

بررسی تاثیر الیاف فولادی و فیلهای معدنی بر آب بندی لوله‌های بتنی

احمد بوشهریان¹، عباس بوشهریان²، پیام حسینی²

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

خلاصه

آب بندی بتن و لوله‌های ساخته شده از بتن آرمه که در انتقال هر نوع جریان فاضلاب استفاده می‌شوند، اهمیت بسیار بالایی در جنبه‌های مختلف ۱- آلودگی آب‌های زیر زمینی و ۲- دوام لوله‌ها دارد. در این مقاله به بررسی تحقیقات گوناگون انجام شده در رابطه با دوام لوله‌های بتنی می‌پردازیم. لذا در تحقیقات در این زمینه، بر روی لوله‌های با قطر 500 mm که از جنس بتن معمولی، بتن آرمه و بتن دارای الیاف فولادی ساخته شده بودند، آزمایش‌های آب بندی انجام شد. آزمایش‌های نفوذ پذیری مختلفی روی لوله‌های ساخته شده از ترکیبات و مواد مختلف با هدف دستیابی به آب بندترین لوله صورت گرفت. آزمایشات روی بتن معمولی که بتن آن از آهک مرغوب رد شده از الک شماره ۱۰۰ ($d < 0.15 \text{ mm}$) با درصد وزنی ۷٪ نسبت به وزن خشک کل سنگدانه‌ها به عنوان فیله تشکیل شده بود، آشکار کرد که این لوله‌های ۵۷٪ بهتر از لوله‌های تشکیل یافته از بتن بدون فیله عمل کردند. این نتایج به طور محسوس بیان می‌کند که افزودن الیاف فولادی و فیلهای معدنی خاصیت نفوذپذیری لوله‌ها را بهبود می‌بخشند.

کلمات کلیدی: الیاف فولادی، فیلهای معدنی، لوله‌های بتنی، آب‌بندی

مقدمه

بعضی از ذرات شیمیایی موجود در فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌توانند به خواص مکانیکی لوله‌ها ضرر برسانند و ممکن است که عمر مکانیکی و خدمات رسانی لوله‌ها را کاهش دهند. اگر فاضلاب داخل لوله‌ها یا آب‌های زیر زمینی احاطه کننده لوله‌ها که در تماس با آن‌ها هستند در داخل بتن نفوذ کنند، سبب واکنش‌های شیمیایی می‌شوند که مهمترین آن‌ها تبدیل $Ca(OH)_2$ به گچ و تشکیل نمک‌های آلومینیوم سولفات می‌باشد که این واکنش ممکن است باعث خرابی بتن و تشکیل ترک گردد که در نتیجه منجر به افزایش خطر حملات سولفاتی می‌شود. نشت فاضلاب از لوله‌های فاضلاب اثرات بسیار خطرناکی بر خاک و آب زیرزمینی دارد. بنابراین، آب‌بندی لوله فاضلاب بسیار مهم می‌باشد.

استفاده بسیار وسیعی از لوله‌های بتنی و بتن آرمه در هدایت سیلاب و فاضلاب به صورت کانال‌های باز و حتی مجاری کم فشار آب‌های شهری یا زراعی می‌شود. امروزه، بتن با الیاف فولادی (Steel Fiber Concrete) SFC، کاربردهای متنوعی مانند، آستر کشی تونل‌ها، کف کارخانه‌ها و لوله‌های بتنی دارد. در حال حاضر این یک واقعیت شناخته شده است که مقاومت کششی، ضربه‌پذیری، چقرمگی (ظرفیت جذب انرژی) و دوام بتن با افزودن الیاف فولادی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. استانداردهایی برای بتن با الیاف فولادی به صورت کلی [1,2] و برای لوله‌های بتنی با الیاف فولادی به صورت خاص [3,4] موجود می‌باشد. در تحقیقات اخیر بهبود وضعیت آب‌بندی لوله بتنی با استفاده از الیاف سلولوزی گزارش شده است [5]. مدت مدیدی است که استفاده از سیمان پرتلند مخلوط شده با پوزولان در سازه‌های آبی بدلیل تاثیر آن بر دوام، مقاومت و آب‌بندی بتن بوسیله جایگزین کردن بخشی از سیمان پرتلند با خاکستر بادی در ساخت لوله‌های بتنی رواج یافته است [6].

مطالعات همچنین نشان می‌دهند که استفاده از فیلهای معدنی که از الک شماره ۱۰۰ ($d < 0.15 \text{ mm}$)، مانند سنگ آهک مرغوب، در مقادیر مناسب باعث بهبود بسیار از ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی بتن می‌شود. زیرا این ترکیب بتنی با ریزساختار متراکم‌تر با تخلخل کمتر را فراهم می‌سازد [6,7]. فیلهای آهکی به سهولت به عنوان فرآورده جانبی در چرخه خرد کردن تخته سنگ‌های آهکی بزرگ استخراج شده از معادن، قابل دسترس هستند. فیلهای آهکی از تمام الک‌های جداکننده عبور می‌کنند و در کف واحد جدا ساز سنگ‌های خرد شده جمع می‌شوند. همچنین می‌توان با استفاده از ساییدن سنگ‌های آهکی شکسته به فیلهای آهکی دست یافت، زیرا با توجه به اینکه سنگ آهک کریستالی، ماده معدنی چندان سختی نمی‌باشد، این عمل انرژی زیادی مصرف نمی‌کند.

نتایج بدست آمده از مقالات مختلف، بیان می‌کند که فیبر آهکی با نسبت وزنی ۱۰٪ - ۷٪ مجموع وزن سنگدانه‌ها دارای حالت بهینه خود می‌شود، زیرا باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن شده و آب بندی آن را تقویت می‌کند [7]. گزارش شده است استفاده بیش از ۱۰٪ از فیبرهای معدنی بدلیل میزان زیاد آب مورد نیاز اضافه شده تاثیر منفی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن می‌گذارد [7].

از این روالها هدف این تحقیق این است که با استفاده از آزمایش تاثیر ۱- مقدار الیاف فولادی و ۲- فیبرهای آهکی افزوده شده به مخلوط سنگدانه‌ها در تولید لوله‌ها، بر آب‌بندی لوله‌های بتنی با الیاف فولادی تعیین شود و به وسیله اعمال تست‌های مشابه بر بتن‌های معمولی و بتن آرمه خصوصیات انواع بتن مقایسه گردد. بنابراین تست‌های نفوذ پذیری بر روی نمونه‌های آزمایشی ۲۸ روزه لوله‌های بتنی صورت گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی

سنگدانه‌ها و سیمان پرتلند مورد نیاز بتن

ابتدا، آزمایش‌های غربال استاندارد، وزن مخصوص، جذب سطحی بر روی سه نمونه تصادفی از چهار نوع مختلف سنگدانه معمول مورد استفاده در لوله‌های بتنی، انجام شد. در ساخت لوله‌ها از یک گروه شن طبیعی و سه گروه دانه‌بندی مختلف از سنگدانه‌های شکسته شده که دانه‌بندی شده‌اند استفاده شد که اندازه دانه‌های آن‌ها به صورت روبرو بود: ماسه طبیعی ۷-۰ میلی‌متر، ماسه شکسته ۶-۰ میلی‌متر، شن شکسته متوسط ۱۰-۶ میلی‌متر و شن شکسته درشت‌دانه ۱۶-۱۰ میلی‌متر.

علاوه بر این، مقدار مناسبی فیبر آهکی مرغوب، عبوری از الک شماره ۱۰۰ ($d < 0.15mm$) در ساخت لوله‌های بتنی به کار رفت. با استفاده از تست-های استاندارد وزن مخصوص متوسط و جذب سطحی چهار گرته سنگدانه‌ها و فیبر، به ترتیب در بازه‌های ۲،۷۳ - ۲،۶۵ و ۲،۲۶ - ۱،۱۰٪ قرار گرفتند که این بازه‌ها در محدوده‌های رایج می‌باشند.

سیمان پرتلند نوع I-425 در ساخت لوله‌های تست شده استفاده شد. وزن مخصوص آن نیز توسط کارخانه سازنده $3 \frac{gr}{cm}$ ۳،۰۸ گزارش شده است.

این نوع سیمان، سیمان پرتلند خالص بدون هرگونه افزودنی پوزولانی می‌باشد و مقاومت فشاری ۲ روزه، ۷ روزه و ۲۸ روزه آن به ترتیب ۲۵، ۳۵ و ۵۰ $\frac{N}{mm^2}$ می‌باشد.

طرح اختلاط و الیاف فولادی

استانداردهای مختلف از جمله TS-821-EN-1916 برای بتن با الیاف فولادی حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسکال (بتن C35) را اجباری می‌دانند [3]. همچنین استاندارد آلمانی DIN-EN-641 نیز حداقل مقاومت ۲۸ روزه را به ۳۵ مگاپاسکال محدود می‌کند [8]. تست‌های خرد کردن (crushing)، تست‌های کارایی برای لوله‌هایی با قابلیت لرزاندن بالای سکوی قالب ریزی و همچنین از تجارب قبلی ساخت لوله که باعث بدست آمدن مخلوطی با اسلامپ صفر شده بود که نتایج آن در جدول ۱ آمده است، استفاده شد. لازم به ذکر است که در این مخلوط که با اسلامپ صفر بدست آمد، هیچ نوع افزودنی از قبیل روان کننده و مانند آن استفاده نشد و بتن تازه به نظر خشک می‌آید و حتی این بتن از دید یک ناظر مبتدی ظاهری شبیه به سنگدانه‌های فوق اشباع شده را داشت.

در اینجا از دو نوع الیاف فولادی استفاده شد. نوع ۱ به طول ۶۰ میلی‌متر و قطر سطح مقطع ۰،۷۵ میلی‌متر و نوع ۲ به طول ۳۰ میلی‌متر و با همان قطر سطح

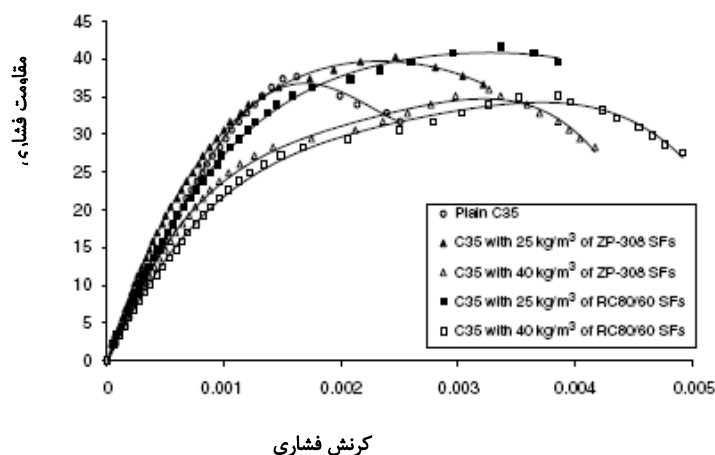
مقطع نوع ۱. تنش جاری شدن الیاف $1050 \frac{N}{mm^2}$ بوده و سایر ویژگی‌های آن‌ها مطابق با استانداردهای ASTM بودند.

جدول ۱- طرح اختلاط بتن C35 با و بدون فیبر آهکی

| بتن با فیبر آهکی | بتن طرح اختلاط مبنا | نوع مصالح بکار رفته |
|------------------|---------------------|-----------------------------|
| ۳۵۰ | ۳۵۰ | سیمان پرتلند تیپ I-425 |
| ۱۲۳ | ۱۱۷ | آب |
| ۱۴۱ | - | فیبر آهکی |
| ۵۶۲ | ۷۱۰ | ماسه 7 mm رودخانه‌ای |
| ۵۹۹ | ۶۰۴ | ماسه خرد شده 6mm-0 |
| ۲۹۹ | ۳۰۱ | سنگدانه متوسط خردشده 10mm-6 |
| ۳۹۸ | ۴۰۱ | درشت‌دانه خردشده 16mm-10 |

تست‌های مقدماتی

برای اینکه بتوان تعداد کل مخلوط‌های بتنی را میزانی منطقی در نظر گرفت از دو مقدار متفاوت الیاف فولادی به میزان 25 kg/m^3 و 40 در ساخت لوله‌های بتنی استفاده شد. لوله‌های با قطر داخلی 500 میلیمتر به طور گسترده هم از نوع بتن معمولی و هم به صورت بتن آرمه با توجه به مصرف بالایشان تولید می‌شوند، در اینجا نیز از همین اندازه لوله استفاده شد. حجم مناسبی از بتن که نسبت‌های اختلاط آن مانند جدول ۱ می‌باشد، در قالب‌های فولادی قرار گرفته بر روی سکوی لرزان ریخته شد. عمل لرزاندن تا زمانی که همه بتن تازه در قالب وارد شود و هیچ جایی برای افزودن بتن وجود نداشته باشد، بر روی قالب‌های فولادی اعمال شد. سه نمونه استوانه‌ای 150×300 میلیمتر از هر طرح اختلاط تهیه شد و در پایان ۲۸ روزه عمل آوری در آب 21 درجه سلسیوس، نمودار تنش-کرنش همه نمونه‌های استوانه‌ای طبق تست‌های استاندارد بدست آمد.



شکل ۱- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بتنی تحت فشار

جدول ۲- میانگین نتایج حاصله از تست‌ها بر روی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد دارای بتن C35

| نوع بتن | بارگذاری | مقاومت فشاری (Mpa) | مدول الاستیسیته (1000Mpa) |
|--|----------|--------------------|---------------------------|
| C35 طرح مبنا | ۶۶۵ | ۲۷,۶ | ۳۲ |
| C35 با ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف نوع ۲ | ۷۱۱ | ۴۰,۲ | ۳۳,۳ |
| C35 با ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف نوع ۲ | ۶۳۰ | ۳۵,۶ | ۲۹,۶ |
| C35 با ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف نوع ۱ | ۷۳۶ | ۴۱,۶ | ۳۰,۸ |
| C35 با ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف نوع ۱ | ۶۲۴ | ۳۵,۳ | ۲۵,۸ |

شکل ۱ منحنی‌های متوسط تنش-کرنش و جدول ۲ نتایج متوسط بدست آمده را نشان می‌دهند. مقاومت فشاری طرح با مقدار 25 kg/m^3 ، 10% بیشتر از بتن معمولی می‌باشد در حالی که مدول الاستیسیته آن‌ها تقریباً مشابه یکدیگر است.

ساخت لوله‌ها و تست سه نقطه‌ای

بتن نوع C35 و آرماتورهای عاجدار با تنش جاری شدن $420 \frac{N}{mm^2}$ در همه لوله‌ها استفاده شد. انواع مختلف لوله‌های تولید شده که ضخامت ۶۵ میلیمتر داشتند به شرح زیر است:

I: لوله‌های ساخته شده از بتن معمولی (CP)

II: لوله‌های ساخته شده از بتن معمولی که فیله‌های معدنی به آن فازوده شده است (FACP)

III: لوله‌های ساخته شده از بتن آرمه (RCP)

فقط یک خاموت به قطر ۷ میلیمتر در فواصل ۷۵ میلیمتر از طول لوله قرار داده شد. آرماتورهای طولی استفاده شده دارای قطر ۵ میلیمتر بودند که در فواصل ۲۰۰ میلیمتر قرار داده شدند. لوله بتن آرمه مورد استفاده در این آزمایش بسیار مشابه لوله کلاس IV از ASTM C76 [9] می‌باشد، بنابراین یک لوله بتن آرمه قوی است.

IV: لوله‌های با الیاف فولادی نوع ۲ با مقدار $25 \frac{kg}{m^3}$

V: لوله‌های با الیاف فولادی نوع ۲ با مقدار $40 \frac{kg}{m^3}$

VI: لوله‌های با الیاف فولادی نوع ۱ با مقدار $25 \frac{kg}{m^3}$

VII: لوله‌های با الیاف فولادی نوع ۱ با مقدار $40 \frac{kg}{m^3}$

بعد از عمل لرزاندن، از بتن تازه قالب‌گیری شده و لوله‌ها نیز به مدت ۶ ساعت در اتاق عمل‌آوری قرار گرفتند. اولین مرحله عمل‌آوری افزایش دمای محیط اتاق با آهنگ ۱۲ درجه سلسیوس بر ساعت، دومین مرحله استفاده از عمل‌آوری با بخار در دمای ثابت ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت و سومین مرحله بازگرداندن دوباره دمای محیط با آهنگ سرد کردن ۱۲ درجه سلسیوس بر ساعت می‌باشد.

با توجه به گزارشات موجود، حداکثر مقاومت شکنندگی برای لوله‌های بتنی با الیاف فولادی با مقدار $25 \frac{kg}{m^3}$ و با قطر داخلی ۵۰۰ میلیمتر و حداقل

ضخامت جداره ۶۰ میلیمتر باید بیشتر $60 \frac{KN}{m}$ از [10] باشد. تست شکنندگی موسوم به تست سه نقطه‌ای مانند شکل ۲ بر روی تمامی لوله‌ها اعمال شد. تخته بارگذاری در بالا و دو تخته تکیه‌گاهی در پایین در طول هر لوله قرار داده شده‌اند تخته‌های بالایی و پایینی شکل هندسی مناسبی داشته تا به راحتی بر روی لوله سوار شوند و همچنین با استفاده از مواد چسبنده بر روی لوله محکم می‌شوند. (شکل ۲ الف و ب)



شکل ۲- شکل سمت چپ ۲- الف، شکل سمت چپ ۲- ب

لوله‌های بتنی با الیاف ساخته شده از نوع ۱ با مقدار $25 \frac{kg}{m^3}$ دارای مقاومت بالای $78 \frac{KN}{m}$ بودند و به خوبی شرایط ذکر شده برای حداقل مقاومت را ارضا می‌کنند. خلاصه نتایج بدست آمده از این آزمایش بر روی لوله‌های بتنی با و بدون الیاف فولادی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج حاصله از تست سه نقطه‌ای برای لوله‌های بتنی معمولی، بتن آرمه و الیافی

| نوع لوله | بار نهایی میانگین (KN) | بار میانگین بر حسب طول لوله (کیلو نیوتن بر متر) | حداقل بار قابل قبول توسط آیین نامه TS-821-EN-1916 |
|-------------------------|------------------------|--|--|
| بتن معمولی | ۶۴,۵ | ۴۳ | ۳۵ |
| بتن معمولی با فیبر | ۷۲ | ۴۸ | ۳۵ |
| بتن آرمه | ۱۱۰,۶ | ۷۳,۷ | ۶۷,۵ |
| بتن با الیاف نوع ۲ (۲۵) | ۱۰۵,۳ | ۷۰,۲ | ۶۷,۵ |
| بتن با الیاف نوع ۲ (۴۰) | ۱۱۲,۳ | ۷۴,۹ | ۶۷,۵ |
| بتن با الیاف نوع ۱ (۲۵) | ۱۱۷,۴ | ۷۸,۳ | ۶۷,۵ |
| بتن با الیاف نوع ۱ (۴۰) | ۱۲۰,۸ | ۸۰,۵ | ۶۷,۵ |

طول همگی لوله‌ها در این آزمایش برابر ۱,۵ متر بود. در ستون ششم و هشتم جدول ۳، به ترتیب حداکثر بار بر واحد طول لوله‌ها و مقدار قابل قبول حد پایین بیان شده در TS-821-EN-1916 درج شده است. ذکر این نکته که البته بدیعی به نظر می‌رسد ضروری است که مقاومت بدست آمده برای هر لوله از آزمایشات باید بیشتر از حداقل بیان شده در استانداردها باشد تا بتوان به صورت کاربردی از آن‌ها استفاده کرد. با توجه به اینکه روند ساخت لوله‌های بتن آرمه به این صورت است که ابتدا آرماتورهای فولادی با قطرهای مناسب به محل ساخت حمل شده و سپس در طول‌های مورد نیاز بریده و در ابعاد مناسب خم می‌شوند. و اما سخت‌ترین و مهم‌ترین و وقت‌گیرترین عمل، روند جوشکاری آرماتورهای طولی و عرضی در نقاط معین شده برای اتصال آن‌ها در هنگام ساخت قفسه آرماتور می‌باشد. بنابراین آماده سازی قفسه آرماتورها هم زمان‌گیر است و هم پر هزینه. در نتیجه اضافه نمودن مستقیم الیاف فولادی به بتن تازه در هنگام اختلاط مصالح مانند هر افزودنی دیگر روشی بسیار ساده‌تر و با صرف زمان و انرژی کمتر خواهد بود که البته در این تحقیق نیز این امر صورت پذیرفته است.

آزمایشات آببندی

این آزمایش مطابق استاندارد TS-821-EN-1916 انجام شد [3]. دو سر لوله با استفاده از صفحه‌های پلاستیکی به سختی بین صفحه‌های فولادی و سر لوله فشرده شد تا بدین وسیله عایق کاری لوله میسر شود.



شکل ۳- آزمایش آببندی روی یک لوله

جدول ۴- نتایج تست نفوذپذیری آب

| نوع لوله | کاهش آب میانگین (سانتیمتر مکعب) |
|-------------------------|---------------------------------|
| بتن معمولی | ۱۱۷ |
| بتن معمولی با فیلر | ۵۰ |
| بتن آرمه | ۷۳ |
| بتن با الیاف نوع ۲ (۲۵) | ۷۰ |
| بتن با الیاف نوع ۲ (۴۰) | ۶۷ |
| بتن با الیاف نوع ۱ (۲۵) | ۶۲ |
| بتن با الیاف نوع ۱ (۴۰) | ۵۸ |

با کمک یک شلنگ پر فشار، فشار نسبی 0.5 Bar (تقریباً برابر فشار ناشی از ۵ متر ستون آب) با استفاده از یک کمپرسور اعمال شد. ابتدا داخل لوله به طور کامل بوسیله آب با فشار ثابت 0.5 Bar پر شد. ۵ دقیقه بعد در صورت پر نبودن لوله‌ها، دوباره آن‌ها را پر می‌کنیم تا مطمئن شویم که تست بر روی لوله‌های کاملاً پر صورت می‌گیرد. سپس فشار ثابت 0.5 Bar به مدت ۱۵ دقیقه به لوله‌ها اعمال شد. در پایان این زمان، فشار از لوله‌ها برداشته شده و آب از دست رفته از داخل لوله با محاسبه آب مورد نیاز برای پر کردن مجدد لوله بدست می‌آید. این مقدار بدست آمده، مقدار آب نشت شده از دیواره‌های لوله می‌باشد نفوذپذیری و تخلخل لوله‌ها نسبت مستقیم با میزان آب از دست رفته لوله‌های پر از آب تحت فشار ثابت 0.5 Bar دارند. شکل ۳ صحنه‌ای از انجام تست را نمایش می‌دهد و همچنین جدول ۴ میزان نشت را مطابق با استاندارد TS-821-EN-1916 نشان می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های استاندارد اعمال شده بر روی لوله‌های مختلف، نتیجه‌گیری‌های زیر را بدنبال دارد:

۱- مقدار بهینه الیاف فولادی باید در نزدیکی 25 kg/m^3 باشد، زیرا افزایش مقدار الیاف از 25 kg/m^3 باشد، زیرا افزایش مقدار الیاف از 25 kg/m^3 به 40 kg/m^3 منجر به بهبود ناچیز میزان آب‌بندی لوله می‌شود، در صورتی که مقدار قابل توجه (60%) در جرم الیاف استفاده شده افزایش داشته‌ایم که از لحاظ اقتصادی اصلاً به صرفه نخواهد بود. تاثیر الیاف بلندتر (نوع ۱) در مقایسه با الیاف کوتاهتر (نوع ۲) بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام لوله‌های بتنی کمی بهتر می‌باشد.

۲- لوله‌های بتنی دارای مقدار 25 kg/m^3 از لحاظ آب‌بندی 15% بهتر از لوله‌های بتن آرمه رایج عمل می‌کنند. دلیل این بهبود به احتمال زیاد مربوط به کاهش ترک‌های ایجاد شده در بتن است که از ویژگی‌های بارز استفاده از الیاف می‌باشد.

۳- افزودن فیلرهای آهکی مرغوب عبوری از الک شماره ۱۰۰ ($d < 0.15 \text{ mm}$) به بتن در حدود 7% وزن خشک سنگدانه‌ها نشان داد که حدود 57% خاصیت آب‌بندی لوله را نسبت به لوله ساخته شده از بتن معمولی بدون فیلر افزایش می‌بخشد. بنابراین، به نظر می‌رسد که افزودن فیلرهای معدنی به میزان 7% وزن لوله، بهبود قابل توجهی بر قابلیت نشت لوله‌ها دارد. در صورتی که لوله‌ها در مجاورت محیط سولفاتی شدید قرار گیرند ممکن است فیلرهای آهکی

بتن را آسیب پذیر سازند. از این رو استفاده از فیلهای آهنی در محیطهایی که تحت خطر حمله سولفاتی شدید هستند باید به دقت بررسی شود و به عنوان جایگزین می توان از خاکستر بادی یا هر نوع پوزولان طبیعی برای مقابله با این خطر استفاده کرد.

منابع

- [1] ACI 544.4R-88. (1988 (Reapproved 1999)) *Design considerations for steel fiber reinforced concrete*. American Concrete Institute, ACI Committee 544.
- [2] TS-10514. (1992) *Concrete – steel fiber reinforced – Rules for mixing concrete and control*. Turkish Standards Institute, Necatibey Caddesi, 112, Ankara, Turkey.
- [3] TS-821-EN-1916. (1998) *Concrete pipes and fittings, Unreinforced, Steel Fiber, and Reinforced*. Turkish Standards Institute, Necatibey Caddesi, 112, Ankara, Turkey.
- [4] BS-DD-76-Part-2. (1983) *Draft for development, precast concrete pipes of composite construction*. British Standards Institution.
- [5] Fisher AK, Bullen F, Beal D. (2001) *The durability of cellulose fibre reinforced concrete pipes in sewage applications*. Cement Concrete Res. **31**. 543–53.
- [6] Berryman C, Zhu J, Jensen W, Tadros M. (2005) *High-percentage replacement of cement with fly ash for reinforced concrete pipe*. Cement Concrete Res. **35**(6). 1088–91.
- [7] Topcu IB, Ugurlu A. (2003) *Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete*. Cement Concrete Res. **33**. 1071–5.
- [8] DIN-EN-641. (1994) *Reinforced concrete pressure pipes, cylinder type, including joints and fittings* (English version of DIN-EN-641). European Committee for Standardization, Central Secretariat, rue de Strassart 36, B-1050, Brussels.
- [9] ASTM-C76M – 03. (2003) *Standard specification for reinforced concrete culvert, storm drain, and sewer pipe (Metric)*. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- [10] Institut für Bautechnik, (1988) *Rohre aus Stahlfaserbeton (Steel-fiber-concrete pipe)*, Zulassungsbescheid. Institut für Bautechnik, Anstalt des öffentlichen Rechts.