ی موثر برای بسیاری از طراحی‌ها تبدیل کرده است. الیاف در دو نوع کوتاه یا میکرو و بلند یا ماکرو به ترتیب برای دو کاربرد دوام و عملکرد سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع دوم که در این مقاله مد نظر است، از نقطه‌نظر سازه‌ای، سبب ارتقای ویژگی‌های شکست و بهبود رفتار سازه می‌شود. این ساز و کار هم بر روی توانایی خدمت‌رسانی و هم حالات حد نهایی تاثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. تاثیرات این فناوری بر روی رفتار در مقابل بار بدین گونه است که انتشار ترک‌ها را مهار نموده و عرض آن‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین موجب افزایش سختی برشی آن می‌شود. تاثیر آن بر روی رفتار در حالت حدی نهایی نیز به صورت افزایش مقاومت در برابر برش و کشش و افزایش انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری سازه است.

علاوه بر موارد فوق، بکارگیری الیاف در بتن، ظرفیت جذب انرژی آن را بالاتر می‌برد. افزودن الیاف در ترکیبات رایج بتن، مقاومت فشاری، کششی، برشی و پیچشی آن را با درجات مختلف بسته به نوع الیاف و مشخصات سازه افزایش می‌دهد. در سازه‌های دارای قیود اضافی، همچون دال‌های روی خاک و پوشش تونل‌ها، افزایش ظرفیت جذب انرژی مصالح که با مسلح‌سازی آن‌ها به الیاف فراهم می‌شود، به طور محسوس‌تری رفتار ترک‌خوردگی را ارتقا می‌بخشد و ظرفیت تحمل بار سازه را افزایش می‌دهد [1].

* تهران؛ بلوار وفادار؛ بلوار شهید عباسپور؛ دانشگاه صنعت آب و برق؛ دانشکده‌ی مهندسی آب و محیط زیست؛ مرکز مطالعات بحران‌های طبیعی؛ صندوق پستی: ۱۷۱۹-۱۶۷۶۵؛ شماره‌ی تلفن: ۷۷۰۰۶۶۶۲-۰۲۱؛ دورنگار: ۷۷۰۰۶۶۶۳-۰۲۱؛ رایانامه: msafi@pwut.ac.ir

برای بررسی ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی، شاخص‌هایی از قبیل استحکام، مقاومت خمشی معادل و انرژی شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در میان این موارد، انرژی شکست بیش‌ترین استفاده را برای توصیف رفتار ترک‌خوردگی کششی بتن داشته و بیش‌تر از سایر شاخص‌ها در بررسی تحلیلی و مدلسازی رفتار این سامانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است **[2]** و **[3]**. در مقایسه با سایر مواد و مصالح مرکب همچون پلیمرهای مسلح به الیاف، ترکیبات با پایه‌ی سیمان مسلح به الیاف دارای رفتار متفاوتی هستند **[4]**. تفاوت عمده‌ی این ترکیبات در نحوه‌ی کارکرد الیاف پس از بروز ریزترک‌ها و نیز بازتوزیع تنش‌های کششی در ترک‌ها، قابل مشاهده است.

این مقاله درباره‌ی شاخص‌های مختلف تاثیرگذار بر روی انعطاف‌پذیری بتن الیافی بحث نموده و نتایج بررسی‌های تجربی انجام شده برای یافتن حساس‌ترین شاخص‌های تاثیرگذار بر جذب انرژی و طرح اختلاط بهینه را با توجه به محدودیت‌های آزمایش ارایه می‌نماید. برای دسته‌بندی رده‌های انرژی مورد نیاز، از طبقه‌بندی‌های موجود برای انرژی لازم در پوشش تونل در شرایط مختلف سنگ‌ها به عنوان معیار سنجش استفاده شده است. علاوه بر این، طرح مخلوطی ارایه شده است که با دارا بودن مشخصات لازم تا حد امکان مقرون به صرفه نیز باشد. همچنین در خصوص تاثیر افزودنی‌های بتن‌های با کارایی بالا، بر روی انعطاف‌پذیری مصالح ترکیبی نیز بحث شده است.

۲- روش ارزیابی جذب انرژی

استاندارد اروپایی *EN-14487* شامل دو روش مختلف تعیین انعطاف‌پذیری بتن مسلح به الیاف تحت عنوان روش ارزیابی مقاومت پسماند و روش ارزیابی ظرفیت جذب انرژی است **[5]**. بر مبنای این استاندارد، این دو روش به طور دقیق قابل مقایسه نیستند. روش مقاومت پسماند می‌تواند هنگامی که ویژگی‌های بتن در مدل طراحی سازه‌ای استفاده می‌شود، مناسب باشد. از طرف دیگر مقدار جذب انرژی اندازه‌گیری شده برای یک پانل می‌تواند زمانی که، تکیه‌گاه پیوسته مانند زمین وجود دارد، مناسب باشد. در این حالت هدف تعبیه ظرفیت جذب انرژی است که باید در طی فرآیند تغییر شکل زمین توسط پوشش نگهدارنده جذب شود. این ویژگی بطور ویژه در پوشش‌های بتن پاشیده به بهترین شکل قابل ایجاد است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی رفتار سازه‌ای بتن الیافی در پوشش تونل، یک برنامه‌ی آزمایش مشترک در دانشگاه صنعت آب و برق تهران و دانشگاه تکنیک استانبول و با همکاری دانشگاه وست‌مینستر *(Westminster)* لندن و با پشتیبانی شرکت فناوری‌های ساختمان انگلستان انجام شده است. مطابق استاندارد اروپایی *EN-14488* **[5]**، در آزمایش جذب انرژی پانل، میزان انرژی جذب شده بر اساس سطح زیر منحنی بار-تغییر شکل تعیین می‌شود. پانل‌های مورد نیاز آزمایش در قالب‌هایی به ابعاد ۶۰۰×۶۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند.

برمبنای این آزمایش، برای تعیین میزان ظرفیت جذب انرژی مورد نیاز سامانه‌ی نگهداری تونل‌ها در زمین‌های مختلف، سه کلاس انرژی *E500*، *E700* و *E1000* به شرح زیر تعریف شده است **[5]**:

- کلاس جذب انرژی ۵۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های سالم
- کلاس جذب انرژی ۷۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های متوسط
- کلاس جذب انرژی ۱۰۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های سست

هنگامی که جنبه‌های مختلف کاربرد سازه‌ای مصالح الیافی در پوشش سازه‌های زیرزمینی مطرح است، در نظر گرفتن سه مساله بسیار حایز اهمیت است. یعنی پاسخ نرم‌شوندگی کشش، اثر ناحیه‌ی سخت‌شوندگی کرنش و ترکیب سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی در رفتار تنش-کرنش این مصالح با توجه به جابجایی زمین، تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد سازه‌ای پوشش می‌گذارد. پاسخ مکانیکی عمومی شامل یک ناحیه‌ی خطی و یک ناحیه‌ی غیر خطی است. در ناحیه‌ی خطی تغییرات میکروسازه‌ای دایمی بسیار جزیی و در ناحیه‌ی غیرخطی تغییرات میکروسازه‌ای دایمی با یک روند ثابت رخ می‌دهد. در این محدوده مقدار معینی تغییر شکل دایمی اتفاق می‌افتد. اگر تغییر میکروسازه‌ای به شکل ریزترک‌های با اندرکنش بدون اصطکاک در نظر گرفته شود، پاسخ مکانیکی متناظر با آن تنها نشان‌دهنده‌ی سختی

کاهش یافته است و به طور مجازی هیچ تغییر شکل دایمی را نشان نمی‌دهد **[6]**. در روش طراحی بر مبنای جذب انرژی با توجه به استفاده از سطح زیر نمودار رفتار نیرو-تغییر شکل، تمامی این پدیده‌ها بطور مناسبی در نظر گرفته می‌شوند.

۳- بهینه‌سازی جذب انرژی

فرآیند طی شده در این پژوهش برای بهینه‌سازی ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی شامل آزمایش‌ها، بررسی ساز و کار شکست نمونه‌ها و تحلیل حساسیت انجام شده در این ادامه‌ی مقاله تشریح شده است.

۳-۱- بررسی آزمایشگاهی

برای بدست آوردن ویژگی‌های طرح اختلاط مناسب با بالاترین میزان جذب انرژی یک مطالعه‌ی تجربی متشکل از ۳۳ تیر و پانل مستطیل‌شکل انجام شده است. تنظیمات آزمایش و اطلاعات کلی در **شکل ۱** نشان داده شده است. در این بخش ابتدا نسبت‌های ترکیبی کلی معرفی و سپس نتایج به طور خلاصه ارایه و تشریح شده است.

برای الیاف، از نمونه‌ی مصنوعی پلیمری نوع پلی‌اولفین *(Polyolephin)* سیاه‌رنگ با طول ۴۸ میلی‌متر استفاده شده است. برای عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی بتن سیمان پرتلند نوع *CEM-142.5* به کار رفته است. بر اساس طرح اختلاط، محتوای سیمان با عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده است. برای بهبود کیفیت بتن و تولید بتن با کارآیی بالا، نسل جدیدی از کاهنده‌ی شدید آب از نوع ماده‌ی پلی‌کربوکسیلات *HRWR (Polycarboxylate)*، *Adva Flow 501* استفاده شده است. میزان افزودنی *HRWR* از ٪۱٫۶ تا ٪۲٫۱، با توجه به وزن کلی محتوای سیمان متغیر است. همچنین از افزودنی تولیدکننده‌ی حباب هوا *ACR Sika* نیز استفاده شده است. با توجه به طرح اختلاط میزان افزودنی حباب‌زا، ۰٫۱ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است.

مطابق با طرح اختلاط میزان الیاف برای مسلح‌سازی، ۴، ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب است. الیاف باید هم زمان با افزودنی *HRWR* اضافه شوند تا فرآیند ترکیب، تسهیل و الیاف به طور همگن و مناسب پخش شوند. وزن مخصوص الیاف مورد استفاده ۰٫۹ کیلوگرم در متر مکعب است.

برای عمل‌آوری مخلوط بتن، از گروه‌های سنگ‌دانه‌ی متفاوتی استفاده شده است که عبارتند از:

- ماسه (۵-۰ میلی‌متر)
- سنگ آهک شکسته (۱۲-۵ میلی‌متر)
- سنگ آهک شکسته (۲۲-۱۲ میلی‌متر)

مطابق با طرح اختلاط میزان سنگ‌دانه در هر متر مکعب بتن عبارت است از:

- ۸۳۷ کیلوگرم ماسه (۵-۰ میلی‌متر)
- ۵۰۰ کیلوگرم درشت‌دانه (۱۲-۵ میلی‌متر)
- ۳۳۵ کیلوگرم درشت‌دانه (۲۲-۱۲ میلی‌متر)

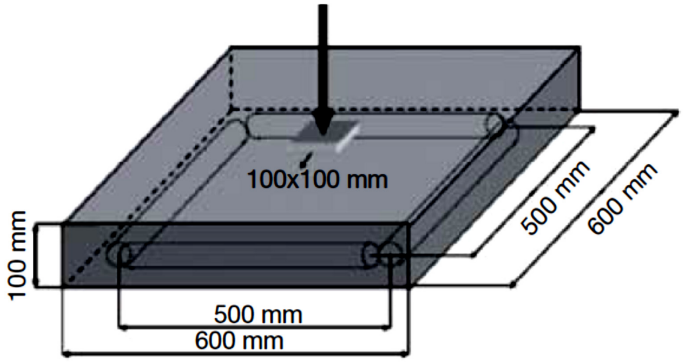
میزان آب ۱۶۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای تمامی مخلوط‌ها نسبت وزنی آب به سیمان (*w/c*)، مقداری ثابت ۰٫۳۵۶ است.

مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ی استوانه‌ای بر اساس آزمایش‌های انجام شده ۵۰ مگاپاسکال است. افزودن الیاف تاثیر اندکی حداکثر تا ۳ درصد بر مقاومت فشاری در مقایسه با بتن غیر مسلح داشته است. میانگین مقاومت کششی در روش دو نیم کردن نیز برای نمونه‌های الیافی معادل ۴٫۵ مگاپاسکال و حداقل ۳۵ درصد از مقاومت متناظر برای بتن غیر مسلح بالاتر است. اولین سری آزمایش‌ها با میزان الیاف مختلف در مقادیر ۴، ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب انجام شده است تا تاثیر میزان الیاف در ظرفیت جذب انرژی مشخص شود. نتایج بدست آمده از میزان انرژی جذب شده‌ی ویژه در **جدول ۱** به نمایش در آمده است. همان‌طور که در **جدول ۱** مشاهده می شود، انرژی جذب شده‌ی ویژه با افزایش محتوای الیاف افزایش می‌یابد. اما افزایش میزان جذب انرژی با افزایش محتوای الیاف رابطه‌ی خطی ندارد. کاهنده‌ی شدید آب پلی‌کربوکسیلات تاثیرگذاری الیاف را بالا برده و ظرفیت جذب انرژی را ارتقا بخشیده است. حداقل افزایش مشاهده شده در جذب انرژی به میزان ٪۵۰ است. توجه شود که این افزودنی موجب خودتراکمی بتن و افزایش اسلامپ به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ۲۰ درصد افزایش در میزان این افزودنی سبب افزایش بیش از ۵۵ درصد در جذب انرژی شده است.

۳-۲- ساز و کار شکست و جذب انرژی

شکل ۲، ساز و کار شکست نمونه‌ی پانل مستطیل‌شکل بتن

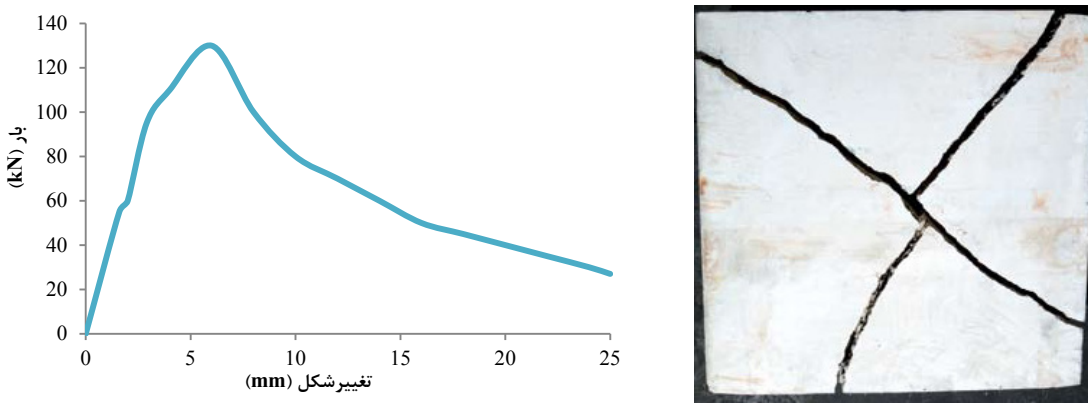
غیر مسلح، منحنی بار- تغییر شکل و تعریف انرژی جذب شده‌ی ویژه را نشان می دهد. این نتیجه را می‌توان با ساز و کار شکست پانل‌های مستطیل‌شکل بتن الیافی در **شکل ۳** مقایسه نمود. **شکل ۳**، شکست انعطاف‌پذیرتری را برای این پانل‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ساز و کارهای شکست از یک الگوی واحد با حداکثر تعداد ترک‌ها تبعیت می‌کند که موجب جذب انرژی بیش‌تر می‌شود. **شکل ۳** همچنین نشان‌دهنده‌ی توزیع یکنواخت الیاف در نمونه‌های مختلف است. ساختار میکروسکپی بتن و تغییر آن با مرور زمان و تحت بارگذاری، نقش مهمی در کنترل کارآیی یک بتن مسلح به الیاف ایفا می‌کند. برای بتن غیر مسلح، ساز و کارهای پیچیده‌ای وجود دارد که در فرآیند شکست درگیر هستند. در این میان ساز و کار اصلی مقاومتی، درگیری سنگ دانه‌ها است. این مطالعه نشان داده است که وجود حباب‌های هوا نیز می‌تواند سبب افزایش ضریب سختی بتن در بارگذاری خمشی شود.



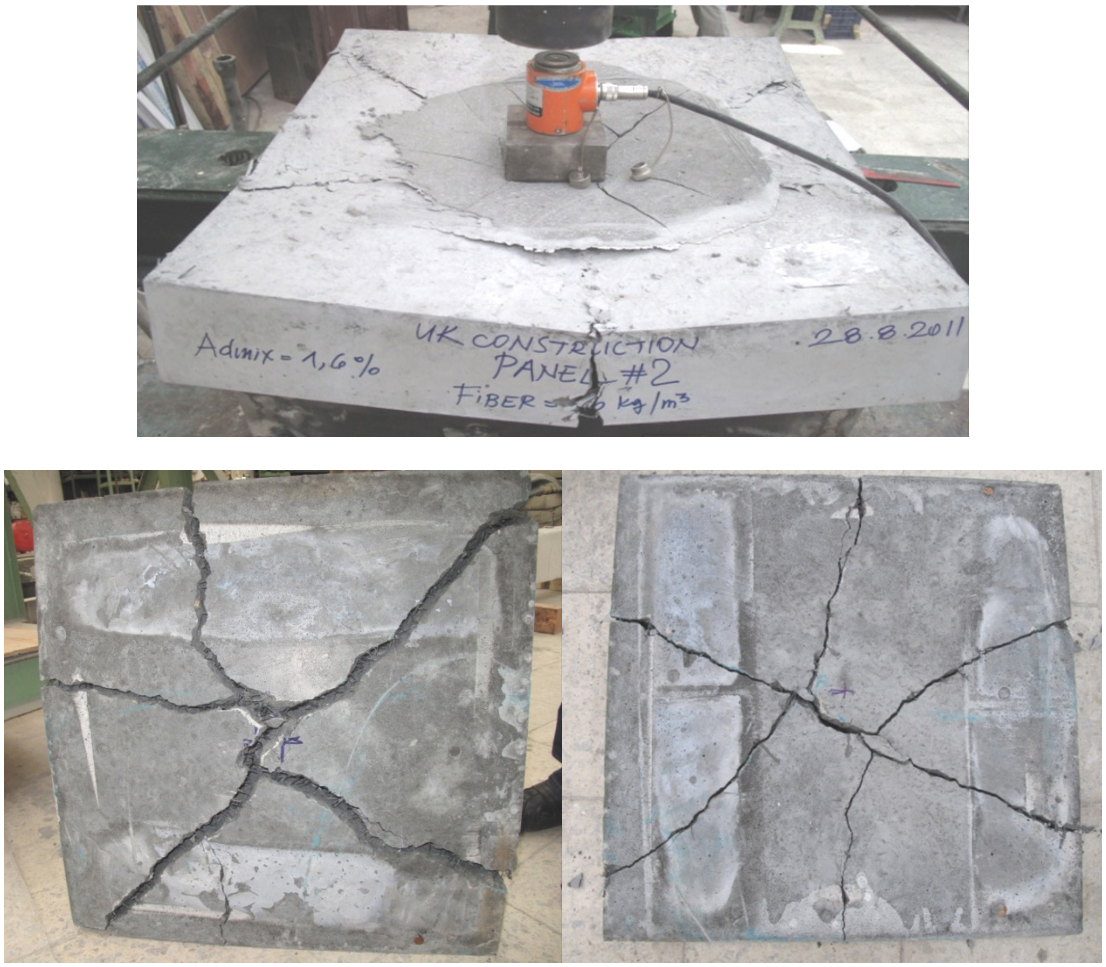
شکل ۱- مشخصات نمونه و روش بارگذاری در آزمایش پانل برای اندازه‌گیری ظرفیت جذب انرژی در تغییر شکل حداکثر ۲۵ میلی‌متر مطابق تعریف *EFNARC*

جدول ۱- تغییرات جذب انرژی براساس میزان الیاف و تغییر افزودنی‌ها در طرح اختلاط برای نمونه‌های سه‌تایی

نام نمونه	واحد	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
محتوای الیاف	Kg/m^3	۰	۴	۴	۶	۶	۸	۸
انرژی ویژه	$Joule/m^2$	۲۴۴	۶۴۰	۹۱۱	۱۴۷۸	۱۹۲۵	۲۷۹۰	۱۶۵۶
افزودنی	-	-	حباب‌زا	کاهنده‌ی آب	حباب‌زا	کاهنده‌ی آب	کاهنده‌ی آب	حباب‌زا



شکل ۲- ساز و کار شکست پانل بتن غیر مسلح و تعریف جذب انرژی بر اساس سطح زیر منحنی نیرو-تغییر شکل



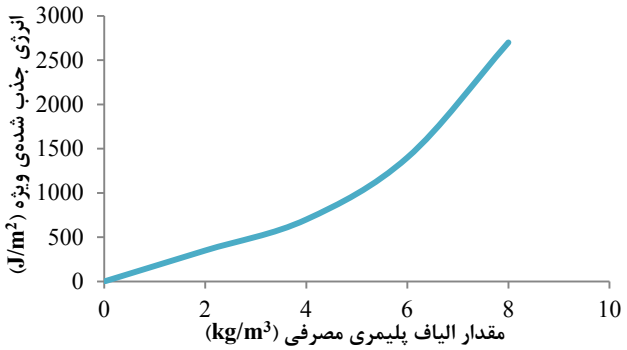
شکل ۳- ساز و کار بارگذاری و شکست نمونه‌های بتن الیافی در آزمایش پانل

بررسی در نمونه‌های شکسته نشان می‌دهد که افزودنی کاهنده‌ی آب *HRWR* به دلیل خاصیت پلاریزه کردن الیاف جهت‌گیری بهتری به آن‌ها خواهد داد. پیامد جهت‌گیری مناسب این است که تاثیر الیاف را افزایش و نیاز برای محتوای الیاف بیش‌تر را کاهش می‌دهد. به طور معمول الیاف به شکل تصادفی در مخلوط قرار می گیرند، اما این مسئله برای اعضای سازه‌ای شرایط بهینه‌ای نیست.

در اعضای سازه‌ای نظیر دال‌ها یا پوشش‌ها، باری که از درون عضو عبور می‌کند، یک جهت‌گیری ویژه دارد. بنابراین جهت‌گیری‌های تنش و کرنش کششی حداکثر از قبل تعیین می‌شود. در این حالت بهترین جهت‌گیری برای الیاف را می‌توان تعیین نمود. اگر بتوان بیش‌ترین الیاف را در این جهت‌ها قرار داد، موثرترین سامانه بدست خواهد آمد. افزودنی‌های معرفی شده در بخش بررسی آزمایشگاهی، می‌تواند در دستیابی به این هدف موثر واقع شود. افزودنی کاهنده‌ی آب الیاف را قطبی می‌کند. در نتیجه در مخلوط بتن، الیاف به موازات یکدیگر قرار می‌گیرند. این ویژگی سبب ایجاد مخلوط یکنواخت بتن شده و می‌تواند ظرفیت تحمل بار و ظرفیت جذب انرژی را افزایش دهد.

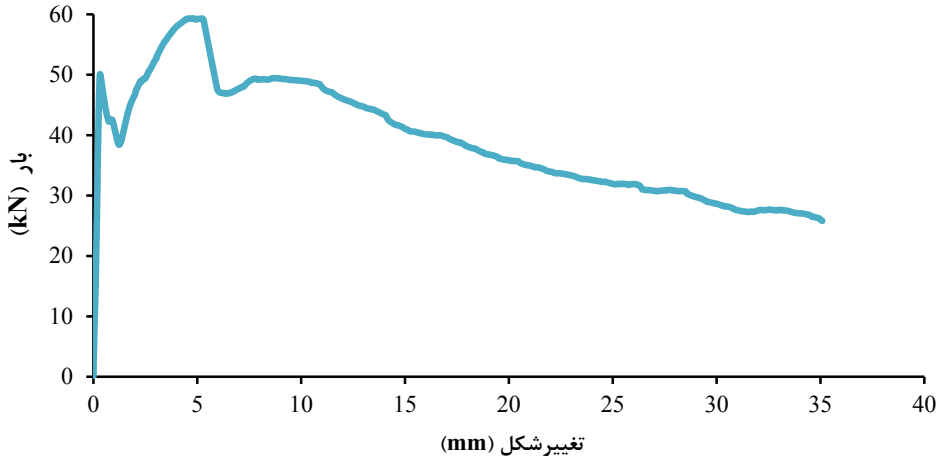
۳-۳- تحلیل حساسیت پارامتری

آزمایشات مورد نظر برای مقادیر مختلف الیاف انجام و حداکثر انرژی جذب شده‌ی ویژه نیز اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌های اولیه نشان داده است که مقدار کم انرژی جذب شده توسط پانل بتن غیر مسلح تقریباً قابل صرف نظر است. **شکل ۴**، تغییر انرژی جذب شده‌ی ویژه با محتوای الیاف را نشان می‌دهد.

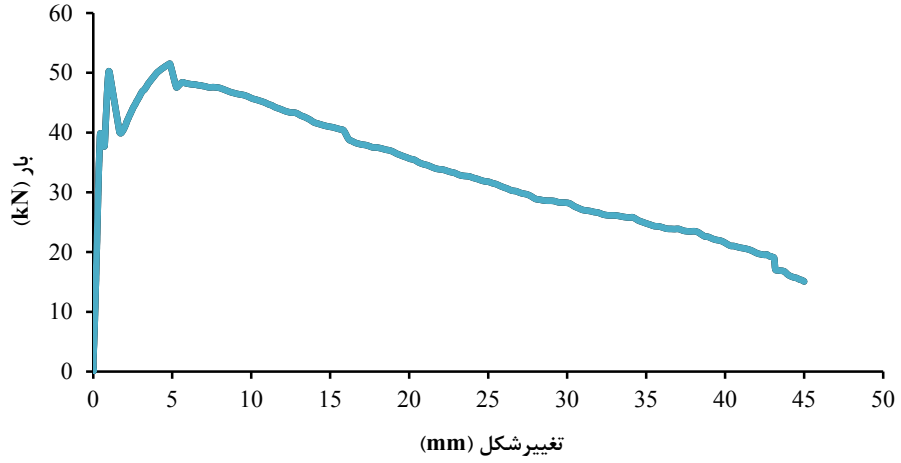


شکل ۴- تغییرات جذب انرژی بر اساس میزان الیاف مصرفی در آزمایش‌های پانل انجام شده

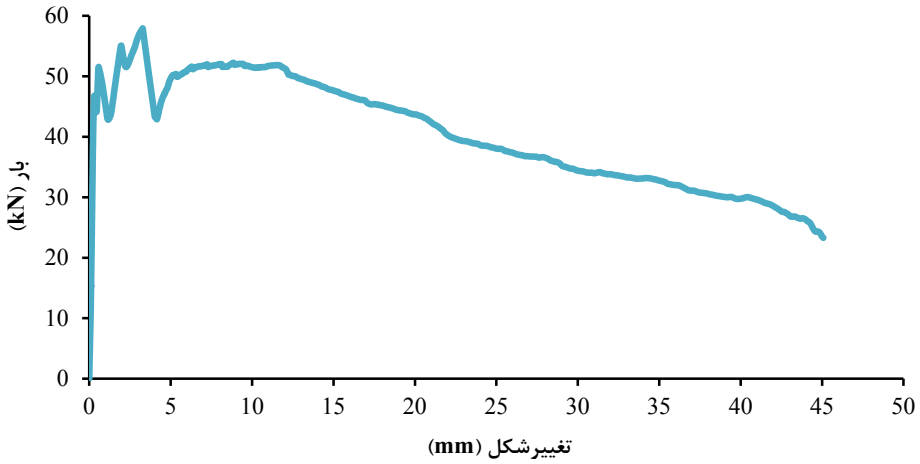
منحنی بار- تغییر شکل برای نمونه‌های بهینه شده در **شکل ۵** ارایه شده است. منحنی‌های انرژی- تغییر شکل مربوطه نیز در **شکل ۶** نمایش داده شده است. ظرفیت جذب انرژی مورد نیاز برای کاربرد در سازه‌های زیرزمینی و تونل را می‌توان با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار در جابجایی ۲۵ میلی‌متری نقطه‌ی میانی پانل‌ها استخراج نمود.



الف- میانگین سری نمونه‌های D

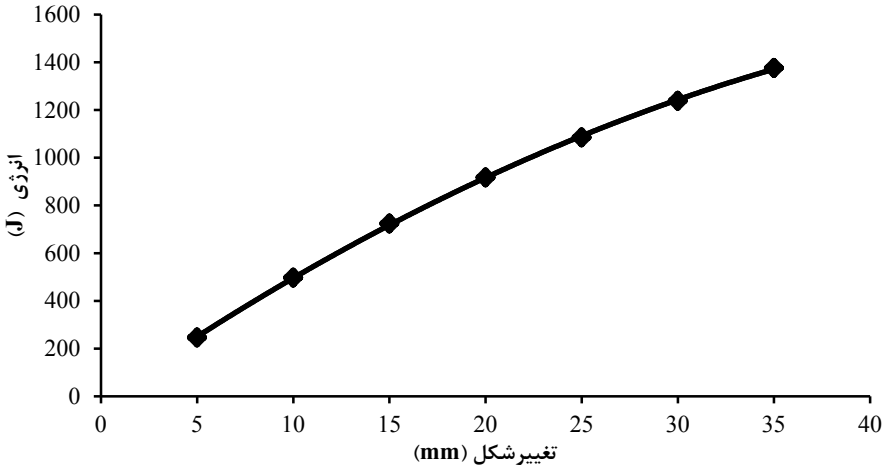


ب- میانگین سری نمونه‌های E

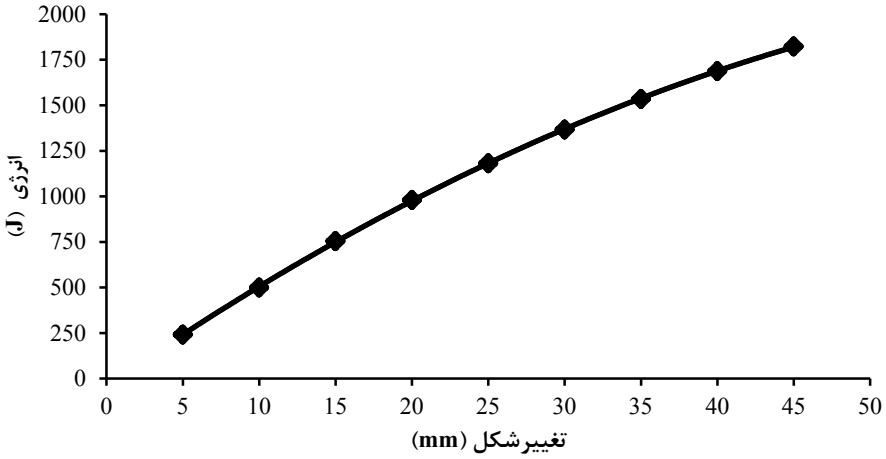


ج- میانگین سری نمونه‌های F

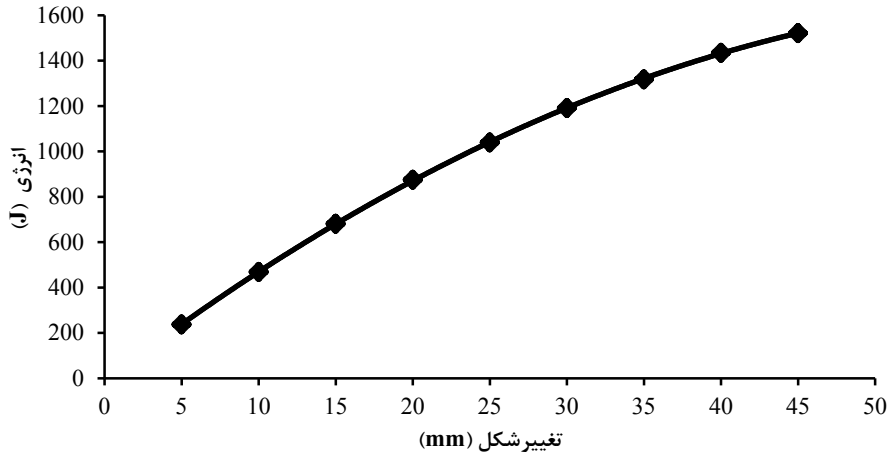
شکل ۵- منحنی بار- تغییر شکل طرح بهینه شده در آزمایش پانل بتن الیافی با میزان الیاف ۶ کیلوگرم در متر مکعب



الف- میانگین سری نمونه‌های D



ب- میانگین سری نمونه‌های E



ج- میانگین سری نمونه‌های F

شکل ۶- منحنی تغییرات جذب انرژی طرح بهینه شده بر اساس تغییر شکل در آزمایش پانل بتن الیافی

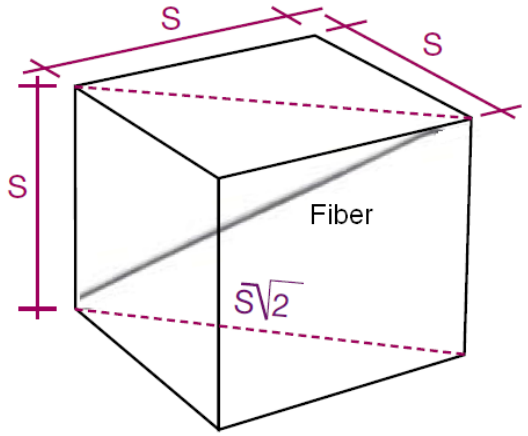
شاخص دیگر تعیین ظرفیت جذب انرژی بتن مسلح به الیاف، طول مشخصه (l_{ch}) است. طول مشخصه یکی از شاخص‌های شکنندگی مصالح است که به انرژی شکست، مدول ارتجاعی و مقاومت کششی بستگی دارد و به صورت گزاره‌ی (۱) تعریف می‌شود **[6]**:

$$l_{ch} = \frac{E_c . G_F}{f_t^2} \qquad (۱)$$

در این گزاره، f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال، E_c مدول ارتجاعی بر حسب مگاپاسکال و G_F انرژی شکست بر حسب ژول است. در آزمایش‌های انجام شده این شاخص بین ۲۵۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰ برای ۶ کیلوگرم محتوای الیاف در هر متر مکعب متغیر است. مقدار آن برای بتن مسلح به شبکه‌ی فولادی در حدود ۵۰۰۰ است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی انعطاف‌پذیری بالاتر تقویت با الیاف در مقایسه با تقویت توسط شبکه‌ی سیم جوش داده -که به طور گسترده در تونل‌سازی‌های متعارف استفاده می‌شود- است. گذشته از حداقل ظرفیت جذب انرژی لازم برای سازه، یک محدودیت دیگر برای میزان الیاف، مقدار مورد نیاز برای مهار ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی است. حداقل مقدار الیاف برای استفاده در مهار جمع‌شدگی (ρ_f) را می‌توان از گزاره‌ی (۲) به دست آورد **[4]**:

$$\rho_f = \frac{\pi . d_f^2 . l_f}{4 s^3} \qquad (۲)$$

در این گزاره، d_f قطر الیاف، l_f طول آن‌ها و s میانگین فضای لازم بین الیاف بر حسب میلی‌متر است که می‌تواند به طور محافظه‌کارانه، مطابق **شکل ۷**، برابر با ۴۵ درصد طول الیاف در نظر گرفته شود.



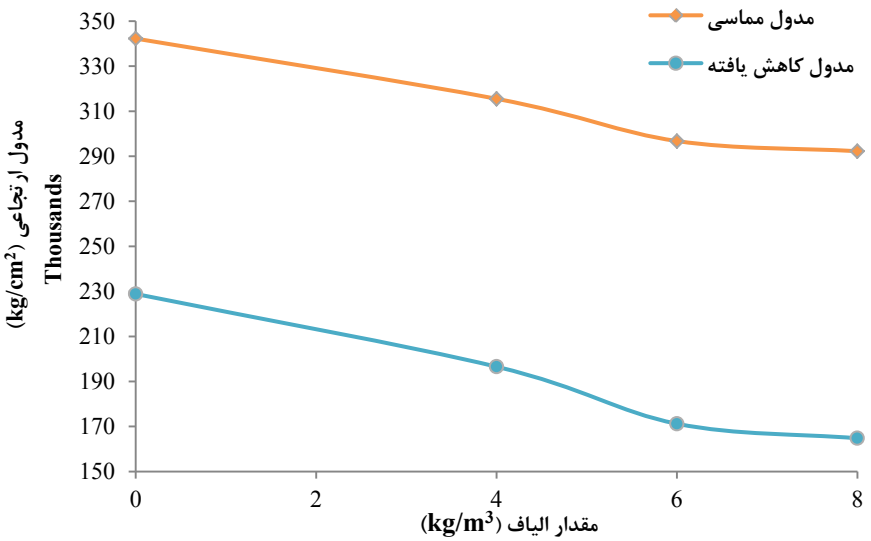
شکل ۷-تعریف فاصله‌ی معادل بین الیاف برای محاسبه‌ی درصد الیاف طرح اختلاط

برای الیاف اصلاح شده‌ی پلی‌اولفین با کارآیی بالا، این مقدار کمتر از ۰٫۳ درصد است. آزمایش‌های جمع‌شدگی انجام شده برای میزان الیاف رایج (۰٫۶۷ درصد) نشان می‌دهد این مقدار الیاف به طور کامل ترک‌های جمع‌شدگی حرارتی و پلاستیک را مهار می‌کند. این مقدار مطابق ۶

کیلوگرم از الیاف پلیمری در یک متر مکعب بتن تازه است.

مدول ارتجاعی نیز همان‌گونه که در **شکل ۸** ملاحظه می‌شود، در این آزمایش اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، الیاف، مدول ارتجاعی را به طور متوسط در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برای مدول مماسی اولیه و ۱۵ تا ۲۰ درصد برای مدول کاهش یافته‌ی ثانویه کاهش می‌دهند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که افزایش میزان الیاف موجب کاهش متناسب مدول ارتجاعی نخواهد شد. بنابراین الیاف به مقدار ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب انعطاف‌پذیری نزدیک به یکدیگر خواهند داشت. بنابراین مقدار الیاف بهینه از نظر اقتصادی در این حالت می‌تواند مقدار ۶ کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته شود.

کاهش مدول ارتجاعی با مقاومت فشاری ثابت عموماً سبب انعطاف‌پذیری بیش‌تر بتن با همان مقاومت می‌شود. این انعطاف‌پذیری می‌تواند تمرکز تنش و عرض ترک‌ها را کاهش دهد و در مجموع در مقایسه با بتن مسلح به فولاد رفتار بهتری خواهد داشت. برای بتن مسلح به فولاد شبکه‌ای متعارف، مدول ارتجاعی معادل افزایش می‌یابد. در این مورد در آزمایش‌های پانل تعداد ترک‌های کمتر با عرض بیش‌تر، مشاهده شده است.



شکل ۸- تغییرات مدول ارتجاعی مماسی و مدول کاهش یافته بر اساس میزان الیاف مصرفی در آزمایش‌های تیر و پانل همراه با درصد کاهش مدول ارتجاعی

الیاف در بتن مسلح به حجم کم الیاف (کمتر از ۰٫۱ درصد)، تاثیر کمی بر روی مقاومت کششی و فشاری دارند. تاثیر مقدماتی الیاف، بهبود بخشیدن رفتار ترک‌ها و سخت‌شدگی یا ظرفیت انتقال تنش‌ها پس از ترک‌خوردگی و کرنش کششی در گسیختگی است. ساز و کار بیرون آمدن الیاف به مشخصات الیاف و بتن، ویژگی‌های مکانیکی اندرکنشی بین الیاف و بتن و زاویه‌ی انحراف الیاف نسبت به جهت بارگذاری بستگی دارد.

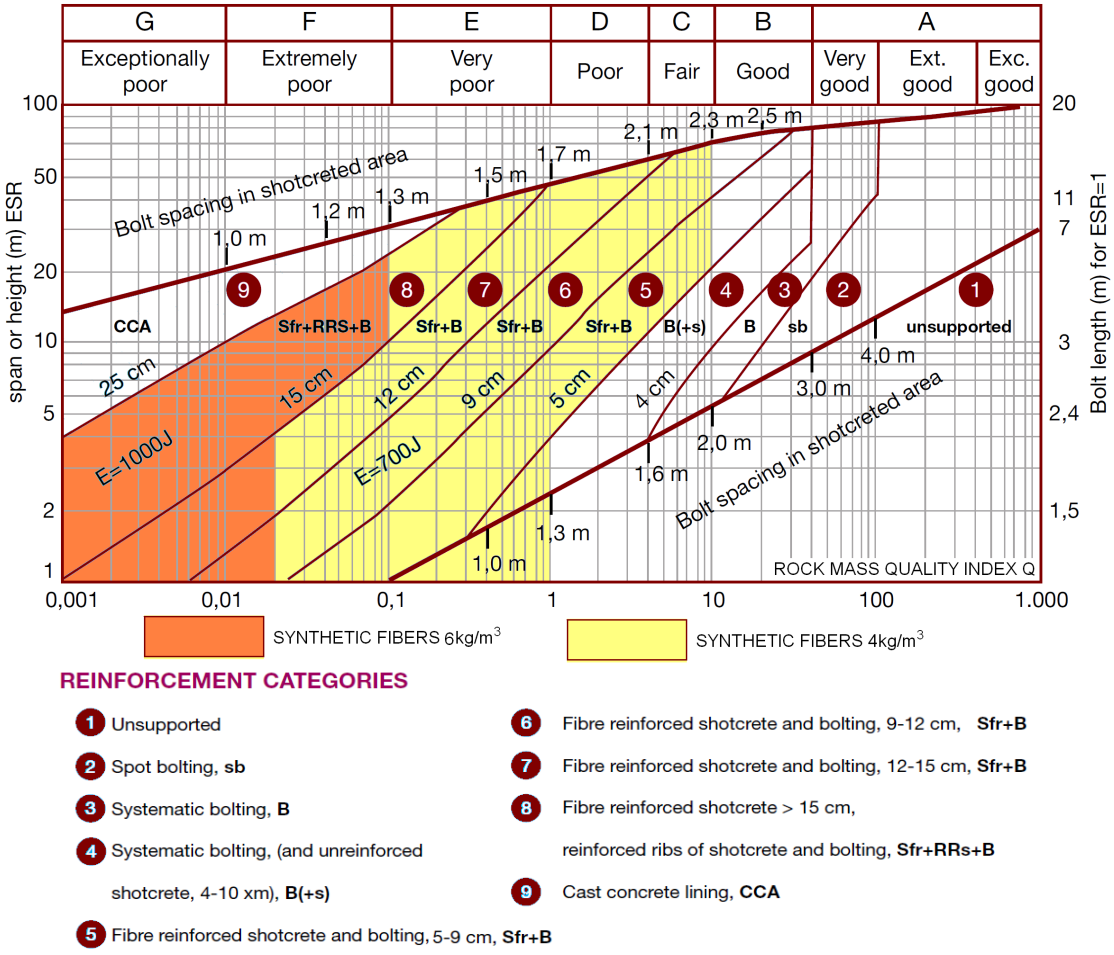
نتایج نشان می‌دهد که به منظور دست‌یابی به مزایای سازه‌ای نظیر جذب انرژی بالا از الیاف متعارف، محتوای الیاف در مخلوط باید در حدود ۱٫۵ تا ۲٫۰ درصد باشد. این مطالعه یک نسبت اختلاط جدید با الیاف مصنوعی بلند معرفی می‌کند که در مقایسه با طرح‌های موجود، با استفاده از نصف میزان الیاف، ویژگی‌های همان مخلوط را فراهم می‌سازد. با استفاده از این روش بالاترین رده‌ی جذب انرژی یعنی ۱۰۰۰ ژول که توسط *EFNARC* تعیین شده، با یک مخلوط بتن بسیار اقتصادی‌تر قابل دست‌یابی است.

۴- بررسی نتایج و توصیه‌های طراحی

با توجه به نوع کاربری، ظرفیت جذب انرژی لازم برای سازه‌های مختلف متفاوت است. از این‌رو، طرح اختلاط

می‌تواند بسته به نیاز بهینه و سازگار شود. برای الیاف پلیمری بلند که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شده است، بتن با مقاومت متوسط رده‌ی ۲۸ تا ۴۰ مگاپاسکال، حداقل به ۰٫۶ درصد الیاف در مخلوط نیاز دارد تا ظرفیت جذب انرژی کلاس ۱۰۰۰ ژول (مورد نیاز برای تونل‌سازی در سنگ‌های ضعیف) را فراهم سازد. روش‌های متداول طرح اختلاط بتن با الیاف سازه‌ای، میزان مصرف حداقل ۱٫۰ درصدی را برای طرح ارایه می‌کند که میزان الیاف مصرفی در آن به طور میانگین ۵۰٪ بیش‌تر از طرح پیشنهادی است. توجه شود که این میانگین بر اساس نوع الیاف کمی تغییر می‌کند. در سنگ با شرایط متوسط، می‌توان از محتوای الیاف کمتر استفاده نمود. برای این تراز که معادل کلاس ظرفیت جذب انرژی ۷۰۰ ژول است، نتایج آزمایش‌های انجام شده مقدار متوسط ۰٫۴۵ درصد الیاف را پیشنهاد می‌دهد.

برای استفاده‌ی کاربردی از ظرفیت جذب انرژی بتن‌های الیافی در طراحی پوشش تونل‌ها می‌توان از روش‌های تجربی طراحی تونل استفاده نمود. بارتون و همکاران **[7]** و **[8]**، نمودار میزان جذب انرژی لازم برای طراحی پوشش نهایی تونل در شرایط مختلف ژئوتکنیکی را برای کلاس‌های مختلف انرژی ارایه داده‌اند (**شکل ۹**). این نمودار سامانه‌ی نگهداری لازم را بر اساس رابطه‌ی بین مشخصات تونل نظیر ارتفاع یا دهانه و نوع خاک و سنگ محیط دربرگیرنده پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۹- محدوده‌ی قابل توصیه برای استفاده از طرح اختلاط بتن الیافی پیشنهادی برای دو کلاس جذب انرژی ۷۰۰ و ۱۰۰۰ ژول به ازای ۴ و ۶ کیلوگرم از الیاف پلی‌اولفین ۴۸ میلی‌متری بر اساس نتایج آزمایشات پانل مربعی مطابق استاندارد EFNARC [5]

در نمودار بارتون (**شکل ۹**)، پوشش‌های بتن پاشیده با ترکیبات الیاف‌دار هم پیشنهاد شده است. البته این نمودار ویژگی‌های الیاف را ارایه نمی‌دهد. بنابراین تنها معیار دست‌یابی به طرح اختلاط و نوع بتن الیافی، استناد به ظرفیت جذب انرژی خواهد بود. بنابراین با مرتبط ساختن مستقیم نتایج جذب انرژی از آزمایش پانل به سایر شاخص‌های طراحی می‌توان طرح اختلاط مناسب برای پوشش تونل را ارایه نمود. کلاس جذب انرژی برای هر مخلوط و پانل آن، برای گستره‌ی خاصی از کیفیت توده‌سنگ، مناسب خواهد بود. از این‌رو، برای هر مخلوط ترکیبی موجود، یک طیف یا محدوده‌ی کاربردی طراحی می‌تواند تعریف شود.

مجموعه نتایج بدست آمده می‌تواند برای معرفی ۳ کلاس ظرفیت جذب انرژی همان‌گونه که در *EFNARC* آمده است، همراه با طرح اختلاط‌های پیشنهاد شده در این مقاله استفاده شود. هر کلاس جذب انرژی، یک ناحیه را در نمودار طراحی مطابق **شکل ۹** پوشش می‌دهد. بنابراین ۳ ناحیه همراه با ۳ کلاس جذب انرژی و اطلاعات مربوط به ۳ طرح اختلاط همراه با جزییات تجربی پوشش‌ها را می‌توان در نمودار درج نمود. در این نمودار نتایج طرح برای دو میزان الیاف ۴ و ۶ کیلوگرم براساس محدوده‌ی پیشنهادی قابل استفاده درج شده است. از این نمودار می‌توان برای طراحی پوشش بتن یا بتن پاشیده‌ی الیافی با طرح اختلاط پیشنهادی برای سامانه‌ی نگهداری دایم و موقت تونل‌ها استفاده نمود.

با دنبال کردن روند انجام شده در این مطالعه می‌توان به ترازهای جذب انرژی بالاتر نیز دست پیدا نمود. حداکثر میزان جذب انرژی بدست آمده در این پژوهش ۱۱۵۰ ژول بوده است که ۱۵ درصد از بالاترین کلاس انرژی *EFNARC* بیش‌تر است.

باید توجه شود، اگر چه افزایش میزان الیاف موجب افزایش جذب انرژی تا یک تراز معین می‌شود، اما ساز و کار شکست و رفتار سازه‌ای تغییر نمی‌کند؛ بنابراین بهتر است برای دستیابی به ظرفیت جذب انرژی بیش‌تر تنها به افزایش میزان الیاف استناد نشده و سایر خصوصیات طرح نیز مد نظر قرار گیرد تا طرح از لحاظ اقتصادی و اجرایی هم توجیه‌پذیری مناسبی داشته باشد **[9]**.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده به منظور یافتن طرح اختلاط بهینه‌ی بتن مسلح به الیاف با حداکثر ظرفیت جذب انرژی، نشان داده است با اعمال تغییراتی در طرح اختلاط می‌توان با ثابت بودن میزان جذب انرژی، مقدار الیاف را به میزان قابل توجهی کاهش داد. تغییرات در مخلوط باید دو تاثیر عمده داشته باشد، این تغییرات عبارتند از:

۱- جایگزینی الیاف متداول با الیاف بلند در مخلوط

۲- کاهش نسبت آب به سیمان به کمتر از ۰٫۴ با افزودنی کاهنده‌ی شدید آب

این کار به طور کلی سبب خودتراکمی بالاتر بتن مسلح به الیاف با کارایی بیش‌تر و افزایش مقاومت و جذب انرژی آن می‌شود. این ترکیبات انعطاف‌پذیری و مقاومت بیش‌تری از خود نشان می‌دهند و می‌توانند برای تمامی کاربردهای سازه‌ای اعم از سازه‌های معمولی و سازه‌های خاص راهگشا باشند.

پوشش ترکیبی پیشنهاد شده در این پژوهش در مقایسه با طرح‌های متعارف بسیار اقتصادی‌تر بوده و همچنین قابل مقایسه با پوشش‌های بتنی درجای مسلح به فولاد است. مزایای دوام و عمر مفید این نوع پوشش نیز با توجه به عدم استفاده از فولاد و حذف مسایلی نظیر خوردگی، بسیار قابل توجه بوده که در مقوله‌ی جداگانه‌ای قابل بحث و ارایه است. در این تحقیق رده‌های جذب انرژی بر اساس استفاده از بتن پاشیده‌ی الیافی با الیاف فولادی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد افزایش جذب انرژی پوشش با افزایش یا بدون افزایش مقدار الیاف در طرح می‌تواند عملکرد مورد نظر سازه را تامین نماید.

۶- منبع‌ها

[1] ACI Committee 544. (2002). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.* NewYork: American Concrete Institute (ACI). http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/5441r_96.pdf.

[2] Antonaci, P., Bocca, P., & Grazzini, A. (2006). In Situ Determination of Toughness Indices of Fibre Reinforced Concrete. *Material and Structures, 39(3)*, 283-290. http://dx.doi.org/10.1007/s11527-005-9003-x.

[3] Soulioti, D. V., Barkoula, N. M., Paipetis, A., & Matikas, T. E. (2011). Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain, 47(s1)*, 535-541. http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x.

[4] Falkner, H., & Teutsch, M. (1993). *Comparative Investigations of Plain and Steel Fiber Reinforced Industrial Ground Slabs.* Technical University of Brunswick. Germany: Institute of Building Materials. ISBN: 9783892880783.

[5] British Standards Institute (2006). *Testing Sprayed Concrete: Determination of Energy Absorption Capacity of Fiber Reinforced Slab Specimens*. BSI Standards. SN: BS EN 14488-5:2006. ISBN: 0580482367.

[6] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). (2006). *Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures.* Rome, Italy: National Research Council-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. SN: CNR-DT 204/2006. http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR_DT204_2006_eng.pdf.

[7] Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NMT. In Kompen, Opsahl, and Berg (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support* (pp. 163-177 & 234-241). Oslo, Norway: Norwegian Concrete Association.

[8] Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics, 6(4)*, 189-236. http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496.

[9] Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. W., & Kaynia, A. (2002). *Rock Mass Quality (Q) Used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption.* Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute.

TUNNELING & UNDERGROUND SPACE ENGINEERING (TUSE)
نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
http://tuse.shahroodut.ac.ir/
Volume 1-Issue 1\Winter 2013

Energy-Based Optimized Design of Polymer Fiber-Reinforced Tunnel Lining

M. Safi
Assistant Professor; Faculty of Water and Environmental Eng.; Power and Water University of Technology

Received: 28 Aug 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Tunnel Lining
Energy Absorption
Fiber Reinforced Composite
Panel Test
Mix Design

Extended Abstract

This research aims to introduce an optimized design with minimum possible fiber content while having the maximum possible energy absorption capacity. A series of laboratory tests were conducted with various additive and fiber contents to reach this goal. General recommendations for achieving the optimized results were proposed based on the experimental results. Beam and panel tests were used to account for energy absorption capacity.

Introduction

Due to the relevance of the energy absorption capacity of fibrous concrete, several entities have been proposed for evaluating this property that include the toughness indices, the equivalent flexural strength and the fracture energy. Among these entities, the fracture energy is the most used in the constitutive models for characterizing the concrete tensile post-cracking behavior. The other entities have not been widely used in numerical simulation of the behavior of Fiber-Reinforced Concrete (FRC) structures. The generic mechanical response contains a linear regime, in which very little permanent micro-structural changes and deformation take place, and a nonlinear regime, in which permanent micro-structural changes occur in a stable manner.

Methodology and Approaches

In order to obtain the most appropriate mix characteristics with the highest energy absorption, an experimental study using 33 beam and rectangular panels was performed by the author. Tests were conducted for various fiber contents and the maximum specific absorbed energy was measured. The small amount of energy absorbed by plain concrete panel was ignored.

Results and Conclusions

The experimental study performed for finding optimized mix design of fiber reinforced concrete showed that applying some changes to the mix design, we can reduce the amount of fiber while keeping the energy absorption capacity constant. This totally results in a high performance of self-compacting fiber reinforced concrete with rather high strength and high energy absorption capacity. Such composite shows high resistance and ductility and can be excellent for both normal and special structural applications. Higher energy absorption levels may also be obtained by following a similar procedure as was performed in this study. Note that, although more fibers result in more energy absorption up to a certain level, the failure mechanism and structural behavior do not change, and thus, the same objectives can be met by using minimum amounts of fibers.