

معرفی اجمالی انواع بتن‌ها (قسمت اول)



محسن تدین
رئیس هیئت مدیره انجمن بتن ایران



علی اکبر کفاش بازاری
رئیس مرکز تحقیق و توسعه سیمان تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

همواره شناخت تنوع در هر صنعتی جذاب و مورد تاکید کارشناسان است. از این‌رو در این مقاله انواع بتن، سنگدانه‌ها، چسباننده‌ها، افزودنی‌ها و الیاف‌ها معرفی می‌شوند. بطور کلی می‌توان گفت طبقه‌بندی سنگدانه‌ها، چسباننده‌ها، افزودنی‌ها و الیاف شامل مصنوعی آلی، مصنوعی غیرآلی، طبیعی آلی و طبیعی غیرآلی می‌باشند. در ادامه انواع بتن‌های شناخته شده، کاربرد، مورد مصرف، اجزا و روش تولید آن بطور مختصر معرفی می‌گردند. برای آشنائی مناسب، عناوین فارسی و لاتین به همراه توضیح و تصویر هر نوع بتن گردآوری شده است. از نکات مورد توجه آنست که از میان بیش از ۱۶۰ نوع بتن معرفی شده، فقط ۷ نوع فاقد سیمان می‌باشد. واژگان کلیدی: بتن، سیمان، سنگدانه، الیاف.

۱- مقدمه

طی دهه‌های اخیر پیشرفت تکنولوژی بتن بسیار چشمگیر بوده است و ظهور انواع بتن‌های جدید دلیلی بر این ادعا می‌باشد. غالباً بکارگیری بتن در موارد مختلف باعث گردید تا مشخصات فنی موردنیاز آن روشن‌تر گردد و در نهایت منجر به نوع جدیدی از بتن شود. در این مقاله بیش از ۱۶۰ نوع بتن به طور مختصر و به زبان ساده به کمک منابع مختلف [۹-۱۹] معرفی شده است و برای تبیین بهتر، چند تصویر از آن ارائه گردید.

۲- بتن و اجزای آن

در یک تعریف کلی بتن به هر مجموعه ظاهراً یکپارچه اطلاق می‌گردد که از دانه‌های مختلف و چسب و گاهی افزودنی^۱ و الیاف^۲ در تولید آن استفاده شده است. نام بتن^۳ در زبان‌های اروپایی برای این منظور به کار می‌رود. در تعریفی دیگر بتن جسمی بسیار سخت و سنگ‌مانندی است

^۱ Admixture (for concrete) or Additive (for cement)

^۲ Fiber

^۳ Beton or Concrete

که از ترکیب مقادیر معینی دانه، چسباننده، آب و احتمالا مواد افزودنی بدست می‌آید. به بیانی دیگر بتن شامل استخوان‌بندی است از دانه‌ها که دوغاب چسباننده روی آنها را پوشانده و به هم می‌چسباند. این دانه‌ها^۴ می‌تواند از مواد مختلف طبیعی^۵ یا مصنوعی^۶ و همچنین آلی^۷ یا غیرآلی^۸ تشکیل شده باشد و نیز دارای چگالی‌های متفاوت از خیلی سبک تا خیلی سنگین باشد. بنابراین دیده می‌شود که ده‌ها نوع دانه می‌توان نام برده شود. از ابتدا در ایران به این نوع دانه‌های بتن به غلط سنگدانه یا مصالح سنگی گفته شده است. به هر حال دانه‌های سنگی یکی از ده‌ها نوع از این دانه‌ها هستند و سنگی بودن شرط قرارگیری در مجموعه سنگدانه نیست. چسب بتن^۹ نیز می‌تواند از نوع طبیعی یا مصنوعی و همچنین از نوع آلی یا غیرآلی باشد. بنابراین چهار دسته خواهد داشت. مواد افزودنی و الیاف نیز هر کدام می‌توانند طبیعی یا مصنوعی و همچنین آلی یا غیرآلی باشند و تنوع زیادی خواهند داشت. ترکیب انواع سنگدانه، چسب (سیمان)، افزودنی و الیاف می‌تواند صدها نوع بتن بدست دهد. از طرفی وجود ظاهر مختلف، تنوع در روش تولید و اجرای بتن‌ها و گاه نسبت‌ها و مقادیر نیز انواعی از بتن را بوجود می‌آورد. بدین ترتیب دیده می‌شود که انواع بی‌شماری از بتن‌ها جلوه می‌کنند. هرچند سیمان در معنای کلی به معنی چسب است که یکی از آنها سیمان پرتلند می‌باشد، اما در ادبیات فارسی، اغلب اوقات مقصود از سیمان، همان سیمان پرتلند یا سیمان‌های آمیخته است. در واقع عامل چسباندن دانه‌های بتن معمولی و رایج، خمیر سیمان پرتلند یا آمیخته می‌باشد که مخلوط آب و این نوع سیمان‌ها است. در جدول ۱ به انواع اجزای بتن معرفی شده

۳- انواع بتن‌ها

پرداخته می‌شود و تصاویر آنها در جدول ۲ از نظر می‌گذرد. باید اضافه نمود که افزودنی‌ها در انواع مختلفی تولید می‌شوند و تصاویر جدول ۲ فقط به عنوان نمونه آورده شده است.

مطابق دسته‌بندی‌های ارائه شده در بخش قبلی دیده می‌شود که با ترکیب این مواد، ده‌ها بلکه صدها نوع با تعریف جامع آن حاصل می‌شود. حتی با تعریف رایج نیز صدها بتن را می‌توان ساخت. بتن را از نظر سبکی یا سنگینی (وزن مخصوص) می‌توان در دسته‌های مختلف قراردادی جای داد. از نظر نحوه اجرا نیز بتن‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند. شیوه‌های اجرا مانند ریختن با لوله‌های ترمی، پمپ، پاشیدن، پیش‌آکندگی و سایر شیوه‌ها از جمله بتن چرخیده یا بتن با اعمال خلا و غیره از نمونه شیوه‌های اجرایی هستند. گاه بتن‌ها از نظر طراحی تقسیم‌بندی می‌شوند. بتن غیرمسلح (ساده)، بتن مسلح، بتن پیش‌تنیده (پیش‌کشیده یا پس‌کشیده) از این جمله‌اند. پیش‌ساختگی یا درجا ریختن نیز تقسیم‌بندی دیگری محسوب می‌گردد. بنابراین باید اذعان کرد که از منظرهای مختلف، تقسیم‌بندی و انواع مختلفی از بتن را می‌توان برشمرد که قبلا به آن اشاره شد. در جدول ۳ انواع بتن‌های شناخته شده گردآوری شده‌اند.

⁴ Aggregate

⁵ Natural

⁶ Synthetic or Artificial

⁷ Organic

⁸ Inorganic (Mineral)

⁹ Cement یا Adhesive

جدول ۱- معرفی انواع اجزای بتن‌ها

افزودنی‌های بتن					
انواع			طبقه‌بندی کلی		
Water reducer Ad. (WRA) Plasticizer (P)	افزودنی‌های کاهنده آب یا روان کننده معمولی (لیگنوسولفونات‌ها)	۱	Water reducer	روان‌سازها	۱
Super Plasticizer (SP) High range Water reducer Ad. (HRWRA)	کاهنده آب قوی (فوق‌روان کننده) (پلی کربوکسیلات‌ها، پلی فسفونات‌ها، مواد پایه نفتالین یا ملامین)	۲			
Accelerated, Rapid setting Ad.	تسریع کننده گیرش	۳	Materials affecting on setting and hardening time	مواد موثر بر زمان گیرش و سخت شدن	۲
Rapid hardening Ad.	تسریع کننده سخت‌شدگی	۴			
Set controlling, Retarding Ad.	کندگیر کننده گیرش	۵			
Water reducer & Retarding Ad.	کاهنده آب کندگیر کننده گیرش	۶			
Super Plasticizer & Retarding Ad.	فوق‌روان کننده کندگیر کننده گیرش	۷			
Water reducer & Accelerated Ad.	کاهنده آب تسریع کننده گیرش	۸			
Water retaining Ad	نگهدارنده‌های آب	۹	Materials affecting curing, durability, etc	مواد موثر بر عمل‌آوری، دوام و غیره	۳
Air entrained Ad	حباب‌سازها	۱۰			
Water prear & dapping Ad.	آب‌بندکننده‌ها و نم‌بندکننده‌ها	۱۱			
Viscosity Modifying Ad. (VMA)	مواد افزودنی پایدار کننده و انواع گیرنده گراونروی (لزجت‌دهنده)	۱۲			
Anti washout Ad.	مواد ضد آب‌شستگی	۱۳			
Gas Forming Ad	گاززاها	۱۴			
Foaming Ad.	کف‌زاها	۱۵			
Defoamer Ad.	مواد ضد حباب و کف	۱۶			
Pumping Ad.	مواد افزودنی کمک پمپ و تزریق	۱۷			
Pozzolans & Slags	پوزولان‌ها و سرباره‌ها	۱۸			
Expanding Ad. Shrinkage compose control Ad.	منبسط کننده‌ها، کنترل کننده انقباض	۱۹			
Algae, ...	مواد ضد جلبک، قارچ و غیره	۲۰			
Corrosion Inhibiting Ad.	مواد بازدارنده خوردگی	۲۱			
Pigments	رنگدانه‌ها	۲۲			
Bonding Ad.	مواد پیوندزا	۲۳			
Latexes	لاتکس‌ها	۲۴			

ادامه جدول ۱- معرفی انواع اجزای بتن‌ها

انواع الیاف			انواع چسباننده			انواع سنگدانه‌ها (دانه‌های بتن)			طبقه‌بندی کلی
Poly Propylene (PP)	پلی پروپیلن	۱	Artificial resins	رزین‌های مصنوعی	۱	Plastic and polymer granules	دانه‌های خرد پلاستیکی و پلیمری	۱	مصنوعی آلی Organic synthetics
Nylone	نایلونی	۲	Epoxies	اپوکسی‌ها	۲	Sponge polymer granules	دانه‌های پلیمری اسفنجی مانند	۲	
Poly Amide	پلی آمیدی	۳	Bitumen	قیر پالایشی	۳	Expanded Polystyrene granules	دانه‌های منبسط شده پلی استایرن EPS	۳	
Poly Ester	پلی استری	۴	Tar	قطران ^۱	۴	Melamine particles	خردده‌های ملامین	۴	
Carbon fib.	کربنی	۵	*	*	*	Rubber particles	خردده لاستیک	۵	
Aramid fib.	آرامید	۶	*	*	*	Freezed Rubber particles	خردده لاستیک منجمد شده	۶	
Poly Vinyl Aramid (PVA)	پلی وینیل	۷	*	*	*	Polyethylene tube particles	خردده‌های لوله‌های پلی اتیلنی	۷	
Poly Ethylene	پلی اتیلن	۸	*	*	*	PVC tube particles	خردده لوله‌های PVC	۸	
Glass	شیشه (پشم شیشه)	۹	Gypsum paste	خمیر گچ	۵	Brick particles	خردده آجر	۹	مصنوعی غیر آلی Inorganic synthesis
Slag fib.	سرباره (پشم سرباره)	۱۰	Calcium lime slurry	دوغاب آهک کلسیمی	۶	Pottery, ceramic tile particles	خردده سفال، کاشی و سرامیک	۱۰	
Rock fib.	پشم سنگ	۱۱	Lime and clay slurry	دوغاب آهک و رس	۷	Glass particles	خردده شیشه	۱۱	
Steel fib.	فولادی	۱۲	Lime and ash slurry	دوغاب آهک و خاکستر	۸	Hollow glass (Sponge)	شیشه پوک (اسفنجی)	۱۲	
Metal fib.	فلزهای مختلف	۱۳	Aqueous lime slurry	دوغاب آهک آبی	۹	Hollow Silica (Sponge)	سیلیس پوک (اسفنجی)	۱۳	
Graphite fib.	گرافیت	۱۴	Portland cement paste	خمیر سیمان پرتلند	۱۰	Blast furnace slag	سرباره کوره بلند آهن‌گدازی	۱۴	

قطران یا تار به موادی گفته می‌شود که معمولاً صمغ‌مانند، قهوه‌ای یا سیاه و چسبناک هستند و ترکیب‌های آلی حاصل از مواد مختلفی مانند زغال‌سنگ (قطران)^۱ زغال‌سنگ، چوب (قطران چوب)، نفت خام یا تورب هستند.

20	بتن با سرامیک خرد شده	Crushed ceramic concrete	این بتن حاوی قطعات خرد شده سرامیکی (بازیافتی) است. به علت دفن زباله‌های ساختمانی به این نوع بتن سبز یا دوستدار محیط زیست می‌گویند. خرده‌های سرامیک معمولاً دارای جذب آب زیادی هستند و به علت تیز گوشه بودن کارایی بتن را کاهش می‌دهند.
21	بتن پیش‌تنیده شیمیایی	Chemically-prestressed concrete	پیش‌تنیدگی روشی است برای مقاوم‌سازی بتن یا مواد دیگر که معمولاً توسط رشته‌های فولادی با مقاومت بالا و یا میلگردها انجام می‌شود. در واقع نیروی فشاری مورد نیاز در بتن پیش‌تنیده توسط کشش در فولاد با مقاومت بالا تولید می‌گردد. در بتن مذکور پیش‌تنیدگی به کمک مواد شیمیایی انجام می‌شود.
22	بتن مناسب برای هوای سرد	Cold weather concrete	چنانچه هوا سرد و دمای بتن کم شود، سرعت واکنش سیمان با آب کند می‌گردد و زمان گیرش طولانی می‌شود و در نتیجه مقاومت چندانی در ساعات و روزهای اولیه حاصل نمی‌گردد. لذا بتن هوای سرد با کمک تغییراتی در طرح مخلوط و مواد افزودنی (روان‌ساز و زودگیرکننده) تهیه می‌شود [۱ و ۲۸].
23	بتن کلئیدی	Colloidal concrete	در مایع اولیه یا مرحله خمیری این بتن، چگالی و چسبندگی زیادی از خود نشان می‌دهد. این قوام سخت و چسبندگی اجازه می‌دهد تا یک دوره کاری طولانی‌تر برای مخلوط به طور موثر در محل ایجاد شود. به لطف قوام، چسبناکی و چسبندگی بتن کلئیدی، در برابر فرسایش و شستشو از جریان آب بسیار مقاوم است. لذا این بتن عمدتاً به عنوان ماده محافظ ساحلی (معرض جریان آب) و در امتداد آبراه‌ها استفاده می‌شود. این بتن به همان اندازه برای کف ساخت و سازهای زیر آب و پایه‌ها مناسب است. دو نوع بتن کلئیدی وجود دارد: ۱- بتن با ساختار بسته که به هیچ وجه اجازه نفوذ آب را نمی‌دهد، ۲- نوع باز که اجازه نفوذ آب را می‌دهد و مخصوص محافظت بانکی طراحی شده است.
24	بتن رنگی	Colored concrete	بتنی است که با استفاده از سیمان رنگی یا سفید و مصالح رنگی و یا مصرف رنگدانه‌های طبیعی معدنی تولید می‌شود. معمولاً باید سطحی با مقاومت بالا در برابر سایش داشته که برای مکان‌های که رفت و آمد زیاد است و وسایل سنگین جابجا می‌شود، مناسب باشد.
25	بتن پارچه‌ای	Concrete Canvas	یک پارچه آغشته به بتن قابل انعطاف است که با یک بار هیدراته نمودن، سخت می‌شود تا لایه بتن مقاوم و ضدآب ایجاد نماید. این بتن برای کنترل فرسایش در اثر هوا، آسیب حیوانات، جلوگیری از رشد گیاهان در زمین یا سیل‌بندهایی رسی، پتروشیمی، کانال‌های زهکشی استفاده می‌شود.
26	تراورس بتنی	Concrete sleeper	نوعی قطعات بتنی است که برای استفاده در خطوط راه‌آهن و در زیر ریل و روی بالاست استفاده می‌گردد تا بار قطار بر روی بالاست توزیع گردد.
27	بتن ناتراوا بدون تراوش	Concrete without leakage	بتنی است که در طراحی مخلوط آن به کمک آرایش دقیق سنگدانه‌ها، کاهش نسبت w/c ، مصرف مواد عایق‌کننده (واتر پروف) تولید بتنی ناتراوا می‌نماید. این بتن مورد مصرف در مخازن آب که نیاز به عایق بودن است و موارد مشابه می‌باشد.
28	بتن محصور	Confined concrete	نوعی بتن است که برای استفاده در مقاطع بسته و محبوس تولید می‌شود. استفاده از بتن در لوله فولادی نیز نوعی تکنولوژی برای اجرای راحت سازه‌ها می‌باشد.
29	بتن سیمان-چوب پنبه‌ای	Cork-cement Concrete	این بتن به کمک سیمان و چوب‌پنبه ساخته می‌شود. چگالی چوب پنبه حدود ۳۰۰ و این بتن حدود ۱۵۰۰-۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. استحکام چندانی ندارد، (مقاومت فشاری ۲۶-۱ مگاپاسکال و خمشی ۴-۰/۵ مگاپاسکال) و لیکن به علت چگالی پائین و جاذب مناسب مصارف خاصی دارد.

30	بتن با آجر خرد شده	Crushed brick concrete	آجر با مقاومت فشاری پایین (حدود ۳/۰-۱/۵ مگاپاسکال)، وزن مخصوص پایین (حدود ۱/۵-۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب) و جذب آب بالا به عنوان سنگدانه بتن می تواند مشخصات ویژه ای ایجاد نماید. از محاسن این بتن دوستدار محیط زیست (به علت دفع ضایعات بنایی) و چگالی پایین آن می باشد.
31	بتن با خرده شیشه	Crushed glass concrete	این بتن حاوی قطعات خرد شده شیشه (رنگی) است. به علت دفن این مواد به این نوع بتن سبز یا دوستدار محیط زیست می گویند. به علت تیز گوشه بودن شیشه ها، این قطعات کارایی بتن را کاهش می دهند.
32	بتن قلوه سنگی	Cyclopean concrete	این بتن غالبا در سدها و بندهای خاکی که سنگدانه مناسب در دسترس نیست، مورد استفاده می باشد.
33	بتن تزئینی	Decorative Concrete	نوعی بتن است که ضمن تقویت مشخصات مکانیکی، مورد استفاده در اشیاء تزئینی می باشد.
34	بتن توپر	Dense concrete	دانه بندی سنگدانه های این بتن به گونه ای است که بافت (یا استخوان بندی) بتن توپر و چگالی بالا باشد. این بتن در صنایع پزشکی، هسته ای و نظامی کاربرد دارد.
35	بتن آماده خشک (بسته بندی)	Dry packed concrete	این بتن برای مصارف خاصی همچون زیرسازی کفپوش ها، سرامیک کاری و غیره است.
36	بتن آسان تراکم	Easy Compacted Concrete (ECC)	این بتن کاربرد گسترده ای در صنعت عمران دارد. بتن ECC دارای روانی مناسبی است که سهولت در بتن ریزی، پرداخت کاری، تراکم، پمپ پذیری و غیره را دارد. این بتن از نظر روانی بین بتن های با اسلامپ زیاد و خودتراکم قرار دارد.

(ادامه دارد ...)

در جدول ۵ انواع بتن های شناخته شده گردآوری شده اند.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله چهار دسته اعضای اصلی بتن‌ها شامل سنگدانه‌ها، چسباننده‌ها، افزودنی‌ها و الیاف به چهار نوع مصنوعی آلی، مصنوعی غیرآلی، طبیعی آلی و طبیعی غیرآلی تقسیم شد که با ترکیب آنها، انواع مختلفی از بتن‌ها حاصل می‌شود. همچنین از نظر وزن مخصوص، نحوه اجرا، طراحی و کاربرد انواع مختلفی از بتن‌ها معرفی شدند.

۵- تشکر

جهت تهیه عکس‌های این مقاله، از منابع بسیار متعددی استفاده شده است که امکان تهیه لیست آنها نبود. بدین وسیله از کلیه کسانی که از عکس آنها در این مقاله بهره گرفته شده است، پوزش خواسته و کمال تشکر را داریم.

۶- مراجع

- [۱] آئین نامه بتن ایران (آبا) ۱۴۰۰- ص ۱۵۸.
- [۲] تدین، ع. گلبهاری، ا. احمدی، ز. (۱۳۹۴). "هندبوک سیمان‌های جدید و خاص". انتشارات ناقوس
- [۳] ماهنامه بازار ساختمان و تاسیسات- سال ۱۳۹۸- شماره ۱۱۰
- [۴] نشریه ۷۰۷ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی سال ۱۳۹۳
- [۵] آیین نامه بتن ایران.
- [۶] استاندارد ملی ایران شماره ۳۵۱۶- "ویژگی‌های سیمان پرتلند بنایی" (۱۳۷۳)
- [۷] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. "نشریه ۹۵۱، راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راهپای - کشور" (۱۳۹۲)
- [۸] استاندارد ملی ایران شماره ۳۵۱۷- "ویژگی‌های سیمان پرتلند سرباره‌ای" (۱۳۷۳)
- [9] www.homequicks.com
- [10] www.clinickbeton.com
- [11] www.drbecon.ir
- [12] www.khanebeton.com
- [13] www.betonpasargad.com
- [14] www.wikipedia.com
- [15] www.ASTM.org
- [16] www.barsadic.com
- [17] www.irbeton.ir
- [18] www.sciencedaily.com
- [19] www.jupiterdesign.ir
- [20] ACI523 4R (June 2009) "Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels"
- [21] ASTM D3141 / D3141M – 2015. "Standard Specification for Asphalt for Undersealing Portland-Cement Concrete Pavements".
- [22] ASTM C1693-11(2017) "Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC)".
- [23] ACI523.4R-2009 "Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels"
- [24] ACI303R-2012 "Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete Practice".
- [25] ACI303.1-1997 "Standard Specification for Cast-in-Place Architectural Concrete".
- [26] ACI 523.3R-14 "Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft3 (800 kg/m3)".
- [27] ASTM C 869 – 91 (Reapproved 1999). "Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete".
- [28] ACI 306R-2016: "Guide to Cold Weather Concreting".

بررسی اثرات محیط‌زیستی بتن و روش‌های کنترل آن‌ها

(با تأکید بر استفاده از منابع آب خاکستری به‌عنوان آب نامتعارف در صنعت بتن)



سارا نظیف
دانشیار دانشکده مهندسی عمران،
پردیس دانشکده‌های فنی،
دانشگاه تهران



علی دوستی
عضو هیئت‌علمی مرکز تحقیقات راه،
مسکن و شهرسازی
عضو حقیقه، انجمن بتن ایران



محمد شکرچی زاده
استاد دانشکده مهندسی عمران،
پردیس دانشکده‌های فنی،
دانشگاه تهران
رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران



محمدعلی معلّی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی
عمران، دانشگاه تهران
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

افزایش جمعیت جهان و به دنبال آن گسترش ساخت‌وسازها از یک‌طرف و از طرفی دیگر محدودیت‌های منابع و اثرات محیط - زیستی طرح‌های توسعه سبب شده است تا پژوهشگران و ذی‌نفعان صنعت ساخت در کنار دوستداران محیط‌زیست به فکر راهکارهایی در جهت بهبود فرایند ساخت و استفاده از بتن باشند. امروزه بتن به دلیل هزینه کم، آسانی دسترسی به اجزاء تشکیل‌دهنده، شکل‌پذیری و دوام نسبتاً بالا، به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته می‌شود. یکی از بخش‌های اصلی تشکیل‌دهنده بتن آب است که در عمل‌آوری، ساخت بتن و شستشوی سنگ‌دانه‌ها و مخلوط‌کن‌های بتنی از آن بهره برده می‌شود. برای ساخت هر مترمکعب بتن در حدود ۱۵۰ لیتر آب موردنیاز است. از سویی دیگر، اکثر استانداردهای جهان مشخصات آب اختلاط بتن را محدود کرده‌اند که باید عاری از هرگونه ماده زیان‌آور و در حد کیفیت آب آشامیدنی باشد. این در حالی است که استفاده فعلی از آب شرب برای تهیه بتن باعث تحمیل تنش بیش‌ازحد به منابع آب و محیط‌زیست شده است. باتوجه‌به دلایل فوق، در صنعت بتن که یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های منابع آب است، ضروری است مصرف آب مدیریت و بازنگری شده و تأمل بیشتری در آن صورت گیرد. هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از منابع آب غیرمتعارف (پساب‌ها) ازجمله آب خاکستری در صنعت بتن می‌باشد. آب خاکستری آب خروجی از آشپزخانه، ظرف‌شویی، روشویی، حمام و ماشین لباسشویی است که به‌عنوان یک‌شکل رقیق از فاضلاب، به‌طور متوسط حدود ۷۰ درصد فاضلاب خانگی را شامل می‌شود و باتوجه‌به داشتن مواد معدنی بالا و غلظت پایین‌تر آلاینده‌های بیولوژیکی و پاتوژن‌ها (باکتری‌های بیماری‌زا) نسبت به فاضلاب سیاه، کیفیت آن نیز عموماً بهتر است. استفاده مجدد از آب خاکستری در صنعت بتن می‌تواند موجب کاهش مصرف و ذخیره‌سازی منابع آب، کاهش هزینه‌های تصفیه فاضلاب (به‌موجب کاهش دبی ورودی به شبکه فاضلاب شهر) و درنتیجه حفظ محیط‌زیست در راستای توسعه پایدار صنعت بتن شود.

کلمات کلیدی: بتن سازگار با محیط‌زیست، پساب، آب خاکستری، توسعه پایدار

ازجمله ایران، بتن می‌باشد. بعد از آب، بتن پرمصرف‌ترین

مصالح ساختمانی به‌شمار می‌رود؛ ازاین‌رو بتن دارای

۱. مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح به‌منظور

احداث سازه‌های زیربنایی در کشورهای در حال توسعه

پتانسیل انجام فعالیت‌های تحقیقاتی به‌منظور افزایش سازگاری با محیط‌زیست است [۱].

تحول عظیمی در صنعت سیمان و بتن در راستای تصمیمات جهانی در کاهش آلودگی محیط‌زیستی به‌ویژه کاهش تولید کربن دی‌اکسید و قدم برداشتن در راستای توسعه پایدار، می‌بایستی صورت پذیرد. در حقیقت بایستی هم‌زمان با توسعه صنعت بتن، اثرات محیط‌زیستی آن مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای کاهش این اثرات به‌صورت کاربردی ارائه شود. با توجه به مفهوم توسعه پایدار در برآوردن احتیاجات امروز بدون فداکردن حقوق نسل‌های آینده، لازم است توسعه همراه با حفظ اصول محیط‌زیست و بهره‌برداری اصولی از منابع باشد تا علاوه بر بهتر شدن زندگی نسل فعلی، مخاطرات نسل‌های آینده نیز به حداقل برسد.

ازجمله فعالیت‌هایی که توسط آن‌ها می‌توان توسعه پایدار در صنعت بتن و سازگاری این صنعت با محیط‌زیست را محقق کرد به مواردی نظیر استفاده از سیمان‌هایی با مصرف انرژی و اثرات محیط‌زیستی کمتر، کاهش مصرف سیمان با استفاده از مواد جایگزین نظیر سرباره‌ها، خاکسترها و پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، استفاده از مواد بازیافتی نظیر لاستیک مستعمل، خاکستر لجن، سنگ‌دانه‌های بازیافتی و صرفه‌جویی در آب موردنیاز این صنعت، می‌توان اشاره کرد؛ که این راهکارها منجر به تولید بتن سبز سازگار با محیط‌زیست با مشخصات بهینه خواهد شد [۱]. در این مطالعه ابتدا روش‌های کاهش اثرات نامطلوب محیط‌زیستی بتن به صورت مشروح بازگو می‌شوند و پس از آن، راهکار مدیریت و کاهش مصرف آب آشامیدنی در صنعت بتن موردتوجه قرار می‌گیرد. در ادامه آب خاکستری به عنوان منبع آب پایدار و قابل‌دسترس برای تولید بتن، معرفی شده و با توجه به مزایا، معایب،

کیفیت و الزامات آیین‌نامه‌ای استفاده از آب خاکستری در بتن، مطالعات پیشین ارائه می‌گردد.

۲. روش‌های کاهش اثرات محیط‌زیستی بتن

راه‌های اساسی به‌منظور کاهش آثار نامطلوب محیط‌زیستی صنعت بتن به شرح ذیل است:

* بهبود کارایی انرژی در صنعت سیمان و استفاده از مواد زائد به‌عنوان جانشینی برای سوخت‌های فسیلی متداول: سوخت‌های اصلی در کوره‌های سیمان شامل زغال‌سنگ، سوخت‌های نفتی، گاز طبیعی و کک نفت هستند، سوخت‌های ثانویه در کوره‌های سیمان شامل لاستیک، ضایعات زباله‌ای جامد و سوخت‌های زیستی مانند ضایعات غذا، لجن فاضلاب شهری، چربی و گوشت حیوانات هستند؛ که استفاده از این سوخت‌ها اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به سوخت‌های اولیه یا اصطلاحاً سوخت‌های فسیلی دارند [۲].

* استفاده از مواد جایگزین سیمان: امروزه مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس (میکروسیلیس)، خاکستر پوسته برنج، سرباره کوره آهن‌گدازی، رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک که می‌توانند به‌عنوان جایگزین سیمان مورد مصرف قرار گیرند [۳].

* صرفه‌جویی مصالح سنگی: با توجه به محدودیت‌های سنگدانه و برداشت آن در طبیعت و مسائل محیط‌زیستی، کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی از بتن‌های تخریبی، چند سالیست که در برخی کشورهای جهان نظیر ژاپن و هلند رایج گشته است [۳]. با استفاده از نخاله‌های ساختمانی به‌عنوان مصالح درشت‌دانه در بتن، بهره‌وری از مصالح را می‌توان بهبود بخشید. در بسیاری از نقاط جهان نیز ماسه‌های لایروبی و نخاله‌های معدنی به عنوان مصالح ریزدانه در بتن قابل استفاده هستند.

* پایایی و دوام بتن: طبق تعریف^۱ ACI دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش بتن و یا هر فرایندی که به آسیب دیدگی می انجامد، گفته می شود [۴]. در سال های اخیر و با بررسی دوام سازه های بتنی مسلح به ویژه در مناطق خورنده، نظر اکثر کارشناسان و متصدیان کارهای بتنی به این مسئله جلب شده است که مقاومت بتن به تنهایی نمی تواند جوابگوی خواص مربوط به دوام بتن باشد و لازم است در طراحی بتن برای مناطق مختلف علاوه بر مسئله مقاومت و تحمل بارها در طول مدت بهره برداری، پایایی و دوام آن نیز مدنظر قرار گیرد.

* استفاده از بتن های خاص (طراحی بر اساس عملکرد): استفاده از بتن هایی نظیر بتن های توانمند و فوق توانمند، بتن خودتراکم، بتن با کربن دی اکسید منفی، نانو بتن ها و بتن ژئوپلیمری که هر یک با توجه به عملکرد خاص خود، سبب کاهش اثرات محیط زیستی بتن می شوند.

* صرفه جویی آب: تاکنون آب شیرین تقریباً همه جا به وفور در دسترس بوده و برای تمام مقاصد در صنعت بتن مورد استفاده قرار گرفته است. استانداردهای اجرای ساختمان نیز، استفاده از آب قابل شرب را برای ساخت، عمل آوری و شستشوی سنگدانه ها و مخلوط کن های بتنی توصیه می کرده اند، ولی امروزه این شرایط تغییر کرده است به طوری که آب شیرین با کیفیت روز به روز کمیاب تر می شود. در صنعت بتن نیز که یکی از بزرگ ترین مصرف کننده های آب است، ضروری است مصرف آب را با بهره وری و مدیریت بهتری همراه شود. علاوه بر مصرف مستقیم حدود ۱۵۰ لیتر آب برای هر مترمکعب تولید بتن، مقدار آب زیادی هم به صورت غیرمستقیم در طول روند تولید بتن مصرف

می شود [۵]، [۲]، [۱]. هم چنین سؤالی که مطرح است این است که چرا باید در ساخت بتن از آب تصفیه شده شهری و قابل شرب استفاده کرد؟ تحقیقاتی که در کشورهای مختلف انجام شده است نشان می دهد استفاده از آب ناشی از تصفیه فاضلاب ها می تواند تحت شرایطی به عنوان آب اختلاط و عمل آوری در صنعت بتن مورد استفاده قرار گیرد [۶].

۳. منابع آب مورد استفاده در بتن

افزایش جمعیت جهان و گسترش شهرنشینی و ساخت و ساز از یک طرف و از طرفی دیگر محدودیت های منابع و اثرات محیط زیستی سبب شده است تا محققان به فکر راهکاری در جهت بهبود فرایند ساخت و استفاده از بتن باشند. امروزه بتن به عنوان پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته می شود. هزینه کم، آسانی دسترسی به اجزاء تشکیل دهنده، شکل پذیری و دوام نسبتاً بالای این مخلوط، باعث توجه روزافزون به آن شده است [۲]. یکی از بخش های اصلی تشکیل دهنده بتن آب است. در صنعت بتن برای عمل آوری، ساخت بتن و شستشوی سنگدانه ها و مخلوط کن های بتن از آب بهره می برند. برای ساخت هر مترمکعب بتن در حدود ۱۵۰ لیتر آب مورد نیاز است [۱]. از طرف دیگر، اکثر استانداردهای جهان مشخصات آب اختلاط را محدود کرده اند که باید عاری از هرگونه ماده زیان آور باشد. این درحالی است که استفاده فعلی از آب شرب برای تهیه بتن باعث تحمیل تنش بیش از حد به منابع آب و محیط زیست شده است [۳]. به همین دلیل در صنعت بتن که یکی از بزرگ ترین مصرف کننده های آب است، ضروری است مصرف آب بازنگری شده و تأمل بیشتری در آن صورت گیرد [۹]. مصارف بهداشتی، کشاورزی و صنعت که اولویت اصلی استفاده از آب شرب هستند، در کنار افزایش آلودگی آب ها و کمبود منابع آب باکیفیت، استفاده

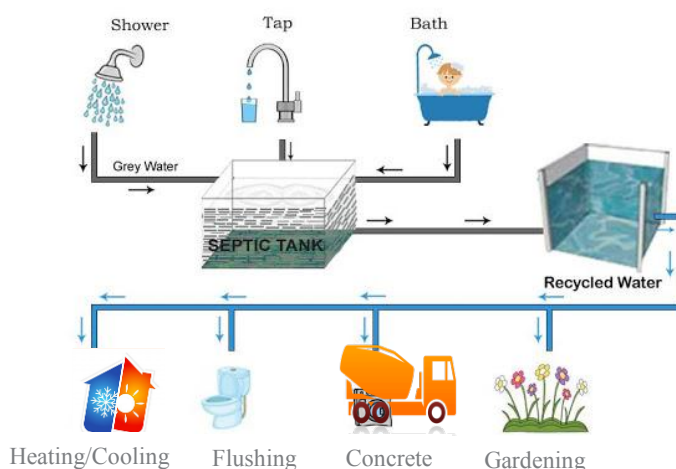
¹ American Concrete Institute

از پساب‌ها (منابع آب غیرکارآمد) را در صنعت بتن توجیه می‌کند. پساب‌های تصفیه‌شده شهری (هم‌چون آب خاکستری)، فاضلاب‌های صنعتی و یا حتی آب‌های لب‌شور نیز می‌توانند برای ساخت بتن مناسب باشند با این شرط که بایستی جهت تأثیر آن‌ها بر خصوصیات بتن، آزمایش‌های مربوطه را انجام داد [۱].

۴. آب خاکستری

آب خاکستری، آب خروجی از آشپزخانه، ظرف‌شویی، روشویی، حمام و ماشین لباسشویی است که به‌طور کلی کیفیت آن بالاتر از فاضلاب سیاه است و برای مصارف مختلفی هم‌چون آبیاری، گرمایش و سرمایش و سیستم فلاش‌تانک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۱) [۱۰]. کمیت و کیفیت آب خاکستری به عوامل زیادی از جمله استانداردهای زندگی، ساختار جمعیت (سن و جنس)، رسوم و عادات، تأسیسات توزیع آب و فاضلاب، میزان فراوانی آب و نوع و مقدار ماده شیمیایی مورد استفاده وابسته است [۱۱]. جداسازی آب سیاه از آب‌های خاکستری و استفاده مجدد از آن‌ها در دهه‌های گذشته محبوبیت زیادی کسب کرده است. مزایای استفاده مجدد از آب خاکستری گسترده است، از مزایای مستقیم برای کاربر تا مزایای بزرگ برای کل منابع آب؛ با این حال در کنار مزایا، استفاده

مجدد از این منبع آب نامتعارف ممکن است خطرات و چالش‌هایی را به لحاظ بهداشتی به وجود آورد. این چالش‌ها عموماً از نظر وجود میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا و خطرات وجود آلاینده‌های مختلف مانند مواد جامد، pH و مواد شوینده اهمیت دارند. موفقیت در طرح‌های استفاده مجدد از آب خاکستری نیز به عوامل بسیاری از جمله ظرفیت فنی و اقتصادی و همچنین عوامل اجتماعی مانند آگاهی و پذیرش عمومی مردم بستگی دارد. عامل اصلی برای استفاده مجدد و بی‌خطر از این منابع، ارتباط پیوسته میان کلیه ذی‌نفعان، مهندسين، سياست‌گذاران، متخصصان بخش آب و کاربران نهایی آن است [۱۲]. آب خاکستری به‌عنوان یک شکل رقیق از فاضلاب، به‌طور متوسط ۶۷ درصد فاضلاب خانگی را شامل می‌شود [۱۳] که با توجه به داشتن بارهای معدنی بالا، مواد مغذی کم، آلودگی باکتری‌های بیماری‌زای پایین نسبت به فاضلاب سیاه، کیفیت آن نیز بالاتر است. استفاده مجدد از آب خاکستری در صنعت بتن می‌تواند موجب کاهش مصرف و ذخیره‌سازی منابع آب، کاهش هزینه‌های تصفیه فاضلاب (به‌موجب کاهش دبی ورودی به شبکه فاضلاب شهر) و در نتیجه سبب حفظ محیط‌زیست شود [۱۳]، [۱۰].



شکل ۱- مصارف مختلف بازایابی آب خاکستری (بر گرفته از www.zandxmechanicalinstallations.com/)

۵. مزایا و معایب استفاده مجدد از آب خاکستری در

صنعت بتن

مهم‌ترین مزایای استفاده از آب خاکستری در صنعت بتن را

به شرح زیر می‌توان معرفی کرد [۱۴]:

- استفاده کمتر از آب تصفیه‌شده در صنعت بتن
- کاهش فشار به سیستم‌های تصفیه فاضلاب
- امکان برداشت و تصفیه آب در محل تولید بتن
- دسترسی به منبع آب پایدار و قابل اعتماد
- نصب آسان سیستم جمع‌آوری آب خاکستری در محل تولید بتن

- کاهش آلودگی منابع خاکی و محیط‌زیست به دلیل دفع کمتر فاضلاب

با وجود مزایای غیرقابل انکار آب خاکستری، استفاده از آب خاکستری خطراتی را به دنبال دارد که استفاده مجدد از این منبع آبی را محدود می‌سازد [۱۴]:

- تحمیل هزینه اولیه لوله‌کشی، ایجاد تأسیسات جمع‌آوری آب خاکستری و یا انتقال آب خاکستری از محل تولید به محل مصرف (محل تولید بتن)

- نبود الزامات قانونی و آیین‌نامه‌ای برای استفاده مجدد از آب خاکستری (به‌ویژه در صنعت بتن)

- کیفیت متنوع آب خاکستری با توجه به منبع تولید آن و اثرگذاری روی کیفیت بتن

- تعیین طرح اختلاط بهینه از نظر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان

- محدودیت‌های زمانی و هزینه‌ای در مورد آزمایش‌های

دوام بتن

- محدودیت ذخیره‌سازی آب خاکستری به دلیل مشکلات

محیط‌زیستی مانند بد بو شدن آن و عوامل بیماری‌زا

مروری بر سوابق استفاده از پساب‌های مختلف در صنعت بتن

فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به‌عنوان منابع بازیافت آب تعریف می‌شوند که می‌توانند بدون تصفیه و یا پس از آن، برحسب کیفیت در کاربری‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرند. این منابع آب می‌تواند در مصارف کشاورزی، تغذیه آب‌های زیرزمینی، آبیاری فضای سبز، کاربری‌های تفریحی، شرب، شیلات و محیط‌زیست و نیز مصارف صنعتی از جمله صنعت بتن کاربرد داشته باشند [۱۵].

پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر کیفیت آب در بتن، شاخص‌های مرتبط با کارایی، مقاومت و دوام بتن هستند. بر اساس استاندارد ASTM-C109^۱ و استانداردهای آمریکا (ACI) و انگلستان (BS)^۲ در صورتی که کاهش مقاومت بتن تهیه‌شده از پساب کمتر از ۱۰ درصد مقاومت بتن تهیه‌شده از آب آشامیدنی باشد، پساب مورد استفاده برای اختلاط بتن قابل قبول است [۱۶]. توصیه سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) برای کیفیت آب بتن و کیفیت حدودی آب خاکستری در منابع مختلف نیز در جدول ۱ آمده است.

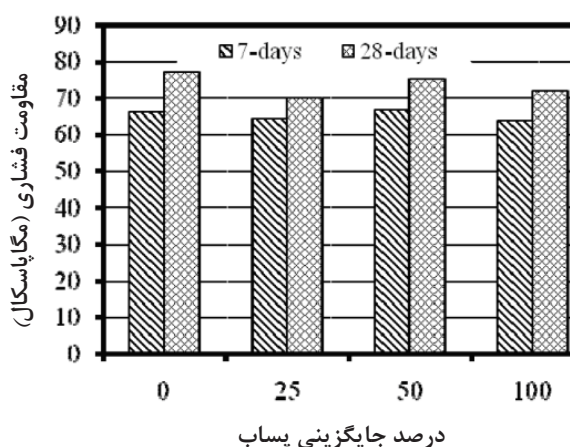
^۱ American Society for Testing and Materials

^۲ British Standards

جدول ۱- مقایسه کیفیت آب خاکستری و مشخصات پیشنهادی EPA برای آب مورد استفاده در بتن [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]

E. coli	TSS	TDS	COD	Cl	SO ₄	pH	واحد
MPN/100ml	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-	
۲۰۰۰۰~	۷۶۰-۲۲	۱۰۰۰~	۵۲۰-۱۸۰	۲۵۰~	۲۰۰-۱۰	۶/۸-۷	کیفیت آب خاکستری
۲۰۰<	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۸-۶	توصیه EPA برای کیفیت آب مورد استفاده در بتن

از جهت پتانسیل خوردگی و حمله سولفاتی در سازه‌های بتن مسلح شد [۲۱]. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، جایگزینی ۵۰ درصد پساب با آب آشامیدنی، از نظر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه بتن، می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد.



شکل ۲- مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه ساخته شده با پساب [۲۱]

شکرچی‌زاده و همکاران^۴ سه نوع پساب خروجی از تصفیه‌خانه (پس از تصفیه اولیه، ثانویه و نهایی) را مورد بررسی قرار داده و آزمایش‌های دوام (جذب آب و مقاومت الکتریکی) را روی ملات، خمیر سیمان و نمونه‌های بتنی انجام دادند. نتایج حاصل حاکی از آن بود که زمان گیرش خمیر سیمان و مقاومت فشاری ملات سیمان و نمونه‌های بتن در هر سه نوع پساب راضی‌کننده است و همچنین مغایرتی برای اسلامپ و درصد فضای خالی نسبت به

در مطالعات گذشته کیفیت پساب‌ها با الزاماتی که برای آب مصرفی در صنعت ساخت‌وساز توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده، مقایسه شده‌اند؛ به‌عنوان نمونه بابو و همکاران^۱، pH، قلیائیت، مواد جامد کل (شامل مواد جامد آلی و مواد جامد معدنی)، ترکیبات سولفاته و ترکیبات کلریدی در آب اختلاط بتن را مورد ارزیابی قرار دادند و محدودیت‌های هر یک از این پارامترها را مشخص کردند. بر اساس این مطالعه، محدوده pH ایده‌آل برای آب اختلاط بتن در حدود ۷/۲ تا ۷/۶ است [۲۰].

الجبری و همکاران^۲ نمونه‌های فاضلاب از سه ایستگاه کارواش در مسقط عمان را جمع‌آوری کردند. این نمونه‌های فاضلاب جمع‌آوری شده با هم مخلوط شدند و تجزیه و تحلیل شیمیایی از نظر pH، مواد جامد کل محلول (TDS^۳)، کلراید، سختی، قلیائیت و سولفات‌ها بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بتنی با آب اختلاط تهیه شده، نشان داد که اگرچه ترکیبات موجود در فاضلاب بسیار بالاتر از مقادیر موجود در آب شیرین بود اما الزامات مطرح شده در استاندارد ASTM برای مقاومت فشاری و گیرش بتن در حالت‌های مختلف جایگزینی پساب رعایت شد (شکل ۲). همچنین جذب آب بتن در هنگام استفاده از فاضلاب تغییر چندانی نداشت اما غلظت بالای برخی مواد موجب نگرانی در مورد کیفیت بتن

¹ Babu et al.

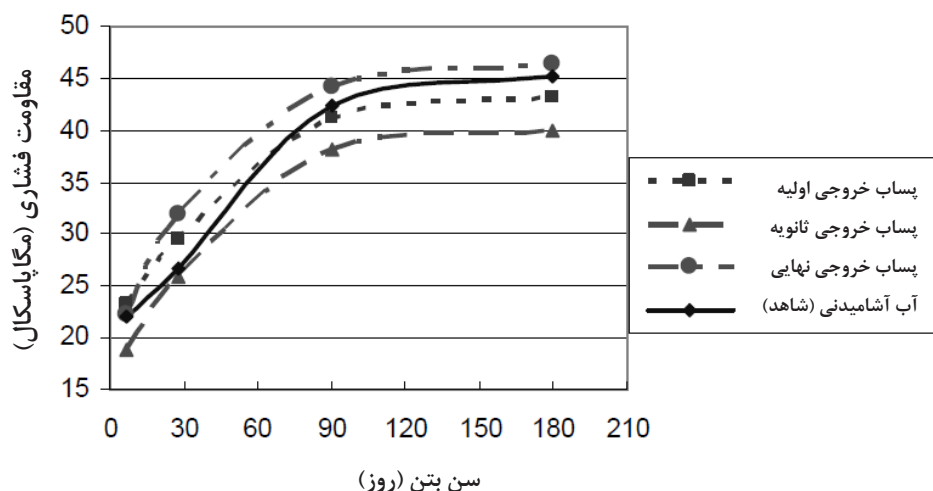
² Al-Jabri et al.

³ Total Dissolved Solids

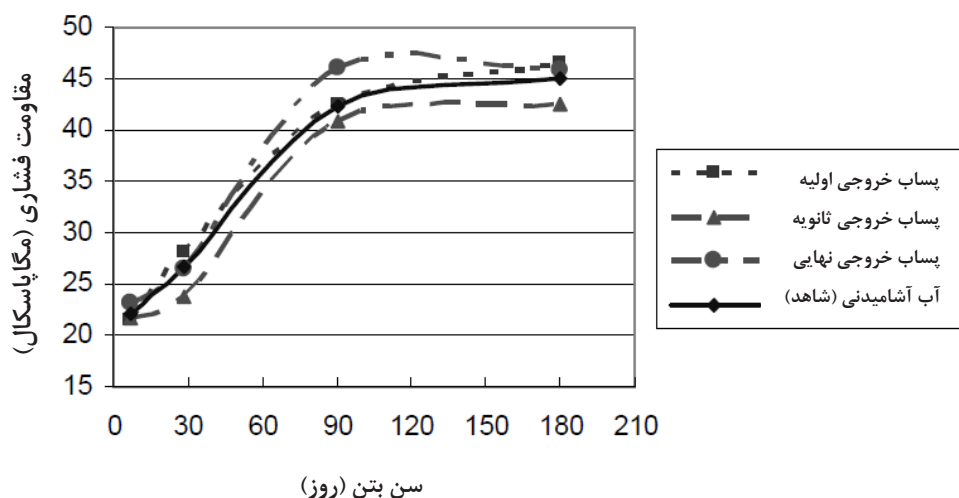
⁴ Shekarchi et al.

شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری زمانی که از پساب تصفیه شده نهایی استفاده می‌شود، بیشترین مقدار را دارد. اگر چه سایر مقاومت فشاری‌های بدست آمده نیز الزامات ACI برای استفاده پساب در بتن را ارضا می‌کنند.

آیین‌نامه ASTM ایجاد نشده است. هم‌چنین جذب آب و مقاومت الکتریکی هم به‌عنوان پارامترهای دوام اجازه استفاده از پساب به‌عنوان آب عمل‌آوری و آب اختلاط را می‌دانند [۸]. در شکل ۳ و ۴ مقاومت فشاری بتن ساخته شده با پساب و عمل‌آوری شده با پساب، نشان داده



شکل ۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با پساب‌های مختلف در طول زمان [۸]



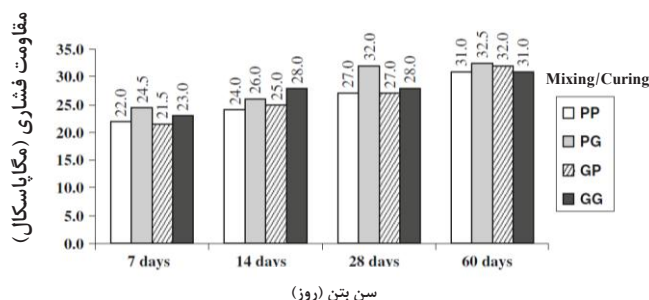
شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با آب آشامیدنی و عمل‌آوری با پساب‌های مختلف در طول زمان [۸]

گرفت. نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های مختلف بتن مشابه بود و نشان از مناسب بودن استفاده از آب خاکستری در بتن می‌داد [۷].

الرعداوی و آنگلکار^۱ به مقایسه نمونه‌های بتن ساخته‌شده با استفاده از آب خاکستری و آب زیرزمینی، بر اساس خواص دوام و مکانیکی نمونه‌ها پرداختند. برای این هدف، آزمون‌هایی مانند مقاومت فشاری و مقاومت خمشی صورت

¹ Alradhawi and Angalekar

عمل‌آوری، بیشترین مقدار مقاومت فشاری را در طول زمان نتیجه خواهد داد.



شکل ۵- مقاومت فشاری بتن ساخته شده و عمل‌آوری شده با آب‌های مختلف و در زمان‌های مختلف [۲۴]

در مطالعه‌ای دیگر، عبدالرزاق و بابو^۳ نتیجه‌گیری کردند که کارایی بتن مسلح با استفاده از آب خاکستری تصفیه‌شده کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین آن‌ها بیان کردند که استفاده از آب خاکستری برای بتن غیرسازه‌ای مناسب است، زیرا در بتن مسلح ممکن است به علت ناخالصی‌های آلی و غیرآلی موجود در فاضلاب، خوردگی میلگرد رخ دهد [۲۵]. نتایج بدست آمده از این تحقیق، برای مقاومت فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با آب‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. با توجه این نتایج، بتن ساخته شده با آب آشامیدنی، بیشترین مقاومت فشاری را داراست ولی این مقاومت فشاری کاهش محسوسی به هنگام استفاده از آب خاکستری ندارد.

جدول ۲- مقاومت فشاری بتن ساخته شده با پساب‌های مختلف در طول

زمان [۲۵]

مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۱۴ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)
۲۴.۵	۳۱.۲	۳۲.۶	بتن با آب آشامیدنی
۲۱.۳	۳۰.۳	۳۱.۴	بتن با آب خاکستری پس از تصفیه اولیه
۲۳.۶	۳۰.۸	۳۱.۶	بتن با آب خاکستری پس از تصفیه ثانویه

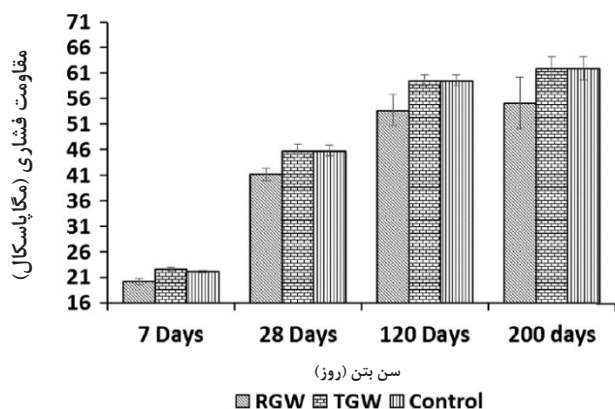
پچه و همکاران^۱، انواع آب خاکستری را که با مشخصات ذکرشده در آیین‌نامه‌های مختلف مطابقت دارند، در بتن استفاده کردند و سپس به این نتیجه رسیدند که آب خاکستری زمان گیرش اولیه و نهایی را کاهش می‌دهد اما این کاهش در حدود استاندارد است. هم‌چنین در هنگام استفاده از آب خاکستری افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن مشاهده شد که ممکن است به دلیل قلیائیت بالاتر آب خاکستری نسبت به آب آشامیدنی باشد [۲۲]. در مطالعه دیگری نیز نشان داده شد که سیمان مخلوط شده با آب خاکستری دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سیمان مخلوط شده با آب شرب است؛ که دلیل آن می‌تواند وجود مواد معدنی مختلف در آب خاکستری باشد [۲۳].

الغام و همکاران^۲ نمونه‌های بتنی در دو حالت تازه و سخت شده را تهیه کردند که در آن‌ها متغیر اصلی، نوع آب مورد استفاده برای اختلاط و عمل‌آوری بود؛ به‌طوری‌که چهار حالت مختلف شامل آب شرب (Potable) هم در اختلاط و هم عمل‌آوری، آب خاکستری (Greywater) هم در اختلاط و هم عمل‌آوری، آب شرب در اختلاط و آب خاکستری در عمل‌آوری و آب خاکستری در اختلاط و آب شرب در عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که استفاده از آب خاکستری در مدت زمان گیرش بتن تأثیر ناچیزی دارد، درحالی‌که سایر خواص بتن هم‌چون مقاومت فشاری در حد استاندارد بوده است به شرطی که آب خاکستری با محدودیت‌های اعمال‌شده در استانداردها مطابقت داشته باشد [۲۴]. با توجه به شکل ۵، استفاده از آب شرب برای اختلاط و آب خاکستری برای

¹ Peche et al.

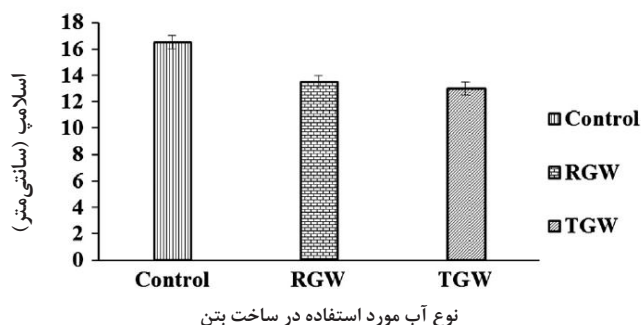
² Alqam et al.

³ Abdul Razak and Babu



شکل ۷- تغییرات مقاومت فشاری خمیر ساخته شده با آب خاکستری تصفیه شده و آب خاکستری تصفیه نشده در طول زمان [۱۸]

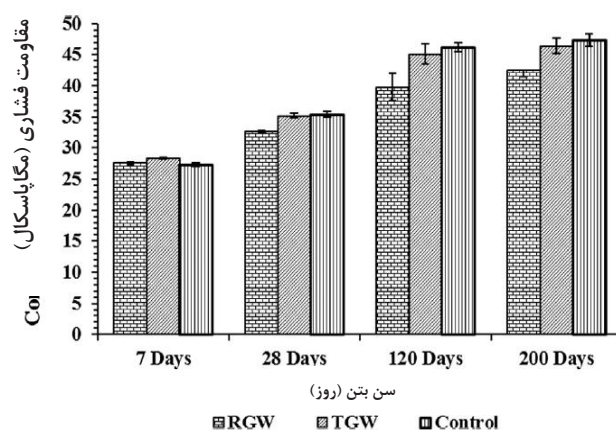
اسلامپ بتن تازه نیز باتوجه به شکل ۸ و به دلیل TDS بالاتر آب خاکستری، در بتن ساخته شده با آب خاکستری تصفیه شده و تصفیه نشده، تقریباً برابر و کمتر از اسلامپ نمونه شاهد با آب شرب می باشد.



شکل ۸- اسلامپ بتن تازه ساخته شده با آب خاکستری تصفیه شده و نشده [۱۸]

به منظور استفاده از پساب، میسمی و همکاران، بلوک های بتنی را با استفاده از پساب خروجی واحدهای ته نشینی ثانویه و تکمیلی تصفیه خانه فاضلاب شهرک غرب تهران تهیه و در ادامه مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه و هم چنین افت اسلامپ آن ها را با بتن تهیه شده از آب شرب مقایسه نمودند. در نهایت مشاهده شد که استفاده از پساب باعث افت مقاومت فشاری در بتن می گردد اما این افت در حد مجاز استاندارد ASTM است. هم چنین افت اسلامپ چشمگیری نسبت به نمونه های شاهد، مشاهده نشده است [۲۶].

قریر و همکاران^۱ آب خاکستری تصفیه شده (TGW)^۲ و آب خاکستری تصفیه نشده (RGW)^۳ را به جای آب شرب در مخلوط های بتنی مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که زمان گیرش اولیه بتن زیاد ولی مقدار اسلامپ آن کم شد. با توجه به شکل ۶، استفاده از آب خاکستری تصفیه شده مقاومت فشاری ۷ روزه بتن را افزایش می دهد در حالی که آب خاکستری تصفیه نشده اثرات منفی اندکی بر مقاومت فشاری بتن (البته در محدوده آیین نامه) دارد که علت آن در این پژوهش وجود میکروارگانیسم ها در آب خاکستری عنوان شده است [۱۸].



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری بتن ساخته شده با آب خاکستری تصفیه شده و نشده در طول زمان [۱۸]

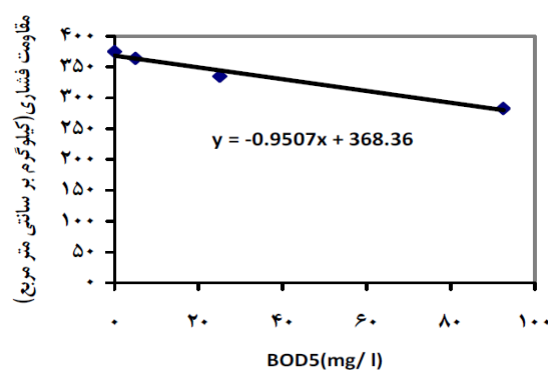
باتوجه به شکل ۷ نیز مقاومت فشاری خمیر سیمان ساخته شده با آب خاکستری تصفیه نشده کاهش اندکی دارد؛ در حالی که مقاومت فشاری خمیر سیمان ساخته شده با آب خاکستری تصفیه شده، تقریباً نتایج یکسانی با آب شرب خواهد داشت.

¹ Ghrair et al.

² Treated Greywater

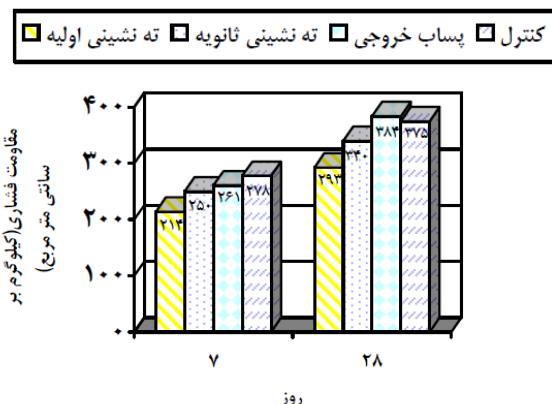
³ Raw Greywater

نمونه‌های سه نوع پساب خروجی از واحد ته‌نشینی اولیه، ثانویه و تصفیه‌شده فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه شهرک قدس تهران، توسط مهرداد و همکاران، برای ساخت بتن جمع‌آوری شد و در آزمایشگاه مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل در شکل ۹، ناخالصی‌های موجود در آب اختلاط بتن مانند BOD^۱، آثار متفاوتی روی زمان گیرش، مقاومت بتن و ظاهر آن می‌گذارد؛ اما در شرایط خاص نگهداری و محیط عمل‌آوری مناسب، امکان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد با آب شرب نیز دور از انتظار نیست [۱۶].



شکل ۹- روند کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با افزایش BOD₅ در آب اختلاط بتن [۱۶]

باتوجه به شکل ۱۰، مقاومت فشاری بتن ساخته شده با پساب خروجی از تصفیه‌خانه، نتایج تقریباً مناسبی نسبت به نمونه کنترل دارد و به‌عنوان جایگزین آب اختلاط بتن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۰- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ساخته شده با آب آشامیدنی و پساب‌های مختلف [۱۶]

ساعدی و همکاران در تحقیقی دیگر، به استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌های تصفیه‌شده به‌عنوان جایگزینی برای آب آشامیدنی در بتن پرداخته‌اند. در نهایت مشخص شد که بتن ساخته شده با آب بازیافتی، بادوام بوده و خواصی مشابه بتن ساخته شده با آب آشامیدنی دارد. هم‌چنین استفاده از پساب جهت عمل‌آوری بتن نه‌تنها باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نمی‌شود بلکه افزایش مقاومت فشاری را نیز به دنبال خواهد داشت [۲۱].

رشنوی و همکاران، امکان‌سنجی استفاده از پساب تصفیه شده قبل از واحد کلرزنی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر خرم‌آباد را به‌عنوان آب اختلاط بتن، آب موردنیاز جهت عمل‌آوری و شستشوی مصالح سنگی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت استفاده از فاضلاب تصفیه شده در ساخت و عمل‌آوری بتن با رعایت ضوابط آیین‌نامه بتن ایران، کاهش محسوسی در مقاومت فشاری نمونه‌ها حاصل نمی‌شود و با عمل‌آوری نمونه‌های بتنی با استفاده از پساب، به میزان زیادی می‌توان در حفظ منابع محدود فعلی آب کوشید بدون آن‌که خللی در کیفیت بتن ایجاد گردد [۲۱].

کابوسی و همکاران، نمونه‌های بتنی بر اساس سه نوع آب اختلاط شامل آب شرب (نمونه شاهد)، آب خاکستری و آب ترکیبی حاصل اختلاط آب شرب و خاکستری به نسبت برابر ساختند و تا سنین ۷ و ۲۸ روزه به کمک همان آبی که بتن با آن ساخته شده بود، نمونه‌ها را عمل‌آوری کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از آب خاکستری و آب ترکیبی نه‌تنها باعث کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه شاهد نمی‌شود، بلکه افزایش آن نسبت به آزمون شاهد (ساخته شده با آب شرب شهری) را به دنبال دارد [۲۱]. با توجه به شکل ۱۱، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ساخته شده با آب ترکیبی (۵۰ درصد آب خاکستری و ۵۰ درصد آب شرب)، حدوداً ۲ برابر مقاومت فشاری نمونه بتن با آب شرب اندازه‌گیری شد.

۶. ریسک‌های احتمالی استفاده از آب خاکستری در صنعت بتن

ریسک استفاده از آب خاکستری در بتن نسبت به سایر موارد مصرف آب خاکستری، اثرات جانبی کمتری خواهد داشت که این اثرات هم به‌سادگی قابل پیش‌بینی و برطرف‌سازی است. عوامل خطرآفرین، اثرات و راه‌حل‌های استفاده از آب خاکستری در بتن در جدول ۳ به‌صورت خلاصه ارائه شده‌اند.



شکل ۱۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ساخته شده با آب شرب، خاکستری و ترکیبی [۲۱]

جدول ۳- عوامل، اثرات و راه‌حل‌های استفاده از آب خاکستری در بتن [۲۳] - [۲۵]، [۳۰]

عوامل	اثرات (ریسک)	راه‌حل
پایین بودن کیفیت بیولوژیکی (تعداد بالای میکروارگانیسم‌ها)	به خطر افتادن سلامت افراد	۱- پیش‌تصفیه مانند گندزدایی ۲- استفاده در بتن‌های پیش‌ساخته
پایین بودن کیفیت شیمیایی (سولفات، منیزیم، آهن و ...)	خوردگی آرماتورها و ترک در بتن (مخاطرات فیزیکی و شیمیایی)	۱- استفاده در بتن غیرمسلح ۲- استفاده از مواد ضدخوردگی روی میلگردها ۳- پیش‌تصفیه آب خاکستری مانند استفاده از جاذب‌ها
پایین بودن کیفیت فیزیکی (TDS بالا)	تأثیر منفی در گیرش، اسلامپ و نسبت آب به سیمان بتن	۱- پیش‌تصفیه مانند فیلتراسیون ۲- استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده مانند فوق روان‌کننده‌ها

به منظور عمل‌آوری و اختلاط نمونه‌های بتنی نه‌تنها موجب تغییرات معناداری در محدوده خصوصیات بتن (از جمله مقاومت فشاری) نمی‌شود، بلکه در بسیاری از نمونه‌ها و تحت عمل‌آوری مناسب، اثرات مثبت افزایش مقاومت نیز رخ خواهد داد. هم‌چنین از آنجایی که در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در ایران و سطح بین‌المللی تنها خصوصیات کوتاه‌مدت (مانند مقاومت فشاری، گیرش و اسلامپ) در بتن تازه بدون توجه به منبع و کیفیت آب خاکستری، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، پیشنهاد می‌شود تا در مطالعات آتی، علاوه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بتن تازه، خصوصیات بلندمدت مربوط به دوام بتن سخت‌شده در کنار کیفیت آب خاکستری استفاده شده در فرایند ساخت بتن، مورد بررسی قرار گیرند تا اثرات کیفیت آب خاکستری مورد استفاده بر کیفیت بتن تولیدشده روشن گردد.

۷. نتیجه‌گیری

آب و بتن دو مصالحی هستند که به‌طور گسترده توسط بشر مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه تقاضا برای بتن به دلیل افزایش تحولات زیربنایی و توسعه‌ای در سراسر جهان رو به افزایش است درحالی‌که منابع آب به دلیل شرایط اقلیمی و افزایش تقاضای آب شرب در کنار تنش‌های آبی، محدود هستند. استفاده از منابع آب نامتعارف همچون آب خاکستری به عنوان جایگزین آب شرب در صنعت بتن، ضمن کاهش هزینه‌های ناشی از جمع‌آوری، تصفیه فاضلاب و تولید بتن در درازمدت، زمینه توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی کشور را فراهم می‌کند. هم‌چنین اثرات منفی (ریسک) احتمالی استفاده از چنین منابع آبی در بتن به‌راحتی قابل پیش‌بینی و پیشگیری می‌باشد. همان‌طور که در مرور مطالعات گذشته دیده‌شد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آب خاکستری یا پساب در مقایسه با آب شهری،

- [۱] یزدیان، م.، شکرچی‌زاده، م.، بررسی روش‌های کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن در ایران، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، ایران - دانشگاه صنعتی نوشیروانی زابل، ۱۳۹۳
- [۲] شکرچی‌زاده، م.، و میرزایی، ز.، آینده آموزش مهندسی بتن و سیمان با نگرش به محیط‌زیست، کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴، تهران، دانشگاه تهران، فرهنگستان علوم، ۱۳۸۸
- [۳] رضانیپور، ع.، بتن‌های سازگار با محیط‌زیست، سمینار ملی بتن‌های سازگار با محیط‌زیست، گرمسار، مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی، ۱۳۹۵
- [۴] *ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete" (ACI 201), American Concrete Institute, Farmington, Hills, Mich., pp41, 2001.*
- [۵] *Hawken, P.; Lovins, E.; and Levins, H., "Natural Capitalism—Creating the Next Industrial Revolution", Little Brown and Co., 1999.*
- [۶] *Neville. A, "Water-Cinderella Ingredient of Concrete", Concrete International, September 2000.*
- [۷] *H. Alradhawi and S. S. Angalekar, "Study the Feasibility of Use of Grey Water in Concrete", vol. 5, no. 6, pp. 493–498, 2016.*
- [۸] *M. Shekarchi, M. Yazdian, and N. Mehrdadi, "Use of biologically treated domestic waste water in concrete", Kuwait J. Sci. Eng., vol. 39, no. 2 B, pp. 97–111, 2012.*
- [۹] *G. Asadollahfardi, M. Asadi, H. Jafari, and A. Moradi, "Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete", Constr. Build. Mater., vol. 98, pp. 305–314, 2015.*
- [۱۰] *W. H. O. Guidelines, "Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater" vol. IV, 2006.*
- [۱۱] *S. Tsoumachidou, T. Velegraki, A. Antoniadis, and I. Poullos, "Greywater as a sustainable water source : A photocatalytic treatment technology under artificial and solar illumination", J. Environ. Manage., vol. 195, 2017.*
- [۱۲] *A. Maimon and A. Gross, "ScienceDirect Greywater : Limitations and perspective", Opin. Environ. Sci. Heal., vol. 2, 2018.*
- [۱۳] *H. N. Chanakya and H. K. Khuntia, "Treatment of gray water using anaerobic biofilms created on synthetic and natural fibers", Process Saf. Environ. Prot., vol. 92, no. 2, pp. 186–192, 2013.*
- [۱۴] یونسلو، ص.، راهنمای استفاده از آب خاکستری برای مصارف غیرآشامیدنی، پروژه پژوهشی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۶
- [۱۵] حسین‌دخت، ح.، دانش، ش.، و توکلی زاده، م.، سناریوهای ارزیابی کیفی منابع آب اختلاط بتن، همایش ملی مهندسی عمران و پژوهش‌های نیاز محور، مشهد، مؤسسه آموزش عالی خاوران، ۱۳۹۴

[۱۶] مهردادى، ن.، اكبريان، ا. و حق‌اللهى، ع.، استفاده از پساب تصفيه‌شده فاضلاب شهرى در تهيه و نگهدارى بتن، مجله محيط‌شناسى،

۱۳۸۸

[۱۷] EPA, "GUIDELINES FOR WATER REUSE. U.S. Environmental Protection Agency", 2004.

[۱۸] A. M. Ghrair, O. A. Al-mashaqbeh, M. K. Sarireh, N. Al-kouz, M. Farfoura, and S. B. Megdal, "Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes", *Ain Shams Eng. J.*, 2018.

[۱۹] A. M. Abdel-kader, "Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system", *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2013.

[۲۰] G. R. Babu, B. M. Reddy, and N. V. Ramana, "Quality of Mixing Water in Cement Concrete", *Mater. Today Proc.*, 2018.

[۲۱] K. Al-Jabri, "Effect of using Wastewater on the Properties of High Strength Concrete", *Procedia Eng.*, 2011.

[۲۲] R. T. Peche, S. S. Jamkar, and P. S. Sadgir, "Grey Water- A Potential Source of Water for Construction," 2014.

[۲۳] K. J. Kucche, S. S. Jamkar, P. A. Sadgir, "Quality of Water for Making Concrete : A Review" *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2015.

[۲۴] M. Alqam, A. Jamrah, and B. A. A. R. Al-zubi, "Fresh and Hardened Properties of Sustainable Concrete Using Recycled Household Greywater", 2014.

[۲۵] Abdul Razak.B.H., D.L. Venkatesh Babu, "Experimental Investigation on Usage of GreyWater in Concrete Production", 2015.

[۲۶] میسمی، م.، دلاوری، ا. و جلال، م.، استفاده بهینه از منابع آب با به‌کارگیری پساب در ساخت بتن (با مطالعه موردی پساب تصفیه‌خانه شهرک غرب تهران)، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، ۱۳۸۵

[۲۷] ساعدی، ع.؛ پیری، م. و ویسکرمی، م.، استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌های تصفیه‌شده به‌عنوان جایگزینی برای آب آشامیدنی در بتن، کنفرانس ملی علوم معدنی، ساری، سازمان نظام‌مهندسی معدن استان مازندران، ۱۳۹۳

[۲۸] رشنویی، و؛ فردی، غ. و دلنواز، م.، بررسی استفاده از پساب تصفیه‌شده قبل از کلرزنی برای تولید و عمل‌آوری بتن، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی محیط‌زیست، تهران، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، ۱۳۹۳

[۲۹] کابوسی، ف.، کابوسی، ک. و فدوی، م.، امکان‌سنجی استفاده از آب خاکستری در ساخت بتن، سومین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین عمران معماری و صنعت ساختمان ایران، تهران - دانشگاه تهران، ۱۳۹۷

[۳۰] Cement Concrete & Aggregates Australia, "Use of Recycled Water in Concrete Production", 2007.

آب بندی بتن در سازه های فرآیندی تصفیه خانه های آب

با نگرشی بر مهندسی ارزش انجام شده در تصفیه خانه ششم آب تهران



حسین خدیو

مدیر کنترل کیفیت شرکت سابیر

چکیده

وظیفه اصلی سازه های آبی نخست ذخیره سازی صحیح و پایدار آب به همراه حفظ دوام سازه در طول دوره بهره برداری آن میباشد. با توجه به کیفیت مصالح تشکیل دهنده بتن و روش اجرای بخشهای مختلف پروژه های آبی گمان می رود با استفاده از نوارهای آئبند (واتر استاپ) PVC در محل ژوئن های انبساطی و اجرایی و با استفاده از ضوابط استاندارد طراحی مخلوط های نرمال بتنی بتوان به این دو خواسته دستیافت در برخی موارد در پروژه های متعدد خلاف این تصور را به مهندسین عمران نشان داد. هدف از مقاله حاضر در اختیار قرار دادن نتیجه مطالعات ۳ ساله نظری و اجرایی نویسنده در امر اصلاح روش آئبندی ژوئن های اجرایی در سازه های آبی بویژه تصفیه خانه های آب میباشد.

در مقاله حاضر نخست روند شکل گیری و توسعه سازه های آبی در گستره تاریخ ارائه شده است. در بخش دوم روشهای متداول آئبندی سازه های بتنی با ذکر استانداردهای مطروحه و روش های معمول اجرایی آن بیان شده و در ادامه به مزایا و معایب هر روش اشاره شده است. در بخش پایانی نیز ابتدا به مشکلاتی که در آئبندی برخی از تصفیه خانه های آب مشاهده شده پرداخته شده و در پیامد آن ضمن معرفی اجمالی پروژه تصفیه خانه ششم آب تهران جزئیات تغییر سیستم آئبندی ژوئن های اجرایی آن پروژه از اجرای ماستیک پلی اورتان به استفاده از روکش آئبند پلیمری در قالب مهندسی ارزش جهت اصلاح کیفیت، کاهش هزینه و بهبود زمان اجرا میباشد پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: آئبندی، سازه های آبی، تصفیه خانه، درز اجرایی، درز انبساطی

۱- مقدمه

آب حیاتی ترین ترکیب شیمیایی در طبیعت بوده و بشر در تمام طول تاریخ بمنظور ادامه حیات و توسعه جوامع شهری نیازمند ذخیره سازی آن بوده و هست. بر همین اساس آثار متنوعی از تلاش انسان در ذخیره سازی و هدایت آب در جای جای کره خاکی مشاهده میشود. مخازن آب اولیه از موادی همچون سنگ، چوب و سفال ساخته می شدند. اولین مورد ثبت شده استفاده از مخازن آب به سه هزار سال پیش از میلاد مسیح برمی گردد. انبارها و مخازن آب برای مردم تمدن دره سیند (تمدنی در عصر برنز در شبه قاره هند که از ۳۰۰۰ تا ۱۵۰۰ قبل از میلاد می زیستند) [۱] بسیار ارزشمند و کارآمد بود.

طبیعت وحشی بشر را وادار به ساخت سازه هایی جهت ذخیره سازی آب در ابعاد بسیار بزرگتر از مخازن یاد شده نمود. لذا با توجه به توپوگرافی مناطق زندگی بشر، بندها و سدها با انواع و ابعاد مختلف بدست توانای بشر مهندسی و ساخته شدند. بسیاری، قدیمی ترین سد دنیا را سد «الکفره» واقع در ۱۶ کیلومتری جنوب شرقی «هلوان» در مصر می دانند، که بین سالهای ۲۷۵۰ و ۲۹۵۰ ق.م. (۵۰۰۰ سال قبل) [۲،۳] با طول ۱۱۵ متر و ارتفاع ۱۲ متر ساخته شده است. سد داریوش کبیر روی رودخانه گُر با عمر بیش ۲۵۰۰ سال، قدیمی ترین سد ایران زمین محسوب می گردد [۴]. چه بسیار زمانی که آبهای ذخیره شده در مخازن (و یا از رودخانه های جاری) میبایست جهت مصرف به نقطه ای دور از محل تامین منتقل

میشدند. بدین سبب بشر اقدام به احداث سازه های خلاقانه انتقال آب نمود. قدیمی ترین کانال های شناخته شده، قنات ها و کانال های آبیاری هستند که ۴۰۰۰ سال پیش از میلاد در میان رودان ایران باستان در شرق هرمزگان کنونی ساخته شده اند. بشر متفکر، با تجهیز خود به سلاح دانش موفق به پاکسازی آب های جاری و ذخیره شده نمود. با ساخت تصفیه خانه های آب، پاکی را که از آب گرفته بود مجدداً به آن برگرداند. قدیمی ترین و مهمترین سازه تاریخی آبی جهان با قدمتی بیش از ۳۲۵۰ سال به نام تصفیه خانه چغازنبیل در شهرستان شوش و در کنار زیگورات ساخته شد. چغازنبیل در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شوش قرار داشته و یکی از چهار سازه تاریخی کشورمان است. این مجموعه تاریخی در زمان اونتاش گال شاه ایلام میانه، بین سال های ۱۲۷۵ تا ۱۲۴۰ ق. م. ساخته شده تا نگینی باشد بر تارک مهندسی آب جهان. [۵]

پس از پیشرفت های خیره کننده مهندسی آب و سازه و ارتقاء کیفیت زندگی انسان در کنار توسعه روزافزون جوامع بشری نگرش به تامین آب سالم تغییر کرد. به تدریج حفظ و نگهداری از آب سالم تامین شده، در راس دغدغه های جوامع بین المللی آب قرار گرفت و استانداردها و دستورالعمل های بسیاری در زمینه تامین، انتقال و سالم سازی آب بعنوان ضرورت اولیه احداث پروژه های آبی قرار گرفت. یکی از اصلی ترین سازه های آبی تصفیه خانه های آب میباشد. در این سازه امر سلامت آب در تمامی طول فرآیند تصفیه بسیار حائز اهمیت بوده و توجه دوچندان را در این امر طلب می نماید. الگوی اصلی تعیین کفایت آبیندی در بخش ۷-۲ نشریه ۱۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور [۶] به تفصیل بیان شده است. در این دستورالعمل معیار پذیرش آبیندی (بطور ویژه مخازن آب) کنترل میزان تراوش آب در مدت زمان مشخصی میباشد. بدین سبب استاندارد یاد شده قدری تراوش آب را هر چند کم در سازه های آبی ذخیره آب می پذیرد. ولی در تصفیه خانه های آب بخشهایی وجود دارد که در صورت هرگونه تراوش از یک عضو امکان سرایت آب تصفیه نشده به مجرای عبور یا ذخیره آب تصفیه شده محتمل بوده که سبب آلوده شدن آب سالم میگردد. بدین سبب در تصفیه خانه هیچ تراوشی از اعضای بتنی قابل پذیرش نبوده و

میبايست پيش از آبيگيري از آبيندي كامل آن اطمينان حاصل شود.

همانگونه که ذکر شد نشریه ۱۲۳ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور [۶] استاندارد جامع طراحی و اجرای سازه آبی (بوئیه مخازن آب) میباشد و جزئیات بسیار مهمی را در خصوص آبیند نمودن سازه های آبی ذکر کرده ولی اشاره ای بر نحوه اجرای ژوئن ها نکرده و بدین لحاظ خلاء تکرار شونده ای در طراحی و اجرای درزه های اجرایی در این سازه ها مشاهده میشود.

آب بندی سازه ها در دو گروه عمده قرار میگیرند:

- آبیندی اعضای بتنی سازه هایی که در معرض فشار مثبت آب قرار دارند مانند آبیندی بخش داخلی دیواره یک مخزن آب و یا یک کانال انتقال آب. (آبیندی از بخش داخلی مخزن یا کانال)

- آبیندی اعضای بتنی سازه هایی که در معرض فشار منفی آب قرار دارند مانند آبیندی بخش خارجی دیواره یک مخزن آب (آبیندی بخش خارجی مخزن) و یا آبیندی سطح داخلی لاینینگ تونل جهت ممانعت از تراوش آبهای جمع شده در پشت لاینینگ تونل به داخل آن.

در مقاله حاضر آبیندی سازه ها در برابر فشار مثبت آب مورد گفتگو قرار گرفته است. در بخش دوم روشهای متداول آبیندی سازه های بتنی با ذکر استانداردها و روش های معمول اجرایی آن بیان شده و در ادامه به مزایا و معایب هر روش اشاره شده است. در بخش سوم نیز ضمن بیان مشکلاتی که در آبیندی برخی از تصفیه خانه های آب مشاهده شده به معرفی پروژه تصفیه خانه ششم آب تهران پرداخته و در پیامد آن جزئیات تغییر سیستم آبیندی ژوئن های اجرایی آن پروژه از "اجرای ماستیک پلی اورتان در داخل درزها" به استفاده از "روکش آبیند پلیمری" در قالب مهندسی ارزش پرداخته شده است.

۲- روش های آبیندی سازه ها (در برابر فشار مثبت آب)

آبیندی سازه های آبی (در برابر فشار مثبت آب) در دو بخش اصلی قابل بررسی و اعمال میباشد:

- آبیندی بدنه اصلی اعضاء بتنی
- آبیندی درزهای انبساطی و اجرایی

۱-۲ آییندگی جسم بتن:

این مقاله سیمان) در میزان نفوذ پذیرگی بتن اصلی سازه‌های فرآیندی پروژه تصفیه خانه ششم آب تهران که مطابق با استاندارد شماره 8-12390 EN [۷] در آزمایشگاه انستیتو مصالح دانشگاه تهران با استفاده از طرح اختلاط اصلی بتن آن پروژه با نسبت اختلاط ذکر شده در جدول ۱ اجرا گردیده نشان داده شده است. (TR-145-2-C) در تحقیق انجام شده با ثابت نگهداشتن میزان آب مخلوط، میزان سیمان مورد استفاده در بازه ۳۸۰ تا ۴۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب با حفظ میزان آب مصرفی انتخاب گردید. (تقریباً " $\pm 10\%$ نسبت به عیار طرح اصلی TR-145-2-C. وضعیت دانه بندی و آزمایشات کیفیتی مصالح سنگی مورد استفاده نیز که در آزمایشگاه کارگاه و آزمایشگاههای کوبان کاو و خاک آزما انجام شده در شکل ۲ و جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است).

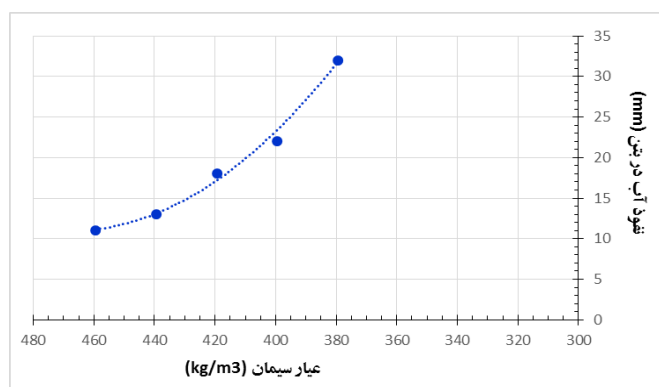
بتن بعنوان ماده اصلی تشکیل دهنده اعضاء سازه آبی، به خودی خود آبگذر بوده که میتوان میزان آبگذری آنرا با استفاده از استانداردهای اروپایی مانند DIN 1048-5 و BS EN 12390-8 [۷ و ۸] بصورت تعیین عمق نفوذ آب در فشار مشخصی از آب وارد شده بر سطح بتن و یا استانداردهای آمریکایی CRD-C48 و یا USBR 4913 [۹ و ۱۰] بصورت تعیین ضریب تراوش (گرادیان تراوش) بر حسب لیتر در واحد زمان اندازه گیری نمود.

مهمترین پارامترهای کاهنده نفوذپذیری بتن، کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین افزایش ریزدانه های داخلی بتن (بطور عام سیمان) بمنظور مسدود نمودن کاپیلارهای سطحی آن میباشد. در دیگرام نشان داده شده در شکل ۱ تاثیر افزایش ریز دانه بتن (مواد سیمانی - در

جدول ۱- مشخصات طرح اختلاط بتن های آزمایش شده در بررسی تاثیر W/C و سیمان در میزان نفوذپذیری بتن

شماره طرح	سیمان (تیب ۲-آیک) kg/m^3	آب $lit./m^3$	نسبت آب به سیمان	سنگدانه				ماده افزودنی	
				مقدار کل سنگدانه نسبت ماسه به کل سنگدانه	kg/m^3	ماسه kg/m^3	شن kg/m^3	فوق کاهنده آب	
								نوع	هواساز
145-2-A	۳۸۰	۱۵۰	۰.۳۹۵	۰.۵۰۰	۱,۷۵۶	۸۷۸	۸۷۸	پلی کریوکیلات	۰.۷
145-2-B	۴۰۰	۱۵۰	۰.۳۷۵	۰.۵۰۴	۱,۷۳۴	۸۷۴	۸۶۰		۰.۷
145-2-C	۴۲۰	۱۵۰	۰.۳۵۷	۰.۵۱۰	۱,۷۱۵	۸۷۵	۸۴۰		۰.۷
145-2-D	۴۴۰	۱۵۰	۰.۳۴۱	۰.۵۱۶	۱,۶۹۶	۸۷۵	۸۲۱		۰.۷
145-2-E	۴۶۰	۱۵۰	۰.۳۲۶	۰.۵۲۲	۱,۶۷۴	۸۷۴	۸۰۰		۰.۷

شماره طرح	کارایی (اسلامپ - سانتیمتر)			هوای محبوس در بتن (%)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی (kg/cm ²)		مقدار نفوذ آب (mm) BS EN 12390-9	نفوذ یون کلر (colomb) ASTM C1202
	زمان ۰ دقیقه	زمان ۱۵ دقیقه	زمان ۳۰ دقیقه		آزمایشگاه	اجرا		
145-2-A	۰.۵۰۰	۱,۷۵۶	۸۷۸	۸۷۸	۳۵۲	-	۲۹	۳۳۴۶
145-2-B	۰.۵۰۴	۱,۷۳۴	۸۷۴	۸۶۰	۳۶۳	-	۲۲	۳۱۰۵
145-2-C	۰.۵۱۰	۱,۷۱۵	۸۷۵	۸۴۰	۳۸۵	۴۲۹	۱۸	۳۰۹۲
145-2-D	۰.۵۱۶	۱,۶۹۶	۸۷۵	۸۲۱	۳۹۸	-	۱۳	۲۹۱۰
145-2-E	۰.۵۲۲	۱,۶۷۴	۸۷۴	۸۰۰	۴۱۱	-	۹	۲۷۳۲



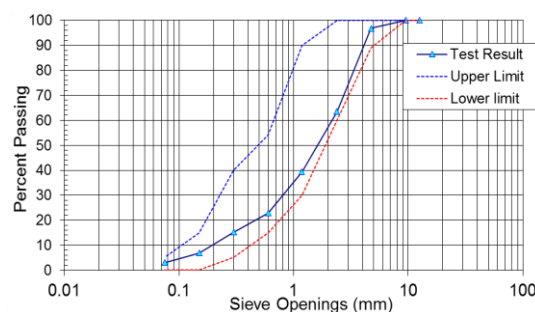
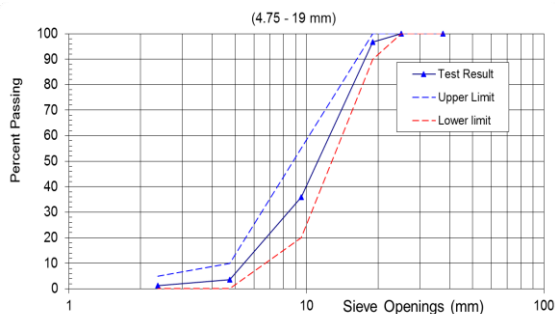
شکل ۱- تاثیر کاهش نسبت آب به سیمان در میزان عمق نفوذ آب در بتن مطابق استاندارد EN 12390-8

جدول ۲- آنالیز شیمیایی و فیزیکی ماسه مصرفی در بتن

شماره نمونه	مصالح	ساندس (%)	کلوخه رسی (%)	ذرات سبک (%)	ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون (%)	کلراید (%)	سولفات (%)
حد پذیرش	ماسه	< ۱۰	-	< ۰.۵	< ۷	< ۰.۰۴	< ۰.۴
G17	ریزتر از ۴.۷۵ میلیمتر	۰.۹۸	۰.۳	۰.۰۸۴	۳.۵	۰.۰۰۴	قابل صرف نظر کردن

جدول ۳- آنالیز شیمیایی و فیزیکی شن مصرفی در بتن

شماره نمونه	مصالح	ساندس (%)	سایش - لس آنجلس (%)	کلوخه رسی (%)	ذرات سبک (%)	ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون (%)	کلراید (%)	سولفات (%)
حد پذیرش	شن	< ۱۲	< ۵۰	< ۵	< ۰.۵	< ۱	< ۰.۰۴	< ۰.۴
G18	۴.۷۵ الی ۱۹ میلیمتر	۱.۷	۱۵.۸	۰.۹۱	۰.۰۲۱	۰.۷۴	۰.۰۰۵	قابل صرف نظر کردن



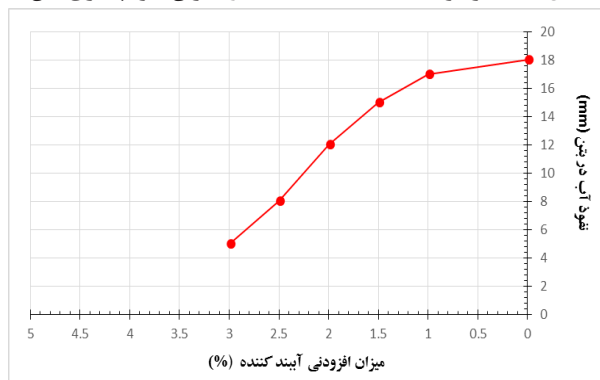
شکل ۲- دانه بندی ماسه مصرفی بتن مطابق آیین نامه بتن ایران [۱۲]

داده میشود. این مواد با مسدود نمودن کاپیلارهای داخلی بتن تعداد منافذ مرتبط به هم را کاهش داده و در نتیجه نفوذ پذیری بتن به شدت کاهش می یابد. در شکل ۳ تاثیر استفاده از این مواد (که بطور آزمایشی در آزمایشگاه کارگاه انجام پذیرفت) در بتن فرآیندی پروژه تصفیه خانه ششم تهران نشان داده شده است. جزئیات طرح های اختلاط آزمایش شده نیز در جدول ۴ ارائه شده است. شایان ذکر است بدلیل صعوبت اجراء این روش در کاهش نفوذپذیری آب پروژه تصفیه خانه ششم تهران اجرا نشد.

بر اساس تحقیق بعمل آمده ملاحظه شد با افزایش میزان ریزدانه در بتن مصرفی سازه میتوان میزان آبگذاری آن را کاهش داد. این مهم را میتوان با افزودن پودر سنگ (به شرط داشتن پایه آهکی و عدم وجود سیلیس در آن به لحاظ عدم بروز واکنش قلیایی سیلیکاتی در بتن) بعنوان بخشی از مواد ریزدانه سنگی و یا میکروسیلیس و همچنین خاکستر بادی نیز بعنوان بخشی از مواد سیمانی بتن تامین نمود).

امروزه با استفاده از مواد افزودنی آببند کننده که در زمان اختلاط به بتن تازه افزوده میشود نفوذ پذیری بتن کاهش

شکل ۳: تاثیر مواد مضاف آببند کننده در میزان نفوذپذیری بتن



جدول ۴: جزئیات تاثیر مواد آببند کننده در میزان نفوذ پذیری آب در بتن فرآیندی پروژه تصفیه خانه ششم آب تهران

مقدار نفوذ آب (mm) BS EN 12390-9	افزودنی آبیند کننده		ماده افزودنی			مصالح سنگی		آب lit./m ³	سیمان (تیپ ۲-آبیک) kg/m ³	شماره طرح
	kg/m ³	(%)	هواساز (%)	فوق کاهنده آب (%)	نوع	شن kg/m ³	ماسه kg/m ³			
۱۸	۰	۰	۰.۰۵	۰.۷	پلی کریو کسيلات	۸۴۰	۸۷۵	۱۵۰	۴۲۰	145-2-C-1
۱۷	۴.۲	۱					۸۷۱			145-2-C-2
۱۵	۶.۳	۱.۵					۸۶۹			145-2-C-3
۱۲	۸.۴	۲					۸۶۷			145-2-C-4
۸	۱۰.۵	۲.۵					۸۶۵			145-2-C-5
۵	۱۲.۶	۳					۸۶۲			145-2-C-6

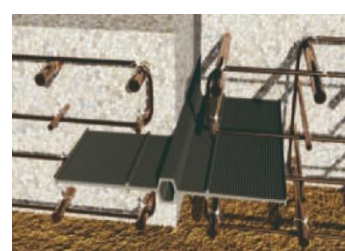
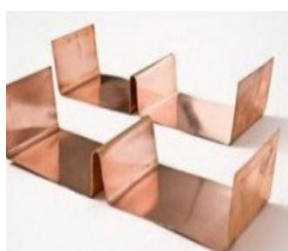
کننده (volatile loss) از جسم واتر استاپ شده و در نتیجه باعث کاهش انعطاف پذیری و کش آمدگی آن در طول زمان گردد. در همین راستا بدلیل فشار بتن تازه در هنگام بتن ریزی احتمال حرکت واتر استاپ بسته شده در محل وجود داشته و میتواند واتر استاپ را از وسط مقطع به یکسو جابجا کرده و آبیندی مقطع را با مشکل مواجه سازد.

واتر استاپ های یاد شده بمنظور انسداد کامل درز نبوده و استفاده از آن صرفاً موجب کاهش گرادیان آب میگردد. بمنظور آبیند کردن کامل درز بصورت ثنوری میتوان از واتر استاپ های هیدروفیلی استفاده نمود (شکل ۵). واتر استاپ های یاد شده پس از تماس با آب به شدت افزایش حجم داشته (۲ تا ۵ برابر حجم اولیه) و در صورت قرارگیری در فضای بسته با ایجاد فشار بالا به بستر بتنی خود از حرکت آب از محل اتصال خود با بتن جلوگیری نموده و در صورت صحت عملیات اجرا میتواند بطور کامل محل درز اجرایی را آبیند نماید. (نقطه ضعف این گزینه هزینه بالای تامین آن است).

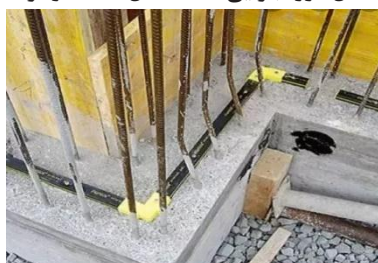
۲-۲ آبیندی درزه های بتن:

۲-۱-۲ نوار آبیند (کاهش گرادیان هیدرولیکی)

در ژوئن های اجرایی سازه های آبی بمنظور جلوگیری از شسته شدن ریزدانه های بتن (در اثر تراوش آب از داخل درز)، طراح با استفاده از نوارهای آبیند تخت گرادیان حرکت آب را از داخل بتن کاهش میدهد. در ژوئن های انبساطی نیز که در معرض تراوش آب قرار دارند از نوارهای آبیند حبابدار استفاده میشود تا گرادیان تراوش آب بطور قابل توجهی کاهش یابد. نوارهای یادشده عموماً در دو نوع نوارهای PVC و نوارهای مسی مورد استفاده قرار میگیرد (شکل ۴). نقطه ضعف واتر استاپ های PVC اولاً دشواری اتصال قطعات واتر استاپ در محل اجرا بوده (عموماً با روش گرمایش و یا با استفاده از چسب های اتصال بوده که بدلیل صعوبت اجرا و احتمال عدم اتصال کامل واتراستاپها در محل وصله به هم میتواند سبب نشت آب از سازه در محل اتصال می گردد) و ثانیاً عدم نگهداری مناسب واتراستاپ در هوای آزاد و در معرض تابش اشعه آفتاب بودن آن می تواند سبب تسریع فرار مواد روان



(شکل ۴-۱-۲ واتراستاپ PVC در محل درز انبساطی) (شکل ۴-۲ واتراستاپ PVC در محل درز اجرایی) (شکل ۴-۳ واتر استاپ مسی)



شکل ۵-۲-۵ اجرای واتر استاپ هیدروفیلی

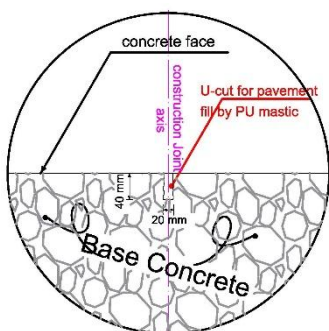


شکل ۵-۱-۵ انبساط حجم در واتراستاپ هیدروفیلی

برای درز بندی ژوئن های اجرایی

(Contraction / Construction joints)

نیز عموماً مهندسین طراح از جزئیاتی مشابه آنچه در شکل ۷ نشان داده شده جهت درز بندی ژوئن استفاده می نمایند. در این مدل طراح ایجاد شکافی به عرض ۱۵ تا ۲۵ میلیمتر و عمق ۳۵ تا ۴۵ میلیمتر را در دستور کار پروژه قرار می دهد. جهت اجرای این طرح میبایست با روش های اجرایی مناسب ابتدا شیار به ابعاد یاد شده ایجاد و پس از پاکسازی کامل محل نسبت به پرکردن داخل شیار با توجه به روش پیشنهادی سازنده از ماستیک پلی اورتان استفاده نمود.



شکل ۷- درز بندی عمومی ژوئن های اجرایی

بمنظور ایجاد شیار یاد شده بسیاری از پیمانکاران با استفاده از چکش تخریب اقدام به ایجاد شکاف مینمایند. این در حالیست که عرض و عمق شکاف ژوئن های اجرایی بطور مستقیم وابسته به حداقل عرض قلم و نوع ماستیک مصرفی در طرح میباشد. نظر به حداقل عرض قلم تخریب چکش های ضربه ای (جدول ۵)، حداقل عرض بازشدگی قابل اجرا شیار برای سبکترین چکش تخریب (با عرض سر قلم ۲۶ میلیمتر) ۳۵ میلیمتر میباشد. همچنین بر اساس مشخصات فنی ماستیک های تک جزئی پلی اورتان، بمنظور ایجاد شرایط کیورینگ آن (باصطلاح خشک شدن ماستیک) نسبت عرض به عمق ماستیک کاری ۱,۵ تا ۲ (عمدتاً) میبایست رعایت گردد. بر این اساس کوچکترین ابعاد شیار قابل اجرا با استفاده از چکش کوبشی عرض حداقل ۳۵ و عمق ۳۰ میلیمتر میباشد. لذا ابتدا میبایست درز های یاد شده بصورت شکافی به عرض ۳۵ میلیمتر و در عمق ۳۰ میلیمتر توسط قلم تخت TE-YPM با استفاده از چکش ۶ کیلوویی با توان ۱۱۰۰ وات (یا معادل آن) باز شده و پس از تمیزکاری کامل محل با استفاده از ماستیک پلی اورتان پر شوند.

وجود درز های بتن در یک سازه بتنی اجتناب ناپذیر بوده و لذا آبیندی آن نیز میتواند یکی از اصلی ترین مباحث آبیندی سازه های بتنی نگهدارنده و یا منتقل کننده آب باشد. درز های ساختمانی در سازه های آبی یکی از نقاط ضعف سازه ها به شمار آمده و بدین سبب میبایست به روش مناسب با عنایت به وظیفه عملکردی سازه در دوران بهره برداری مورد اصلاح قرار گیرند. تصفیه خانه نیز که در آن انتقال و انبارش آب اتفاق می افتد از این امر مستثنا نبوده و بدین سبب درز بندی لازم برای ژوئن های یاد شده میبایست صورت پذیرد. عمده ترین روش آبیندی درز های یاد شده پر نمودن محل درز با ماستیک پلی اورتان بوده که عمدتاً توسط مهندسین طراح در نقشه های طراحی منظور و جهت اجرا به پیمانکار ابلاغ می گردد.

بمنظور درز بندی ژوئن های انبساطی، با استفاده از پرکننده اسفنجی ابتدا داخل درز را مشابه شکل ۶ پر کرده و سپس بخش رویی درز را با ماستیک PU اجرا می نمایند. مهمترین عامل تامین درز بندی کامل و صحیح علاوه بر انتخاب مناسب ماستیک پر کننده، قدرت چسبندگی ماستیک به بتن دو سمت جداره درز میباشد. بدین سبب انجام آزمایش چسبندگی به سطح برای این ماده حائز اهمیت است (مطابق استاندارد ASTM C1583 [۱۳]). علاوه بر آن بر اساس میزان عرض ژوئن انبساطی، میزان درصد کش آمدگی ماستیک نیز بسیار حائز اهمیت میباشد.



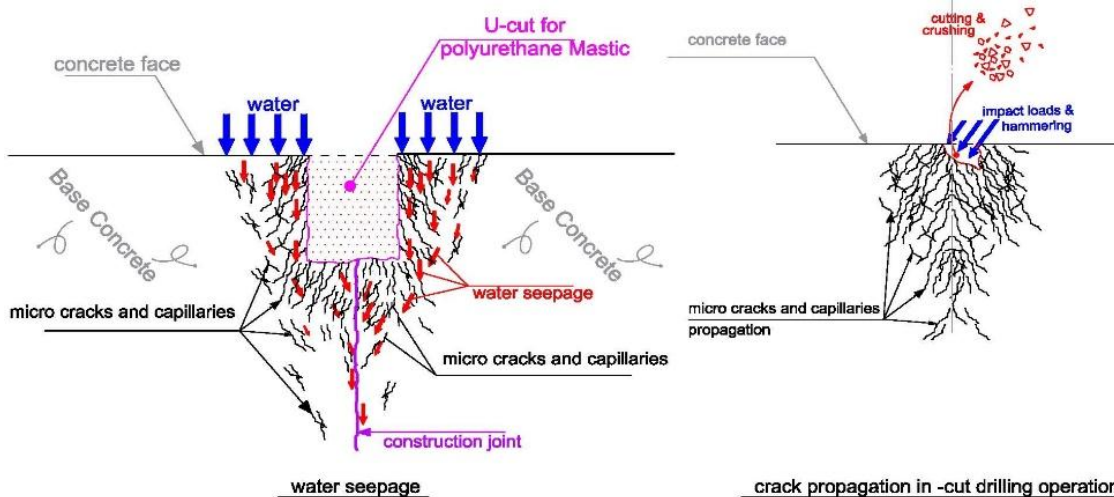
شکل ۶: درز بندی عمومی ژوئن های حرارتی (انبساطی)

جدول ۵- مشخصات فنی قلم های تخریب کنترل شده بتن

قلم							شرح
TE-H28P SPMA	TE-H28P SPM	TE-SP SPM	TE-Y-HM	TE-H28P FM	TE-SP FM	TE-Y FM	
۱۰۰	۸۰	۵۰	۲۸	۳۸	۳۲	۲۶	عرض سر قلم (میلیمتر)
-	-	-	۳۵	۴۵	۴۰	۳۵	کوچکترین عرض تئوریک تخریب در بتن
--	۴۰۰	۵۰۰	۲۸۰	۴۰۰	۳۶۰ - ۵۰۰	۳۶۰ - ۵۰۰	طول میله قلم (میلیمتر)
تخت - کفکیری	تخت - پهن	تخت - نیمه پهن	قلقلی - شیار زن	تخت - نیمه باریک	تخت - باریک	تخت - باریک	نوع سر قلم
تخریب کنترل شده سطحی بتن	تخریب کنترل شده سطحی بتن	تخریب کنترل شده سطحی بتن	شیار زنی در بتن	تخریب کنترل شده در بتن	تخریب کنترل شده در بتن	تخریب کنترل شده در بتن	کاربرد
دریل تخریب سنگین و نیمه سنگین ۱۰ تا ۱۴ کیلوپی توان ۱۸۰۰ وات			دریل تخریب نیمه سبک ۸ کیلوپی توان ۱۳۰۰ وات	دریل تخریب سنگین ۱۴ کیلوپی توان ۱۸۰۰ وات	دریل تخریب نیمه سنگین و سنگین ۱۰ تا ۱۴ کیلوپی توان ۱۸۰۰ وات	دریل تخریب سبک ۶ کیلوپی توان ۱۱۰۰ وات	نوع دریل مصرفی

حرکت کرده و از پشت ماستیک وارد درزه اجرایی شده و عملاً انتظار پروژۀ را از حیث آب بند شدن محل درز برآورده نمی نماید. (مشابه آنچه در یکی از پروژۀ های تصفیه خانه رخ داده و سبب تغییر سیستم آببندی درزه ها شد). (روشی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد). شایان ذکر است بر اساس پدیده auto healing و یا تراوش آهک داخلی بتن به داخل مجرای موی ترکها امکان انسداد خود به خودی برخی از ترکهای مورد بحث وجود داشته که تا حدی میتواند از میزان تراوش ناخواسته فوق بکاهد.

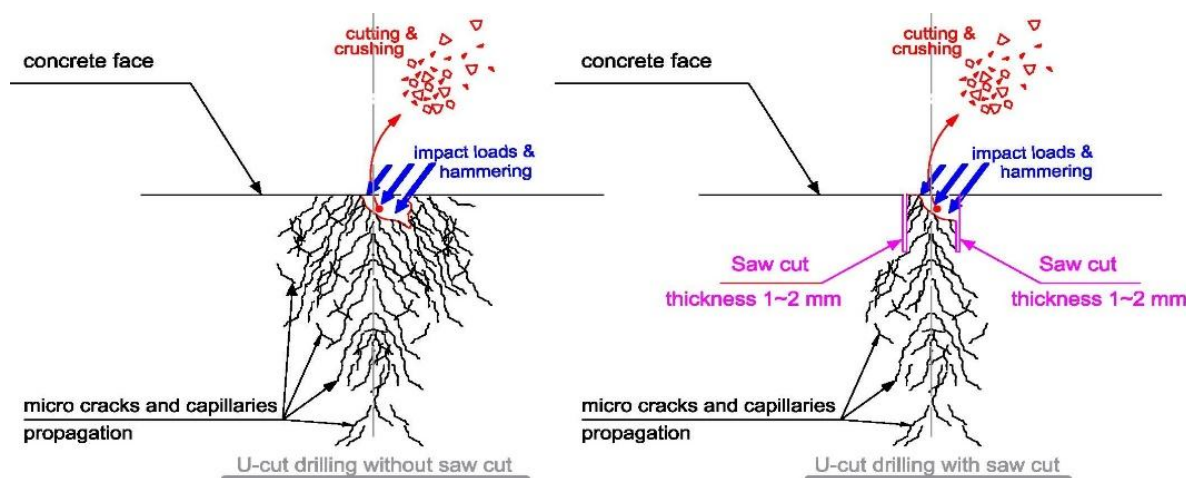
روش ایجاد شیار با استفاده از چکش های تخریب کوبشی دارای مزیت عمده سرعت بالای اجرا را به همراه خود داشته که مورد علاقه بسیاری از مهندسين اجرا در پروژۀ های عمرانی میباشد. ولی این روش دارای نقص عمده کیفیتی برای سازه های فرآیندی در مخازن آب و یا تصفیه خانه های آب و فاضلاب میباشد. الگوی کلی نقص یاد شده در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میشود علیرغم انسداد محل درز با ماستیک pu بدلیل وجود میکرو ترک های ایجاد شده در مجاورت درز، آب میتواند از طریق ترک ها به پشت محل ماستیک کاری



شکل ۸- ایجاد ترک و نشت آب در مجاورت ناحیه شکاف ایجاد شده در محل درز در اثر ضربات دینامیکی چکش تخریب

ترکهای ناشی از ضربات کوبشی شده و عرض شیار را به میزان خواسته شده طراح نزدیکتر می کند. روش ذکر شده از حیث کیفیت مناسب تر از روش ایجاد شیار بدون استفاده از برش دو طرف درز بوده ولی اشکال عمده آن صعوبت شدید اجرایی و زمان بر بودن آن است که باتبع مشکل ازدیاد هزینه را در پیامد خود خواهد داشت.

در این راستا بمنظور کاهش ضایعات حاصل از تخریب کوبشی یاد شده می توان با استفاده از دستگاه شیار زن بتن دو شیار به میزان عرض خواسته شده در دو طرف درز به عمق ۱۰ تا ۲۰ میلیمتر ایجاد کرده و سپس اقدام به تخریب بتن بین دو شیار با چکش های کوبشی نمود. (شکل ۹). این عمل سبب جلوگیری از گسترش موی



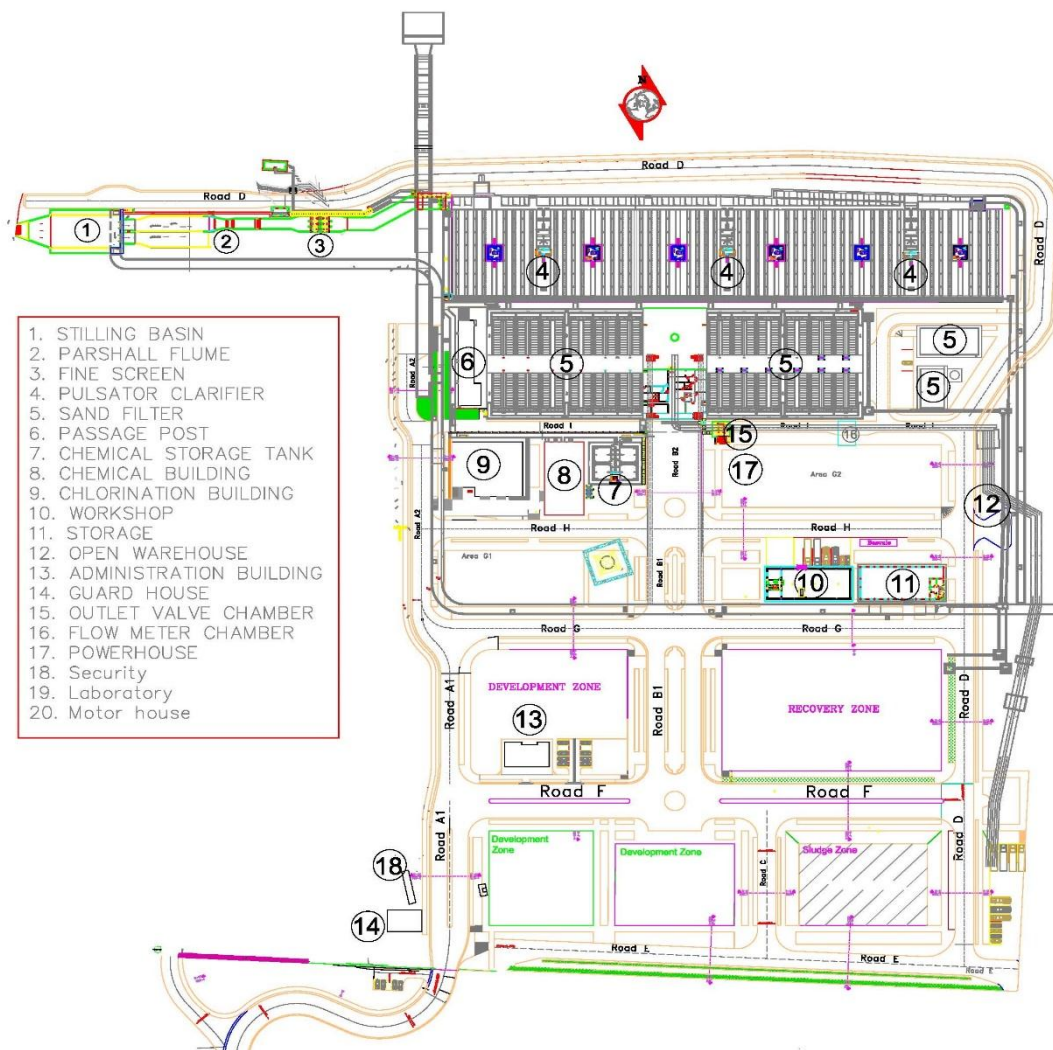
شکل ۹- ایجاد برش طولی در دو سمت شیار سبب کاهش گسترش ترک های ناشی از ضربات چکش می گردد

مجموعاً به طول ۲۹,۵ کیلومتر آب مورد نیاز پروژه را از سد تنظیمی امیرکبیر (کرج) تامین می نمود. این پروژه در دو فاز ۷,۵ متر مکعبی با استفاده از صافی های دولایه با تعداد کل ۲۴ فیلتر و سه پولساتور و با دو مخزن جریانی تامین آب مورد نیاز بخش غربی شهر تهران را بر عهده دارد. میزان مصرف آب شرب تهران بالغ بر ۳,۵ میلیون متر مکعب در شبانه روز بوده و تصفیه خانه ششم تهران در هر یک از دو فاز اجرایی خود میتواند ۱۸,۵٪ از مصرف کل شهر تهران را تامین نماید. عملیات اجرایی مدول اول پروژه از سال ۱۳۸۹ آغاز و در زمان نگارش مقاله با پیشرفت فیزیکی ۹۷٪ در بخش عمرانی و ۷۵٪ در بخش تجهیزاتی روبرو میباشد.

۳- آبیندی تصفیه خانه ششم آب تهران

۱-۳ معرفی پروژه

تصفیه خانه ششم آب تهران با ظرفیت ۱۵ متر مکعب بر ثانیه در زمینی به وسعت ۲۱ هکتار به ابعاد تقریبی ۴۲۰×۵۱۰ متر در منطقه کن، واقع در شمال غربی شهر تهران و در شمال بزرگراه همت جنب دانشگاه نیروی انتظامی در دست احداث میباشد (شکل ۱۰). کارفرما شرکت سهامی آب منطقه ای تهران، نماینده کارفرما شرکت مشانیر و طراح و پیمانکار طرح در ابتدا مشارکت شرکتهای سایبر و عمراب بوده که در دو سال پایانی پروژه شرکت سایبر عملیات طراحی و اجرایی کل پروژه را بر عهده داشت. تونل انتقال آب به تصفیه خانه در دو قطعه



شکل ۱۰- سایت پلان تصفیه خانه ششم آب تهران

۲-۳ طرح اولیه درز بندی سازه های فرآیندی

۲-۳-۱ ژوئن های انبساطی:

درزه های انبساطی بتن در سازه های فرآیندی پروژه تصفیه خانه ششم آب تهران در دو گروه با عرض ۳ و ۵ سانتیمتر میباشد. این درزه ها با استفاده از پرکننده اسفنجی در عمق ۱,۵ سانتیمتری سطح خارجی برای درزه های با عرض ۳ سانتیمتر و عمق ۲,۵ سانتیمتر برای ژوئن با عرض ۵ سانتیمتر و سپس با استفاده از ماستیک پلی اورتان بترتیب به عمق ۱,۵ و ۲,۵ سانتیمتر پر شدند. (مانند شکل ۶)

۲-۳-۲ ژوئن های اجرایی:

بحث اصلی این بخش در خصوص نحوه آیینی ژوئنهای اجرایی میباشد. در پروژه تصفیه خانه ششم تهران مهندس طراح، ابعاد شکاف محل درز را ۲ سانتیمتر در عرض و ۴

سانتیمتر در عمق در نظر گرفته که میبایست با ماستیک پلی اورتان مناسب پر می شدند.

در بررسی های اولیه ملاحظه شد مشکلات حائز اهمیتی در عملکرد این طرح به لحاظ آب بندی درز بوجود خواهد آمد. اولین مرحله بررسی های یاد شده بازدید بود که یکسال پیش از آن از یکی از پروژه های آبی بعمل آمده بود. در زمان آگیری ابتدایی پروژه یاد شده ملاحظه گردید که بخشی از درزه های انبساطی و اجرایی آییند نبوده و امکان آگیری برخی از بخشهای فرآیندی پروژه مهیا نبود. پس از بررسی های فراوان ملاحظه شد که در خصوص آیینی ژوئن های انبساطی با ماستیک پلی اورتان، آماده سازی سطوح بتن در دو وجه کناری ژوئن به درستی انجام نپذیرفته و لذا اتصال پایدار و مستحکم بین ماستیک و بتن نامناسب بوده و پس از آگیری براحتی از محل خود خارج

در محل درز و سپس پر کردن داخل آن با ماستیک پلی اورتان بود. در ابتدا تمامی درز های اجرایی کل پروژه در محل سازه های فرآیندی بدقت مورد بازبینی قرار گرفت. پس از پیمایش بعمل آمده ملاحظه شد بتن های همجوار درزه های اجرایی (حداقل در یک سمت درز) دارای تراکم کامل نمیباشد. شایان ذکر است این موضوع بدلیل سیستم طره ای دیواره ها تاثیری در عملکرد سازه ای عضو نداشته ولی به لحاظ آییندی میتواندست در زمان آگیری پروژه را با مشکل مواجه نماید.

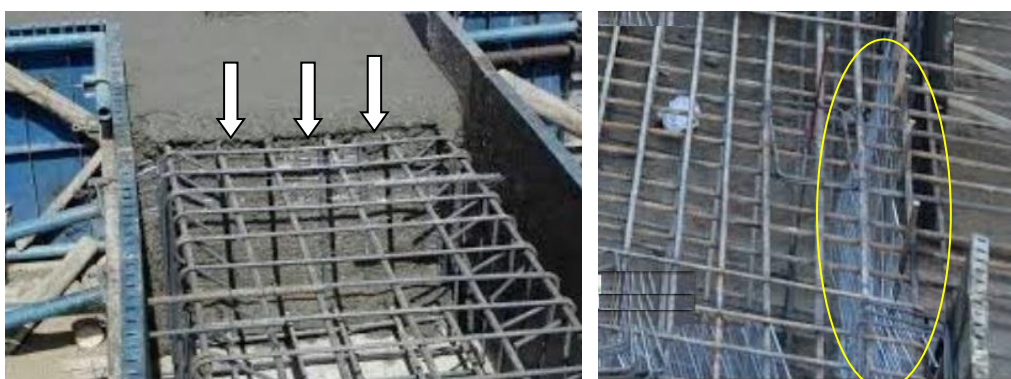
بررسی های بیشتر، روش اجرای بتن در محل ژوئن های اجرایی را مورد توجه قرار داد. دیوارها و دال های پروژه عموماً "به پارتهای ۴ و ۶ یا ۹ متری (حسب مورد - با توجه به نقشه اجرایی مصوب) تقسیم میگردد. برای اجرای هر بخش با توجه به عبور آرماتور از محل درز اجرایی امکان قالب بندی کامل با انسداد ضخامت مقطع بتنی (بعنوان مثال سربندی با استفاده از چوب و یا قالب فلزی) وجود نداشته و بالاجبار از رابیتس بعنوان قالب موقت جهت سربندی ضخامت عضو بتنی استفاده گردید. شکل ۱۱ استفاده نمونه ای از رابیتس را بعنوان قالب موقت محل درز اجرایی فونداسیون نشان داده است.

شده و لذا درز با تراوش آب مواجه گردید. وضعیت مشابهی در خصوص تراوش آب از محل درز اجرایی ملاحظه گردید. بگونه ای که آب از بتن اطراف شیار پر شده با ماستیک، بداخل بتن مجاور ژوئن نفوذ کرده و به سمت دیگر عضو تراوش می نمود. (شایان ذکر است اصلاحیات لازم در آن پروژه بعمل آمده و پس از تعویض ماستیک های اجرا شده در ژوئن های انبساطی و تغییر روش اجرای ژوئن های اجرایی آگیری تکمیل گردید).

این دو موضوع سبب شد روش اجرای آییندی در تصفیه خانه ششم آب تهران مورد بازبینی قرار گرفته و پس از یکسال مطالعه، مهندسی ارزش روش درز بندی و آییندی اعضای بتنی سازه های فرآیندی این پروژه تهیه و مورد تایید طراح و در پیامد آن به تصویب کارفرما رسیده و به مورد اجرا قرار گرفت.

۳-۳ مهندسی ارزش درز بندی و آییندی سازه های فرآیندی تصفیه خانه ششم آب تهران

نخستین موردی که در پروسه تغییر روش اجرای آییندی درزه ها میبایست مورد تحقیق قرار میگرفت دلیل عمل نکردن (آبند نکردن) روش ارائه شده طراح بصورت ایجاد شکاف ۲ در ۴ سانتیمتری (عرض ۲ و عمق ۴ سانتیمتر)

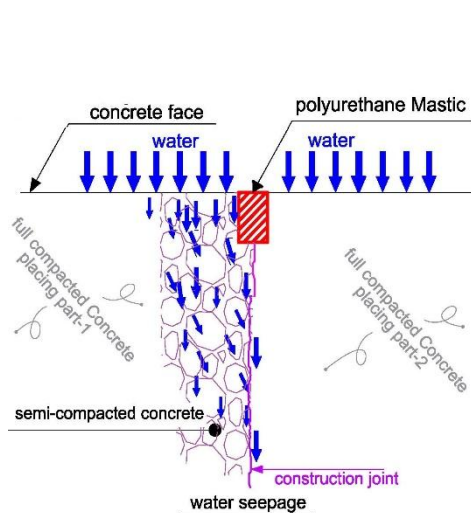


شکل ۱۱- استفاده از رابیتس بعنوان قالب موقت در محل درز های اجرایی فونداسیون

ویراسیون کامل در مجاورت درز وجود نداشت. پس از اتمام بتن ریزی و گیرش اولیه آن رابیتس موجود در محل درز کنده شده و پس از قالب بندی پارت بعدی عضو بتنی، بتن ریزی این مقطع نیز اجرا و بدلیل بسته بودن مقطع از یک سمت درز (بدلیل بتن ریزی پارت قبلی و عدم امکان فرار بتن از این محل) ویراسیون بتن در پارت دوم در مجاورت درز بخوبی قابل انجام بود. (شکل ۱۲). همانگونه که ملاحظه میشود بتن یک سمت درز بخوبی متراکم شده

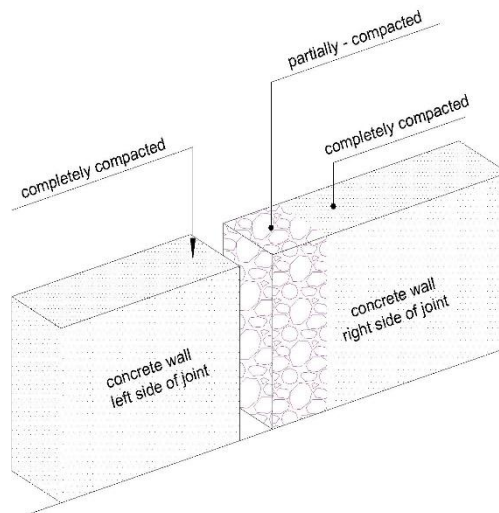
در زمان بتن ریزی بدلیل فرار دوغاب بتن از لابلای چشمه های باز رابیتس امکان ویراسیون کامل بتن در این مقطع وجود ندارد. شایان ذکر است نظر به بالا بودن میزان روانی بتن (اسلامپ) (جدول شماره ۱ - طرح شماره ۱۴۵-۲-C) با معطل نگه داشتن تراک میکسر بتن در پای کار با گذشت زمان اسلامپ بتن پس از ۳۰ دقیقه از زمان ساخت از ۱۹ به ۱۵ سانتیمتر کاهش یافت و بدین سبب پتانسیل فرار دوغاب بتن به حداقل رسید ولی باز هم امکان

دیوار حرک نماید. لذا طرح آبنبدی اولیه میبایست تغییر یافته بگونه ای که گزینه جایگزین بتواند ضمن تامین شرایط بهره برداری با ایجاد پوشش بر روی بتن از تراوش آب جلوگیری نماید.



شکل ۲-۱۲- تراوش آب در اثر دور زدن ماستیک در محل درز اجرایی

و امکان نفوذ آب بداخل آن به حداقل ممکن می رسد ولی بتن سمت دیگر درز که در بتن ریزی پارت اول عضو بتنی بدون ویبراسیون (یا با حداقل ویبراسیون) اجرا شده بود دارای آبگذری بیشتری بوده بگونه ای که بنظر میرسد آب بتواند شکاف پر شده با ماستیک را دور زده و به سمت دیگر



شکل ۱-۱۲- بتن نیمه تراکم یافته در محل درز اجرایی

بالای قابل تحمل ۲۰۰٪ تا ۳۰۰٪ در دستور کار قرار گرفت.

از طرف مقابل در ژوئن های اجرایی بدلیل عبور آرماتور از محل ژوئن، مصالح درز جزئی از بدنه اصلی سازه بوده و لذا میزان کرنش بتن در محل درز به همان میزان کرنش اعضای بتن آرمه محدود می گردید (۰٫۳٪ الی ۰٫۵٪) و لذا ضرورتی به استفاده از ماده ای مانند ماستیک پلی اورتان با کشسانی بالا که تماماً برای استفاده در محل درزهای انبساطی طراحی و ساخته میشوند و دارای هزینه زیاد، صعوبت اجرا و حساسیت بالای کیفیت اجرا هستند نمیشد. (بر خلاف طرحی که عمده طراحان برای درز بندی ژوئن های اجرایی ارائه می کنند).

بدین سبب بجای ماستیک پلی اورتان از مواد پایه سیمانی پلیمری (اصلاح شده با لاتکس) که همانند بتن دارای پایه سیمانی بوده و تطابق ساختاری با بستر بتنی محل درز داشته و همچنین دارای ویژگی بسیار مهم آبنبدی مدخل ورودی درز و بتن های مجاور آن را نیز دارا میباشد استفاده شد.

۳-۳-۱- گزینه جایگزین و ویژگی های مورد نیاز

با توجه به کلیه بررسی های بعمل آمده برای آبنبدی محل درز و بتنهای مجاور آن از گزینه روکش آبنبد پلیمری پایه سیمانی اصلاح شده با لاتکس استفاده شد. در این جایگزین میبایست ویژگی های مورد نیاز با توجه به معیارهای عملکردی گزینه ابتدایی در نظر گرفته می شد. بدین سبب ابتدا ویژگی های مورد نیاز طرح بررسی شده و سپس بررسی گردید که گزینه جایگزین شرایط مورد نیاز را اقماع نماید.

۳-۳-۱- تامین انعطاف پذیری لازم

همانگونه که ذکر شد درزه های موجود در پروژه به دو بخش عمده درزه های انبساطی (Expansion Joint) و درزه های اجرایی (Construction / Contraction Joint) تقسیم شده است. نظر به آنکه حرکت های انبساطی و انقباضی سازه در محل درزه های انبساطی تمرکز می یابد لذا مصالح مورد استفاده جهت پرکردن درزه های یاد شده میبایست دارای انعطاف پذیری بالایی بوده (در پروژه تصفیه خانه ششم ۶۰٪ الی ۲۰۰٪) بگونه ای که هیچگونه مقاومتی در امر حرکت سازه در محل درز بروز ننماید. بدین لحاظ استفاده از ماستیک پلی اورتان با کشسانی

از بتن

همانگونه که میبایست ماده درزبند اولیه (ماستیک) جهت عملکرد اصلی خود به سطح بتن به درستی متصل شده و دارای چسبندگی کافی جهت عدم جدایش از سطح بستر بتنی خود باشد، مواد مصرفی در گزینه درزبندی جایگزین (روکش آبنند یلمیری) نیز میبایست دارای مقاومت چسبندگی کافی به سطح

EN 1504-2:2004 (E)

Table 5 (continued)

No. of Table 1	Performance Characteristics	Test method	Requirements
1	2	3	4
15	Pull-off test Reference substrate: MC (0,40) as specified in EN 1766 curing — 28 days for one component systems, cement containing and PCC-systems — 7 days for reactive resin systems.	EN 1542	Average [N/mm ²] Crack-bridging of/ flexible systems without trafficking: >0,8 (0,5) ^b with trafficking: ≥1,5 (1,0) ^b Rigid systems ^a : >1,0 (0,7) ^b ≥2,0 (1,5) ^b
16	Reaction to fire after application	EN 13501-1	Euroclasses
18	Slip/skid resistance	EN 13036-4	Class I: >40 units wet tested (inside dry wet surfaces), Class II: >40 units dry tested (inside dry dry surfaces), Class III: >55 units wet tested (outside) Or acc. to national regulations
20	Artificial weathering according to EN 1062-11:2002, 4.2 (UV-radiation and humidity) only for outside application It shall be tested only white and RAL 7030.	EN 1062-11	After 2 000 h of artificial weathering: no blistering according to EN ISO 4628-2 no cracking according to EN ISO 4628-4 no flaking according to EN ISO 4628-5 Slight colour change, loss of gloss and chalking may be accept Table, but shall be described.
21	Antistatic behaviour	EN 1081	Class I: >10 ⁹ and <10 ⁶ Ω (Explosives) Class II: >10 ⁹ and <10 ⁶ Ω (Explosion hazardous substances)
22	Adhesion on wet concrete (Substrate: MC (0,40))	EN 13578	After loading: a) no blistering according to EN ISO 4628-2 no cracking according to EN ISO 4628-4 no flaking according to EN ISO 4628-5 b) Pull-off-strength >1,5 N/mm ² , the failure shall occur >50 % as concrete rupture This test is relevant for coatings intended to be applied on fresh concrete or concretes with a high moisture content

Boutique AFINOR pour : SIKAFRANCE SA le 16/6/2005 - 11:49

22

آزمایش نفوذ آب در بتن (میلیمتر) (BS EN-12390-8) [7]	آزمایش چسبندگی به سطح - <i>pulloff</i> kg/cm^2 (<i>Mpa</i>) (ASTM C1583) [13]	آزمایش تایید همجواری با آب شرب (BS 6920) [15]
۱۶.۸ الی ۲۴.۳ (۱.۶۸ الی ۲.۴۳)	OK	۱

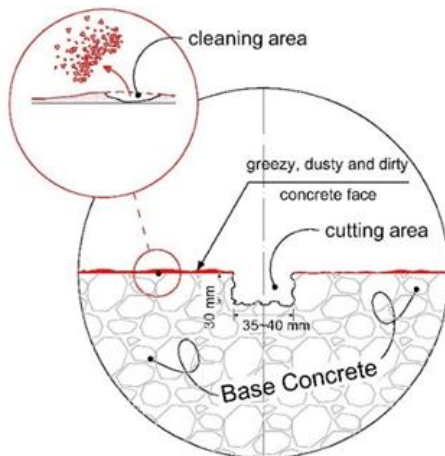
بدین سبب آزمایش مطابق با استاندارد [7] (BS EN 12390-8) نفوذ آب یکی از مهمترین آزمایشات کنترل صحت عملکرد ماده

تفاوت بسیار مهم دو گزینه مورد بحث تامین کامل آببندی در گزینه پیشنهادی، ایجاد روکش آببند بر روی سطوح بتن همجوار درز و عدم امکان نفوذ آب بداخل جسم اصلی بتن بوده در حالیکه گزینه درزبندی با ماستیک تنها عبور مستقیم آب از مدخل ورودی درز را ناممکن می نمود و از احتمال دور زدن آب از کنار و از پشت ماستیک (از مجرای ترکها و کایلارهای ایجاد شده در اثر ضربات دینامیک،

روش اجرا

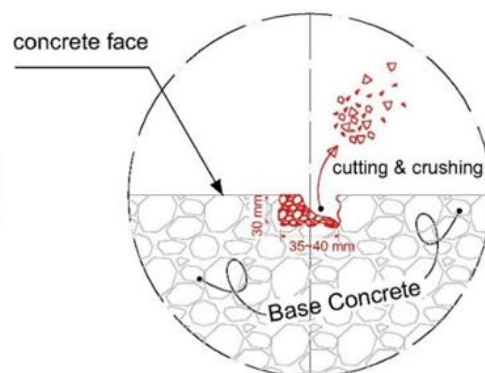
روش اجراء طرح جایگزین بصورت زیر قسمت بندی گردید:

الف- زیرسازی: این مرحله به دو بخش زیرسازی محل درز و زیرسازی سطح بتن مجاور آب تقسیم میگردد. (شکل شماره ۱۳)



شکل ۱۳-۲- آماده سازی محل بتن همجوار آب

روکش آببند بوده که میبایست توسط ماده آببند پلیمری پیشنهادی تامین گردد. در جدول شماره ۷ نتیجه آزمایش آگذری مواد آببند پلیمریپایه سیمانی بر روی بستر بتنی که توسط انستیتومصالح دانشگاه تهران انجام شده ارائه گردیده است. همانگونه که مشاهده میشود ماده روکش آببند مورد استفاده فاقد نفوذ آب میباشد.



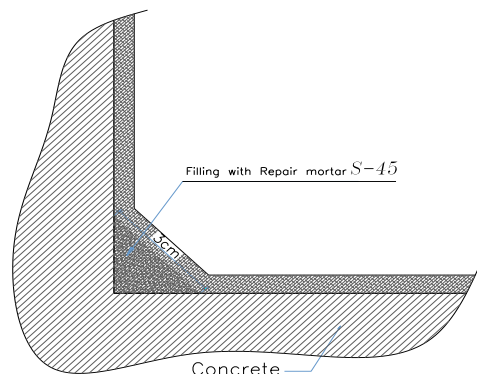
شکل ۱۳-۱- ایجاد ناحیه U-CUT

ج- اجرای ماهیچه: بمنظور جلوگیری از ایجاد کنج قائمه در روکش آببند پلیمری و بروز موی ترک های ناشی از حرکت های زاویه ای روکش در محل کنج، اجرای ماهیچه در محل کنج در دستور کار قرار گرفت و مطابق شکل ۱۴ با استفاده از مواد پرکننده ترمیمی مناسب بصورت لچکی مثلثی شکل با عرض ۳ تا ۵ سانتیمتر ماهیچه اجرا گردید. (بمنظور تقویت چسبندگی ماهیچه به سطح بتن قدیم از پرایمر مناسب استفاده گردید). در خصوص ماهیچه های محل اتصال دیوار و کف با توجه به نزدیکی ماهیچه در محل اتصال کف و دیوار با درز اجرایی پایین دیوار (رامکا)، الزاماً ماهیچه و درز موجود میبایست به صورت تلفیقی و یکپارچه اجرا می شدند که علاوه بر استحکام بیشتر، موجب عدم ایجاد اتصال سرد در فصل مشترک رامکا و ماهیچه گردد. لذا ماهیچه با ابعاد مقطع ۵ سانتیمتر مطابق شکل ۱۴-۲ اجرا

همانگونه که در شکل ۱۳-۱ نشان داده شده برای آماده سازی محل درز ابتدا بتن محل رخنمون درز که دارای بتن غیر متراکم است با سرقلم تخریب تخت ۲۶ میلیمتری (که برای تخریب های کنترل شده استفاده میگردد) با استفاده از چکش تخریب ۶ کیلویی به پهنای ۳۵ تا ۴۰ میلیمتر با عمق متوسط ۳۰ میلیمتر) باز شده و سپس داخل شیار یاد شده پس از شستشوی کامل آماده پرشدن با ماده پرکننده ترمیمی پایه سیمانی با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال گردید. (هم کلاس بتن). در ادامه عملیات زیر سازی، سطح بتن تمیزکاری و زیرسازی شده تا هرگونه آلاینده و غباری از سطح آن زدوده شود. (شکل ۱۳-۲).

ب- اجرای مواد پرکننده داخل درز: در این مرحله پس از اطمینان از تمیزکاری داخل شیار، نسبت به پرکردن آن با ملات تعمیراتی اقدام گردید.

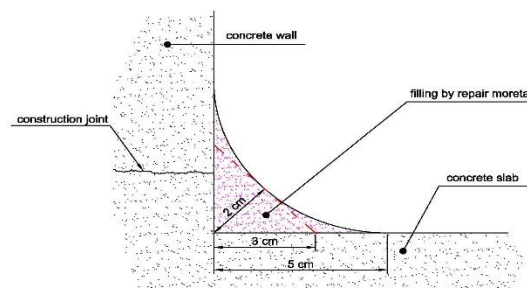
گردید. (جهت ایجاد شکل مناسب ماهیچه از یک لوله ۴ اینچ به عنوان شابلون استفاده گردید). ماهیچه ها در دو دست و با ملات تعمیراتی مناسب با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال (مشابه بتن فرآیندی پروژه با کلاس C35) طبق دستورالعمل سازنده اجرا گردید.



شکل ۱-۱۴- اجرای ماهیچه در محل اتصال دیوارهای مجاور آب

۳-۴-۱ مقایسه هزینه انجام عملیات

هزینه انجام عملیات از دو بخش هزینه تامین مواد و مصالح مورد نیاز و هزینه اجرای عملیات تشکیل شده است. در جدول شماره ۹ خلاصه برآورد مقایسه هزینه دو گزینه مورد بحث ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه میگردد میزان هزینه درز بندی ژوئن ها با استفاده از ماستیک پلی اورتان ۱۱۱,۵ میلیارد ریال و روش پیشنهادی درز بندی با مواد آببند پلیمری ۸۷,۱ میلیارد ریال برآورد شده که نشاندهنده صرفه جویی اقتصادی به میزان ۲۴,۵ میلیارد ریال میباشد (۲۸,۱٪ صرفه جویی اقتصادی).



شکل ۲-۱۴- اجرای ماهیچه در محل اتصال دیواره مجاور آب به کف

۳-۴-۲ مقایسه هزینه و زمانبندی گزینه جایگزین با طرح اولیه

هر فرآیند مهندسی ارزش از سه رکن اصلی ارتقاء کیفیت و رفع مشکلات کیفیتی، کاهش زمان عملیات اجرایی و در نهایت کاهش هزینه تمام شده

جدول ۹- مقایسه اقتصادی گزینه های درزبندی ژوئنهای اجرایی

شماره گزینه	شرح	روش	بهای کل با اعمال ضرایب بالاسری
۱	طرح اولیه درزبندی ژوئنهای اجرایی	استفاده از ماستیک پلی اورتان	۱۱۱,۵۲۵,۸۰۰,۹۸۴
۲	طرح مهندسی ارزش شده درزبندی و آببندی ژوئن های اجرایی	استفاده از مواد آببند پلیمری پایه سیمانی اصلاح شده با لاتکس	۸۷,۰۶۷,۸۷۹,۹۰۶
مابه التفاوت			۲۴,۴۵۷,۹۲۱,۰۷۸

۳-۴-۱ مقایسه مدت زمان اجرای عملیات

زمان اجرا گزینه استفاده از ماستیک پلی اورتان، حساسیت بالای کیفیت ماستیک بر روی نحوه اجرا آن است. بدین سبب سرعت اجرای پرکردن درز با ماستیک بسیار کند تر از اجرای روکش آبنند پلیمری بر روی تمام سطوح بتنی همجوار آب میباشد. این امر سبب کاهش مدت زمان اجرا از ۳۱۶ روز به ۱۹۳ روز برای گزینه اجرای روکش آبنند نسبت به اجرای ماستیک (با بکارگیری ۴ اکیپ کاری همزمان) بوده است.

با عنایت به تحلیل زمانی انجام شده بر روی انسداد و آبنندی درزهای اجرایی در هر یک از دو روش مورد بحث، خلاصه نتایج راندمان هر یک از دو روش ذکر شده در جدول ۱۰ ارائه شده است. بر این اساس سرعت اجرای عملیات آبنندی ژوئن های اجرایی در گزینه استفاده از مواد آبنند پلیمری بیش از ۱,۶۵ برابر بیشتر از روش استفاده از ماستیک پلی اورتان میباشد. دلیل عمده افزایش مدت

جدول ۱۰- مقایسه سرعت انجام عملیات اجرایی انسداد و آبنندی درزها با "ماده آبنند کننده پلیمری" با "ماستیک پلی اورتان"

ردیف	روش اجرا		متوسط راندمان عملیات اجرایی (متر در روز)	حجم عملیات در کل پروژه	مدت زمان لازم برای انسداد و آبنندی درز در کل پروژه با ۴ اکیپ همزمان - (روز)
	ماده مصرفی	هدف از عملیات			
۱	ماستیک پلی اورتان	انسداد درز	۳۰,۵	۳۸,۶۲۰ متر	۳۱۶
۲	ماده آبنند پلیمری	انسداد درز و ببنندی سازه	۵۰,۰	طول درز	۱۹۳

۴- جمع بندی

الف- هزینه درزبندی با ماستیک ۱۱۱,۵ میلیارد ریال و با مواد آبنند پلیمری ۸۷,۱ ریال برآورد شده که نشاندهنده صرفه جویی ۲۴,۵ میلیارد ریالی (۲۸,۱٪) گزینه مهندسی ارزش شده آبنندی با روکش آبنند پلیمری کل سطوح بتنی همجوار آب نسبت به درزبندی ژوئنهای اجرایی با ماستیک میباشد.

ب- سرعت اجرای عملیات گزینه استفاده از مواد آبنند پلیمری ۵۰ متر درزبندی در روز بوده (مدت زمان اجرای زیر سازی و روسازی کل بتن همجوار آب با روکش آبنند پلیمری تقسیم بر طول کل درزه های اجرایی بتن) در حالیکه راندمان انجام عملیات درزبندی با ماستیک ۳۰,۵ متر در روز (مدت زمان اجرای شیار و انجام ماستیک پلی اورتان در داخل

شیار تقسیم بر طول کل درزه های اجرایی بتن) برای هر اکیپ میباشد. (با بکار گیری ۴ اکیپ ورزیده مستقل از هم مدت زمان اجرای گزینه ماستیک ۳۱۶ روز بوده در حالیکه این زمان برای گزینه استفاده از مواد آبنند پلیمری ۱۹۳ روز میباشد).

ج- انجام درزبندی و روکش کاری کل سطوح بتنی با مواد آبنند پلیمری (گزینه مهندسی ارزش شده) امکان نشت آب را از درزه ها و سازه های بتنی پروژه بطور کلی از بین برده در حالیکه درزبندی ژوئنهای اجرایی با ماستیک پلی اورتان تنها مدخل نفوذ مستقیم آب از محل ژوئنهای اجرایی را مسدود کرده ولی پتانسیل نشت آب از کناره های درز به شدت بالا بوده و هیچگونه تضمینی برای آبنندی سازه های فرآیندی در این گزینه وجود نخواهد داشت.

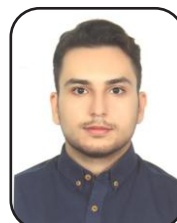
- [۱] تهرانی، ع. (۱۳۶۸). "تمدن دره سند". شماره ۶۲.
- [۲] "سد الکفره". در دانشنامه ژولی دیتای عربی، بازبینی شده در ۱۶ اوت ۲۰۱۸.
- [۳] "منحصربفرد ترین سدهای جهان را بشناسید". سایت جام جم آنلاین، ۲۸ خرداد ۱۳۹۸.
- [۴] ماری . بی. نیکول، (ملک زاده، م.ج. - مترجم) (۱۳۹۳). "بندهای باستانی دره درودزن - شاهکارهای مهندسی سد سازی هخامنشیان". ویرایش اول، انتشارات نوید شیراز.
- [۵] بنا، ع.ر.(مدیر داخلی پایگاه حفاظت و مرمت چغازنبیل و هفت تپه)، (۲۱ اسفند ۱۳۹۰). "آیا قدیمی ترین تصفیه خانه جهان در چغازنبیل است؟". پایگاه هنر نیوز- کد خبر ۳۸۴۷۲.
- [۶] ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی (۱۳۷۴). نشریه شماره ۱۲۳، معاونت امور فنی، دفتر تحقیقات و برنامه ریزی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [7] EN British standard, "Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure", EN12390-8, 2019
- [8] DIN, "Testing concrete; testing of hardened concrete", DIN 1048-5, 1991
- [9] USBR, "Procedure for determining water permeability of concrete", United States. Bureau of Reclamation, USBR 4913, 1992
- [10] CRD, "Standard Test Method for Water Permeability of Concrete", CRD C48, 1992
- [11] ASTM, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM C1202, 2005
- [۱۲] آیین نامه بتن ایران، تجدید نظر دوم (۱۴۰۰). نشریه شماره ۱۲۰، معاونت امور فنی و تدوین معیارها، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [۱۳] ASTM, "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)", ASTM C1583, 2004
- [14] EN French standard, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity", table 6- item 15, NF EN 1504-2, 2005
- [15] BS, "Suitability of non-metallic products for use in contact with water intended for human consumption with regard to their effect on the quality of the water" - part 1, Specification, BS 6920-1, 2000

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر مقادیر الیاف ماکروسنتتیک بر پیوستگی میلگردهای کامپوزیت پلیمری و بتن سبک



اویس افضلی ننیز

دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت
دبیر شهید رجایی، مدیر ارشد آزمایشگاه بتن و مدیر
تحقیق و توسعه شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان



علیرضا دوست محمدی

کارشناسی ارشد زلزله- دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
عضو حقیقی انجمن بتن ایران

چکیده

تامین طول مهاری یا استفاده از خم در میلگردها یکی از روش‌های رایج برای تامین مقاومت پیوستگی بتن با آن می‌باشد. با توجه به اینکه پیوستگی بتن با میلگردهای پلیمری بطور ذاتی به علت شکل ظاهری میلگردهای پلیمری ضعیف می‌باشد، تامین طول مهاری آن در مقایسه با طول مهاری میلگردهای فولادی متفاوت و محافظه کارانه است. در این تحقیق به منظور بررسی اثر بتن الیافی بر طول مهاری لازم برای میلگردهای پلیمری از ۲ نوع بتن به ترتیب شامل بتن سبک (به عنوان شاهد) و بتن سبک الیافی با ۳ طرح اختلاط متفاوت شامل مقادیر مختلف الیاف استفاده شد. بنابراین در این مطالعه با ساخت ۹ نمونه، آزمایش کشش مستقیم میلگرد از بتن انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از بتن سبک به دلیل ضعف ذاتی آن در قفل و بست داخلی سنگدانه‌ها باعث بروز ترک‌های زود هنگام و از دست رفتن مقاومت پیوستگی در مقایسه با بتن معمولی می‌شود. علاوه بر این در طرح مخلوط‌های بتن سبک الیافی که به ترتیب شامل ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی الیاف بودند، نتایج نشان داد که وجود الیاف می‌تواند در به تاخیر انداختن ترک‌ها موثر باشد و این امر منجر به جبران ضعف بتن سبک و افزایش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن سبک می‌شود. با افزایش مقاومت پیوستگی بین میلگرد و بتن، تنش کششی در سطح مقطع میلگرد و متعاقب آن ظرفیت نهایی مقطع بتنی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، مقاومت پیوستگی، میلگردهای کامپوزیت پلیمری، الیاف ماکروسنتتیک.

۱-مقدمه

استفاده از میلگرد بمنظور مسلح کردن بتن یک روش مرسوم می‌باشد. امروزه استفاده از میلگردهای پلیمری به عنوان نسل جدیدی از میلگردها برای

مسلح‌سازی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع وجود مزایایی نظیر مقاومت کششی بالا، مقاومت در برابر شرایط محیطی خورنده، وزن سبک، مقاومت در برابر شرایط ذوب و یخبندان [۱-۴] باعث شده است

این نوع میلگرد به عنوان جایگزین نوع فولادی در ساخت و سازهای با شرایط محیطی نامساعد مطرح شود. با این وجود نداشتن رفتار شکل پذیر، پایین بودن مدول الاستیسیته و مقاومت پیوستگی کمتر در مقایسه با میلگرد فولادی با بتن برای میلگردهای پلیمری نقاط ضعف محسوب می‌شود [۵]. با گسترش استفاده از این نوع میلگردها شناخت و درک مکانیزم عملکرد این دو مصالح در کنار یکدیگر بسیار مورد اهمیت می‌باشد. علاوه بر این کمک می‌کند تا درک صحیحی از رفتار بتن مسلح به میلگرد پلیمری و همچنین تخمین درستی از ظرفیت آن در دسترس باشد. یکی از پارامترهای تاثیرگذار در این مورد رفتار و مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد پلیمری می‌باشد. در واقع وجود پیوستگی عامل رفتار مرکب و انتقال نیرو بین بتن و میلگرد می‌باشد. از فاکتورهای تاثیر گذار بر مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد پلیمری می‌توان قطر میلگرد، طول مدفون میلگرد، مقاومت فشاری بتن، شرایط محصور شدگی میلگرد و شکل ظاهری میلگرد را در نظر گرفت [۶، ۱]. تا کنون مطالعات زیادی روی تاثیر هر یک از پارامترهای مذکور انجام شده است. برای مثال در مطالعه انجام شده توسط بنمکرانه و همکاران [۷] و الزهرانی [۸] بررسی ارتباط بین طول مدفون میلگرد پلیمری و مقاومت پیوستگی آن با بتن انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان داده است برای میلگرد پلیمری با قطر ۱۲/۵ میلیمتر با افزایش دو برابری طول مدفون از ۶۳/۵ به ۱۲۷ میلیمتر مقاومت پیوستگی برای

تمام نمونه‌ها کاهشی در بازه ۱۵ تا ۲۵ درصد به همراه داشت. بنابراین می‌توان گفت افزایش طول مهاری نمی‌تواند به تنهایی راه حل موثری برای افزایش مقاومت پیوستگی بتن با میلگرد پلیمری باشد. در مطالعه دیگری که توسط الزهرانی انجام شد [۹] قطر میلگرد پلیمری به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. بازه قطرهای بررسی شده به ترتیب برابر با ۱۲/۷، ۱۵/۹، ۱۹/۱ و ۲۵/۴ میلیمتر بودند. در این تحقیق طول مدفون ثابت و برابر ۱۲۷ میلیمتر بود. نتایج نشان داد با افزایش قطر میلگرد مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد. یکی از دلایل آن می‌تواند متغیر بودن توزیع تنش برشی در اطراف میلگرد پلیمری باشد. در تحقیقات انجام شده توسط اشرفی و همکاران [۱۰] مقاومت فشاری بتن معمولی با مقادیر ۱۶، ۲۴ و ۳۷ مگاپاسکال به عنوان یکی از متغیرها در نظر گرفته شد. مقادیر مقاومت پیوستگی بدست آمده در این مطالعه به ترتیب برابر با ۹/۳۳، ۹/۵۸ و ۱۰/۴۱ می‌باشد. بنابراین افزایش مقاومت فشاری منجر به افزایش مقاومت پیوستگی می‌شود. تاثیر نوع بتن یکی از پارامترهایی است که مطالعات کمتری در رابطه با آن انجام شده است. زمور و همکاران [۱۱] مقاومت پیوستگی میلگرد پلیمری در بتن معمولی و بتن معمولی خود تراکم را مورد مطالعه قرار دادند. مقاومت پیوستگی در این آزمایش تحت خمش انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از بتن خودتراکم می‌تواند باعث افزایش مقاومت پیوستگی شود. در مطالعه دیگری که توسط وارونا و همکاران [۱۲] انجام شد به بررسی تاثیر

الیاف فولادی در مقاومت پیوستگی میلگردهای فولادی با بتن پرداخت. در این تحقیق مقدار مصرف الیاف ۲۰ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب بود و از دو نوع متفاوت الیاف فولادی به ترتیب با قطر ۰/۷۵ و ۰/۳۵ میلیمتر، طول ۳۵ و ۳۰ میلیمتر، نسبت ابعادی ۴۶/۷ و ۸۵/۷ و مقاومت کششی ۱۲۰۰ و ۳۰۰۰ مگاپاسکال استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از الیاف با نسبت ابعادی بالاتر و مقاومت کششی بیشتر باعث افزایش مقاومت پیوستگی در حدود ۹۰ درصد می‌شود. همچنین در مطالعه دیگری که توسط فخاری فر و همکاران [۱۳] انجام شده است نشان می‌دهد استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بازه ۰/۵ تا ۱ درصد حجمی می‌تواند بطور چشم گیری باعث افزایش خواص مکانیکی بتن و قابلیت کنترل ترک شود. با توجه به گسترش تکنولوژی بتن و استفاده از مصالح نوین مانند میلگردهای پلیمری و بتن سبک در این مقاله سعی شد تا به بررسی رفتار پیوستگی بین میلگرد پلیمری و بتن سبک پرداخته شود. برای این منظور ابتدا مقایسه‌ای بین تاثیر مقاومت فشاری در مقاومت پیوستگی میلگرد با بتن معمولی و بتن سبک انجام شد. سپس با در نظر گرفتن رده مقاومت فشاری یکسان مقایسه‌ای بین مقاومت پیوستگی میلگرد پلیمری با بتن معمولی و بتن سبک انجام گرفت. در

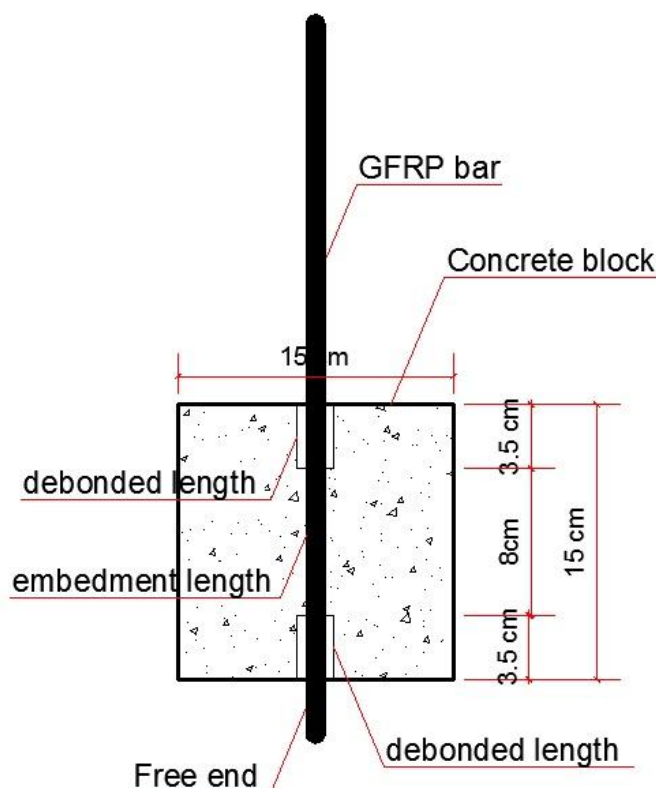
نهایت نیز برای جبران ضعف مقاومت برشی بتن سبک و در نتیجه کاهش مقاومت پیوستگی آن با میلگرد، از الیاف ماکرو سنتتیک با دو مقدار متفاوت استفاده شد.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق از ۲ نوع متفاوت بتن به ترتیب شامل بتن سبک و بتن سبک الیافی برای بررسی مقاومت پیوستگی میلگرد GFRP در انواع بتن استفاده شد. علاوه بر این به منظور بررسی تاثیر الیاف بتن در نوع بتن الیافی از دو طرح اختلاط متفاوت با مقادیر ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی بتن استفاده شد. پس از آماده سازی قالب‌ها، هر یک از میلگردها درون قالب‌های استاندارد مکعب شکل به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر قرار گرفتند. نمونه‌های میلگرد در وسط قالب قرار گرفتند و همچنین وسط کف قالب تمام نمونه‌ها به اندازه‌ی قطر میلگرد سوراخ شد تا انتهای دیگر میلگرد بتواند خارج از قالب قرار گیرد تا میزان لغزش آن در حین آزمایش اندازه گیری شود. در نهایت ۹ نمونه بتنی ساخته شد و مورد آزمایش بیرون کشیدگی مستقیم میلگرد از بتن قرار گرفت. تمامی نمونه‌ها پس از ساخت، ۲۸ روز مورد عمل آوری قرار گرفتند. نهایتاً نمونه‌ها پس از سن ۶۰ روزگی مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها

کد طرح اختلاط	نوع بتن	مقاومت فشاری (MPa)	نوع میلگرد	قطر میلگرد (mm)	طول مدفون میلگرد (mm)
LWC	Light-weight concrete	37	GFRP	8	80
LFRC0.3	Light-weight fiber reinforced concrete	38	GFRP	8	80
LFRC0.5	Light-weight fiber reinforced concrete	36	GFRP	8	80



شکل ۱: جزئیات نمونه‌ها و نحوه قرارگیری میلگرد در بتن

۱-۲ ویژگی‌های مصالح

۱-۱-۲ بتن

نوع ماسه رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳ استفاده شد. درشت دانه مورد استفاده در بتن سبک و سبک الیافی از لیکا با وزن مخصوص ۵۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی هر کد طرح اختلاط در جدول (۳) ارائه شده است. هدف از انتخاب طرح مخلوط‌های ارائه شده در جدول (۳) این است که رابطه مقاومت پیوستگی میلگرد و بتن با درصد مصرف الیاف

در این تحقیق از دو نوع بتن سبک و بتن سبک الیافی با مقادیر متفاوت الیاف استفاده شد. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان تیپ ۲ ساخت کارخانه سیمان تهران با مشخصات شیمیایی ارائه شده در جدول (۲) می‌باشد. در طرح اختلاط هر دو نوع بتن سبک ریزدانه مورد استفاده از

مقایسه شود. بدین منظور ابتدا با در نظر گرفتن مقاومت فشاری تقریباً یکسان بین نمونه شاهد LWC و نمونه‌های LWC0.3 و LWC0.5 تاثیر استفاده از الیاف در مقاومت پیوستگی مشخص می‌شود. با توجه به این موضوع که بطور کلی قفل و بست بتن‌های سبک نسبت به بتن معمولی ضعیف تر می‌باشد و ضعف بتن در ترک خوردگی بتن سبک باعث از بین رفتن پیوستگی می‌شود. برای جبران این ضعف از الیاف ماکروسنتتیک استفاده شد. طرح‌های بتن سبک الیافی با دو درصد حجمی متفاوت به ترتیب ۰/۳ و ۰/۵ انتخاب شد تا تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت پیوستگی ارزیابی شود.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی سیمان

نوع ماده	آنالیز شیمیایی (%)									سطح مخصوص
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O. I	(cm ² /gr)
مقدار	91.7	1.2	1.1	1.7	0.9	0.2	0.5	0.7	2	200000

جدول ۳: طرح اختلاط بتن

کد طرح اختلاط	LWC	LFRC0.3	LFRC0.5
مقاومت فشاری (MPa)	37	38	36
مدول الاستیسیته (MPa)	23720	26550	27610
چگالی (kg/m ³)	1820	1830	1826
درصد حجمی الیاف (%)	0	0.3	0.5
مقدار الیاف (kg/m ³)	0	2.7	4.5
ریزدانه (kg/m ³)	ماسه (900)	ماسه (900)	ماسه (900)
درشت دانه (kg/m ³)	لیکا (220)	لیکا (220)	لیکا (220)
پودر سنگ (kg/m ³)	225	225	225
سیمان (kg/m ³)	390	390	390
w/c	0.4	0.4	0.4
اسلامپ (mm)	90	85	75

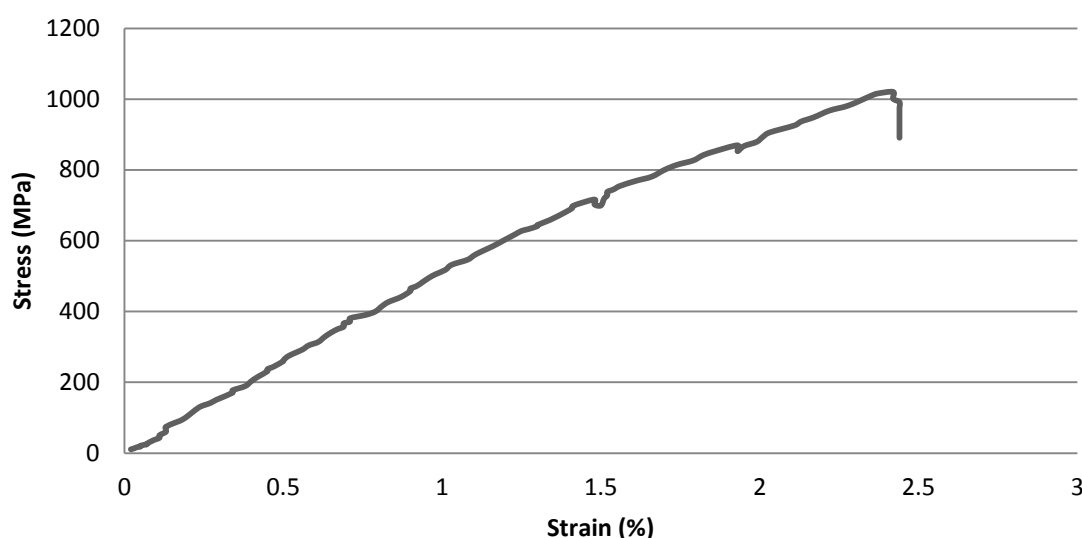
۲-۱-۲ میلگرد پلیمری

اسمی، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، حداکثر مقاومت کششی و کرنش گسیختگی آن در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل ۳: میلگرد GFRP

در این تحقیق در تمامی نمونه‌ها از میلگرد GFRP از نوع شن پاش شده با قطر اسمی ۸ میلیمتر مطابق شکل (۲) استفاده شد. به منظور تعیین خواص مکانیکی میلگرد مطابق استاندارد ASTM-D7205 [۱۴] آزمایش کشش میلگرد انجام شد، نمودار شکل (۳) منحنی تنش - کرنش میلگردهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن شامل قطر



شکل ۴: منحنی تنش کرنش میلگرد GFRP

جدول ۴: مشخصات مکانیکی میلگرد GFRP

نوع میلگرد	قطر (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش (%)	چگالی (gr/cm ³)
GFRP	8	1024	50	2.3	2.2

۲-۱-۳ الیاف

مخلوط‌های بتن سبک الیافی با کد LFRC0.3 و LFRC0.5 به ترتیب با ۰/۳ و ۰/۵ درصد حجمی بتن استفاده شد. جدول (۵) مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف را نشان می‌دهد.

در این تحقیق مطابق شکل (۴) از الیاف ماکروسنتتیک امباس تولید شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان استفاده شد. این الیاف برای طرح

جدول ۵: مشخصات مکانیکی الیاف

چگالی (gr/cm^3)	کرنش (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	نسبت ابعادی (L/D)	طول (mm)	قطر (mm)
0.91	10	5.6	550	100	40	0.4

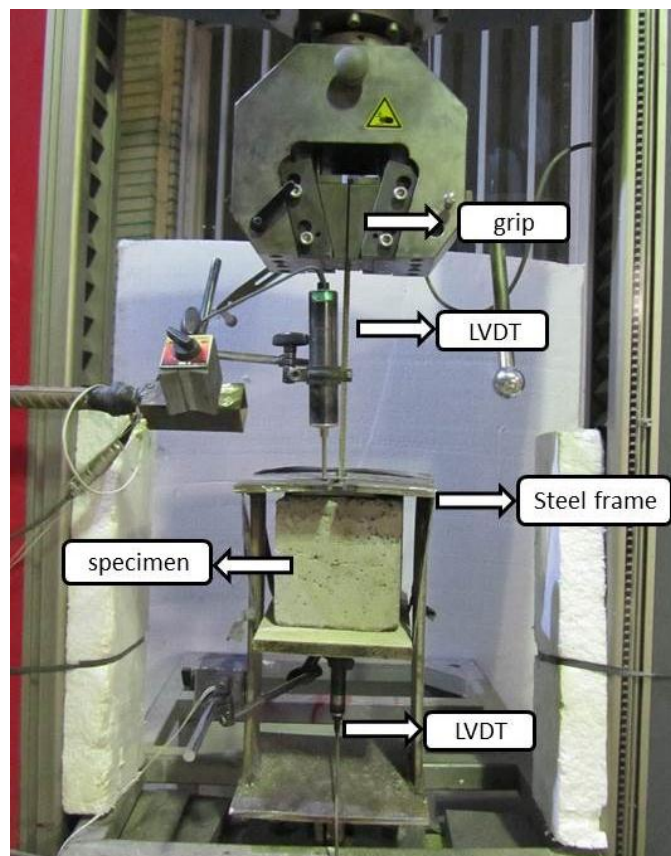


شکل ۴: الیاف ماکروستنتیک امباس تولید شرکت نانوخ و گرانول سیرجان

۲-۲- انجام آزمایش

فولادی نیز اندازه گیری شود. نهایتاً میزان لغزش واقعی میلگرد درون بتن از تفاضل تغییر مکان سنج متصل به انتهای بارگذاری شده از تغییر مکان سنج متصل به انتهای آزاد میلگرد بدست آمد. آزمایش نمونه‌ها بصورت تغییر مکان کنترل و با نرخ بارگذاری ثابت ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه تا جایی ادامه یافت که یکی از موارد الف) گسیختگی میلگرد در کشش، ب) گسیختگی بتن یا ج) لغزیدگی بیش از ۵ میلی‌متر میلگرد با نیروی ثابت اتفاق افتد. شکل (۶) پیکربندی آزمایش به همراه قاب فولادی، تغییر مکان سنج‌ها و دستگاه یونیورسال را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی شرایط پیوستگی میلگرد پلیمری و بتن آزمایش کشش مستقیم میلگرد از بتن مطابق با استاندارد ASTM-D7913 [۱۵] و با استفاده از دستگاه یونیورسال انجام شد. در این روش یک قاب فولادی برای مهار بتن در نظر گرفته شد. نمونه در وسط قاب فولادی قرار گرفت و یک طرف میلگرد درون فک دستگاه قرار گرفت و انتهای آزاد آن به یک سنسور تغییر مکان سنج (LVDT) متصل شد. همچنین یک دستگاه تغییر مکان سنج دیگر بر روی قاب فولادی نصب شد تا تغییر مکان محوری قاب



شکل ۵: پیکربندی آزمایش

تنش کششی ایجاد شده به حداکثر مقاومت کششی میلگرد ($stress - ratio$) محاسبه می‌شود. در این روابط D ، A_{bar} و l به ترتیب، قطر میلگرد، سطح مقطع میلگرد و طول پیوستگی میلگرد می‌باشد. بمنظور دقت بیشتر هر آزمایش سه بار تکرار شد و نتیجه هر یک از پارامترهای مذکور به همراه انحراف از معیار آن در جدول (۶) ارائه شده است.

$$\tau = \frac{P_{max}}{\pi D l} \quad (1)$$

$$f_f = \frac{P_{max}}{A_{bar}} \quad (2)$$

$$stress\ ratio = \frac{f_f}{f_{fu}} \quad (3)$$

۳- بحث و نتایج

پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایش کشش مستقیم میلگرد از بتن در این تحقیق شامل مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد (τ)، حداکثر نیروی کششی در میلگرد (P_{max})، حداکثر تنش کششی ایجاد شده در سطح مقطع میلگرد (f_f)، نسبت تنش کششی ایجاد شده به حداکثر مقاومت کششی سطح مقطع میلگرد ($stress - ratio$) و نوع گسیختگی نمونه می‌باشد. ملاک مقایسه تمامی نمونه‌ها مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد (τ) در نظر گرفته شد که مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. همچنین به کمک روابط (۲) و (۳) حداکثر تنش کششی سطح مقطع میلگرد (f_f) و نسبت

جدول ۶: خلاصه نتایج

نوع گسیختگی	مقاومت پیوستگی (MPa)	نسبت تنش حداکثر به گسیختگی (%)	حداکثر تنش میلگرد (MPa)	بار حداکثر (kN)	کد نمونه
از بین رفتن پیوستگی (شکست بتن)	6.49 (0.65)	25 (3)	259.75 (26.06)	13.05 (1.31)	LWC2
از بین رفتن پیوستگی (شکست بتن)	8.48 (0.79)	33 (3)	339.17 (31.86)	17.04 (1.6)	LFRC1
از بین رفتن پیوستگی (شکست بتن)	9.6 (0.94)	37 (4)	383.96 (37.61)	19.54 (1.57)	LFRC2

اعداد داخل پرانتز مقدار انحراف از معیار را نشان می‌دهد

۳-۱- منحنی بار تغییر مکان

در این قسمت نتایج منحنی بار-لغزیدگی انتهای آزاد میلگرد و نوع گسیختگی برای تمامی نمونه‌ها مقایسه و بررسی می‌شوند. نمودار تنش-لغزیدگی انتهای آزاد میلگرد برای گروه نمونه‌های بتن شاهد و الیافی در شکل (۶) ارائه شده است تا تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد بررسی شود. در نمودار شکل (۶) مشاهده می‌شود در ابتدای آزمایش منحنی بصورت کاملاً عمودی حرکت می‌کند و میلگرد هیچگونه لغزیدگی درون بتن ندارد، علت این امر وجود تنش چسبندگی بین سطح میلگرد و مخلوط سیمان می‌باشد [۱۶]. با از بین رفتن این چسبندگی شیمیایی، مقاومت مکانیکی پیوستگی آغاز می‌شود که ناشی از درگیری سطح میلگرد با بتن می‌باشد. با توجه به نتایج مطالعات پیشین می‌توان ادعا کرد مقاومت چسبندگی ابتدایی وابسته به مقاومت فشاری بتن می‌باشد [۱۶]. و هرچه قدر مقاومت فشاری بتن بیشتر باشد شیب نمودار از نقطه بالاتری آغاز می‌شود [۱۶]. لازم بذکر

است مود گسیختگی در شرایط پیوستگی بین بتن و میلگرد می‌تواند یکی از این سه حالت را شامل شود: ۱- از بین رفتن مقاومت پیوستگی، در این حالت ممکن است آج میلگرد و سطح تماس آن با بتن از میلگرد جدا شود، که در این صورت ضعف مقاومت پیوستگی میلگرد با افزایش مقاومت فشاری بتن یا تغییر نوع آن قابل جبران نمی‌باشد. همچنین در این حالت نوع دیگری از گسیختگی ناشی از ترک خوردگی‌های درون بتن است که می‌تواند باعث کاهش سختی و لغزش میلگرد درون بتن شود که در این صورت افزایش مقاومت فشاری و نوع بتن می‌تواند بر مقدار مقاومت پیوستگی موثر باشد.

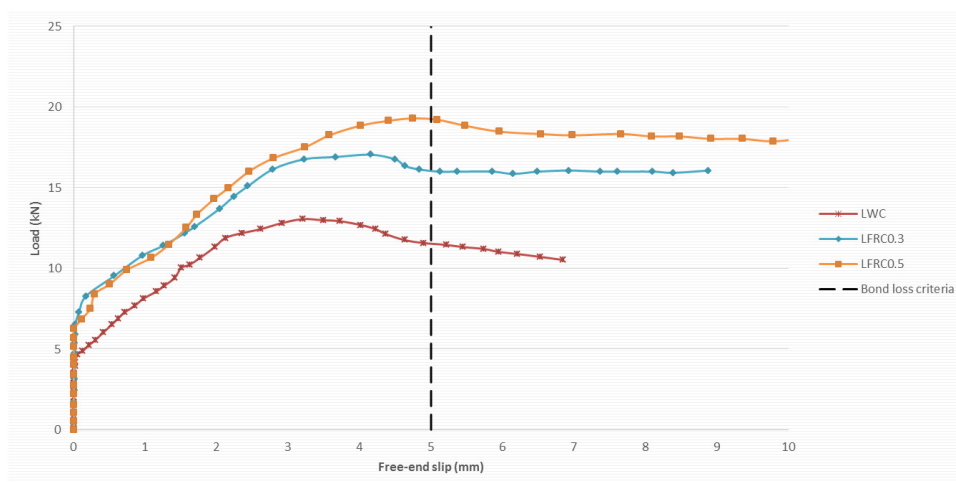
۲- گسیختگی میلگرد، در این حالت در واقع مقاومت پیوستگی بتن تا حدی تامین شده است که از حداکثر ظرفیت کششی میلگرد استفاده می‌شود و گسیختگی در سطح مقطع میلگرد تحت کشش اتفاق می‌افتد.

۳- خوردشدگی بتن، در این حالت به علت ضعف مقاومت فشاری بتن و در نتیجه آن مقاومت برشی،

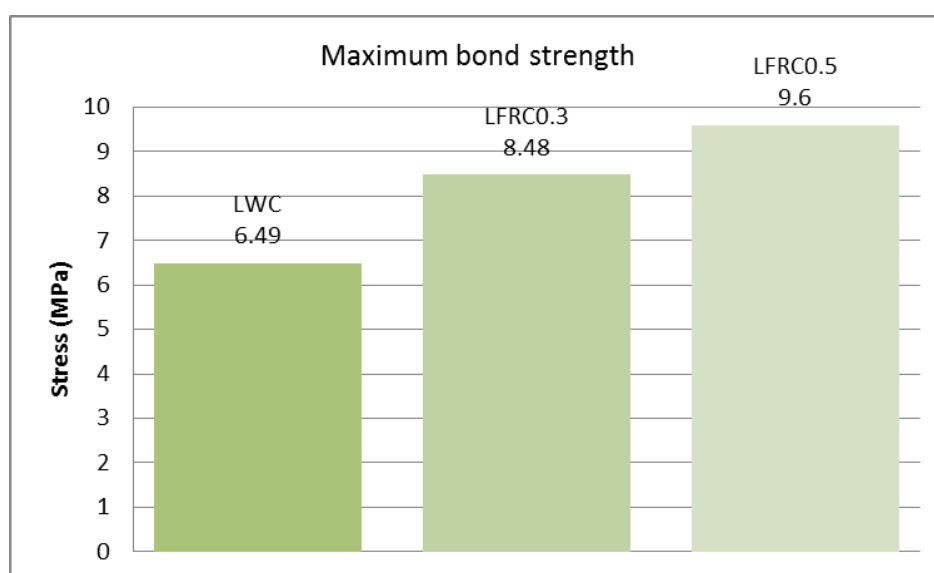
ترک‌های ایجاد شده در سطح بتن ظاهر می‌شود و مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد قبل از رسیدن میلگرد به حداکثر مقاومت کششی آن از بین می‌رود. در تمامی نمونه‌های این تحقیق مود گسیختگی در حالت ۱ و بصورت ظهور ترک خوردگی‌های درون بتن با کاهش سختی و لغزش میلگرد درون بتن اتفاق افتاد. در این آزمایش‌ها معیار از بین رفتن مقاومت پیوستگی با در نظر گرفتن لغزش میلگرد درون بتن تا رسیدن به حد ۵ میلیمتر مشخص شد [۱۷] که این مقدار به عنوان حد پذیرش از بین رفتن مقاومت پیوستگی می‌باشد. این معیار در نمودار شکل (۶) بصورت خط چین نشان داده شده است. اما در تحقیق حاضر آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد از بتن تا حد بالاتر انجام شد که در نمودار در ناحیه پس از خط چین قابل مشاهده می‌باشد. نمودار شکل (۷) حداکثر مقاومت پیوستگی برای نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج هر دو نمونه بتن سبک الیافی در حدود یک رده مقاومت فشاری با درصد حجمی متفاوت الیاف نشان دادند استفاده از الیاف می‌تواند به دلیل کنترل ترک و به تاخیر انداختن آن مقاومت پیوستگی بالاتری را تامین کند. علت این امر پخش همگن رشته‌های الیاف درون مخلوط بتن می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود تعداد زیادی از الیاف‌ها در مسیر ترک‌های برشی قرار بگیرد و از آن بین رفتن مقاومت پیوستگی جلوگیری کند. مقاومت پیوستگی بتن سبک الیافی برای نمونه‌های LFRC0.3 و LFRC0.5 به ترتیب برابر

با ۸/۴۸ و ۹/۶ مگاپاسکال حاصل شد. همچنین لازم بذکر است افزایش درصد حجمی الیاف از ۰/۳ به ۰/۵ باعث افزایش ۱۳ درصدی مقاومت پیوستگی شد.

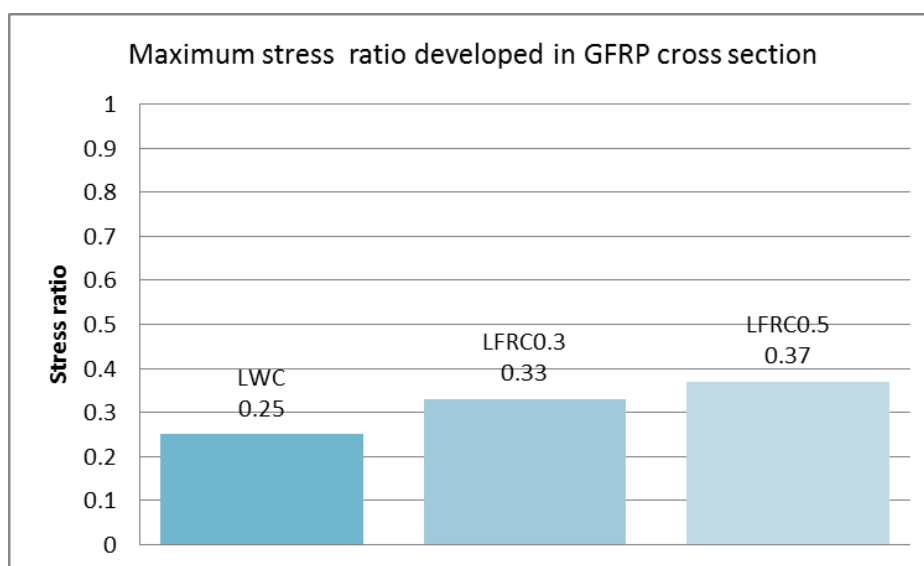
نمودار شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب حداکثر تنش ایجاد شده در سطح مقطع میلگرد و نسبت حداکثر تنش کششی ایجاد شده در میلگرد به مقاومت گسیختگی نهایی آن را نشان می‌دهد. در واقع می‌توان گفت نمودار شکل (۹) حداکثر ظرفیت قابل استفاده از میلگرد GFRP را تا قبل از از بین رفتن پیوستگی نشان می‌دهد. حداکثر ظرفیت کششی قابل استفاده میلگرد به ترتیب برابر با ۰/۳۷ ، ۰/۳۳ و ۰/۲۵ برای نمونه‌های LFRC2 ، LFRC1 ، LWC2 می‌باشد. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد استفاده از الیاف می‌تواند تا حد قابل توجهی ظرفیت قابل استفاده از میلگردهای GFRP را در بتن سبک افزایش دهد. بطور کلی با توجه به نتایج مذکور می‌توان گفت استفاده از میلگردهای GFRP بدون مهار مناسب باعث می‌شود تا کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت کششی آنها در اعضای بتنی قابل وصول باشد که این موضوع منجر به کاهش ظرفیت نهایی مقطع بتنی، افزایش عرض ترک‌های ایجاد شده و گسیختگی زود هنگام آن می‌شود. بنابراین لازم است تا با توجه به الزامات طراحی و سطح تنش مورد نیاز در سطح مقطع میلگرد از نوع بتن مناسب استفاده شود.



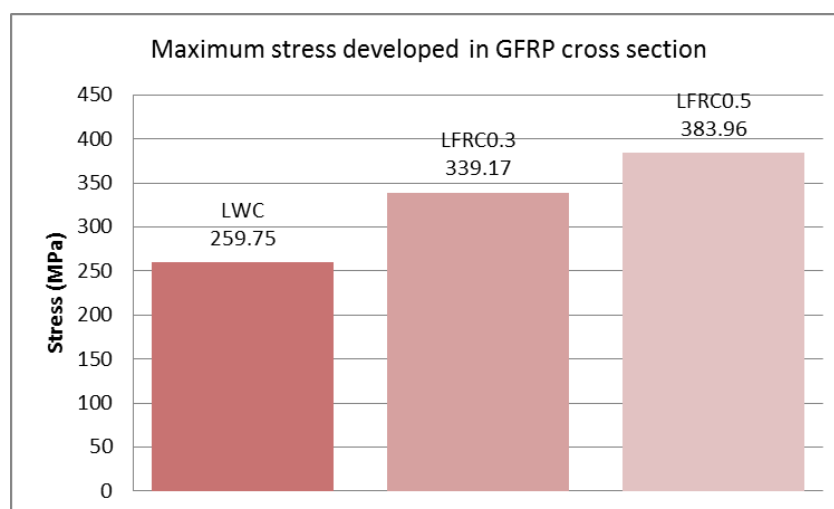
شکل ۶: منحنی تنش کرنش



شکل ۷: حداکثر تنش مقاومت پیوستگی بین بتن و میلگرد



شکل ۸: حداکثر تنش کششی ایجاد شده در میلگرد



شکل ۹: حداکثر تنش کششی ایجاد شده در میلگرد نسبت به تنش گسیختگی آن

۴- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش کشش مستقیم میلگرد از بتن می‌توان در جمع بندی و نتیجه گیری به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بدون استفاده از مهار مناسب درون بتن میلگردهای GFRP نمی‌توانند از حداکثر ظرفیت کششی خود استفاده کنند.

۲- میلگردهای GFRP به علت نوع ظاهر آن در آج در مقایسه با میلگردهای فولادی مقاومت پیوستگی کمتری با بتن دارد.

۳- ضعف مقاومت پیوستگی بتن سبک تا حدی با استفاده از الیاف قابل جبران می‌باشد.

۴- افزایش درصد الیاف باعث افزایش مقاومت پیوستگی و در نتیجه میلگرد GFRP می‌تواند به سطوح بالاتری از تنش در مقطع بتنی برسد.

۵- مراجع

- [1] Hao, Q. D., Wang, B., & Ou, J. P. (2006). Fiber reinforced polymer rebar's application to civil engineering. *Concrete*, 9(1), 38-40.
- [2] M. Bazli, H. Ashrafi, A.V. Oskouei, Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles, *Composites Part B* 99 (2016) 203–215.
- [3] J. Alves, A. El-Ragaby, E. El-Salakawy, Durability of GFRP bars' bond to concrete under different loading and environmental conditions, *J. Compos. Constr.* 15 (3) (2010) 249–262.
- [4] P. Feng, J. Wang, Y. Wang, D. Loughery, D. Niu, Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates, *Composites Part B* 67 (2014) 427–433.
- [5] N. Saleh, A. Ashour, D. Lam, T. Sheehan, Experimental investigation of bond behaviour of two common GFRP bar types in high – Strength concrete, *Constr. Build. Mater* 201 (2019) 610-622.
- [6] Soong, W. H., Raghavan, J., & Rizkalla, S. H. (2011). Fundamental mechanisms of bonding of glass fiber reinforced polymer reinforcement to concrete. *Construction and building Materials*, 25(6), 2813-2821.
- [7] Benmokrane B, Maceachern M, That TT, Zhang B. Evaluation of bond characteristics of GFRP rebars embedded in polymer and normal cement concrete. Technical report no. 7, University of Sherbrooke; 1999.

- [8] Al-Zahrani MM. *Bond behavior of fiber reinforced plastic reinforcements with concrete*. PhD thesis, University Park, Pennsylvania, Pennsylvania State University, USA; 1995.
- [9] Al-Zharani M, Mesfer M, Al-Dulaijian SU, Nanni A, Bakis CE, Boothby TE. *Evaluation of bond using FRP bars with axisymmetric deformations*. *Constr Build Mater* 1999;13(6):299–309.
- [10] Ashrafi, H., Bazli, M., & Oskouei, A. V. (2017). *Enhancement of bond characteristics of ribbed-surface GFRP bars with concrete by using carbon fiber mat anchorage*. *Construction and Building Materials*, 134, 507-519.
- [11] Zemour, N., Asadian, A., Ahmed, E. A., Khayat, K. H., & Benmokrane, B. (2018). *Experimental study on the bond behavior of GFRP bars in normal and self-consolidating concrete*. *Construction and Building Materials*, 189, 869-881.
- [12] Varona, F. B., Baeza, F. J., Bru, D., & Ivorra, S. (2018). *Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure*. *Construction and Building Materials*, 176, 359-370.
- [13] Fakharifar, M., Dalvand, A., Arezoumandi, M., Sharbatdar, M. K., Chen, G., & Kheyroddin, A. (2014). *Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites*. *Construction and Building Materials*, 71, 510-520.
- [14] ASTM D7913 / D7913M-14. *Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing*. West Conshohocken PA; 2014.
- [15] ASTM D7913 / D7913M-14. *Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing*. West Conshohocken PA; 2014.
- [16] Ashrafi H, Bazli M, Oskouei AV. *Enhancement of bond characteristics of ribbed-surface GFRP bars with concrete by using carbon fiber mat anchorage*. *Constr Build Mater* 2017;134:507–19. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.083.
- [17] C.S. Association, *Design and Construction of Building Components with Fibrereinforced Polymers*, Canadian Standards Association, 2002.
- [18] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars (ACI 440.1R-15)*. American Concrete Institute Farmington Hills, MI; 2015.
- [19] Canadian Standards Association. *S806-12 - Design And Construction Of Building Structures With Fibre-Reinforced Polymers (CSA S806-2012 (R2017))*. Canadian Standards Association; 2012.
- [20] Wambeke, B. W., & Shield, C. K. (2006). *Development length of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete*. *ACI Structural Journal*, 103(1), 11.