

نقشه راه جهانی صنعت سیمان و بتن تا سال ۲۰۵۰

و لزوم تهیه نقشه راه ایران



مهدی سرخان‌پور
معاونت تحقیق و توسعه سیمان تهران



محسن تدین
رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران



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

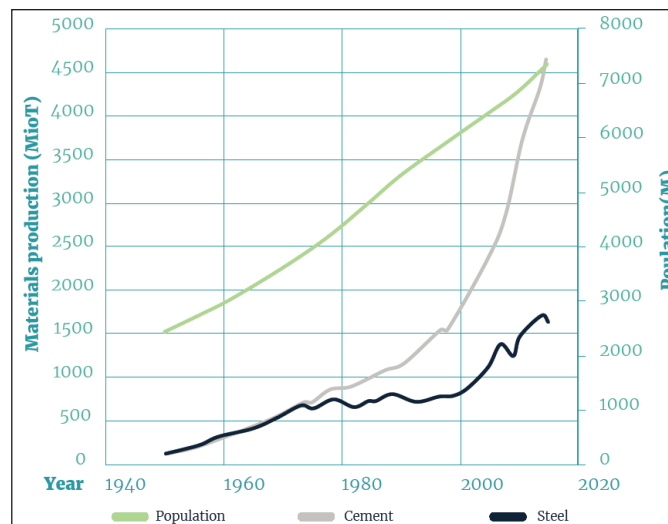
چکیده

به منظور دستیابی به اهداف توافقنامه پاریس (کاهش دمای کره زمین)، کاهش انتشار دی اکسید کربن برای انواع فعالیت‌های بشری مورد نیاز است. صنعت سیمان و بتن نیز یکی از موثرترین بخش‌ها در تامین اهداف این سند می‌باشد. بر این اساس جهت توسعه پایدار، نقشه راه جهانی صنعت سیمان و بتن تا سال ۲۰۵۰ تهیه و شاخص‌های مربوطه ارائه شده است. در این مقاله ضمن معرفی این نقشه به وضعیت شاخص‌ها در ایران پرداخته می‌شود. کلمات کلیدی: سیمان، بتن، نقشه راه، دی اکسید کربن، گازهای گلخانه‌ای، کلینکر، سوخت.

۱- مقدمه

ساختار اقتصاد ایران با رویکرد توسعه پایدار که از طریق یک الگوی پیشنهادی بر اساس مفهوم توسعه پایدار ارائه شده است، سهم ساخت و ساز (امور عمرانی) حدود ۴٪ از اقتصاد کشور را به خود اختصاص می‌دهد که البته صنعت سیمان (و فولاد)، نقش بسیار مهمی در این زمینه دارد. بررسی روند تولید سیمان و فولاد خام در مقایسه با رشد جمعیت، ضرورت توجه به صنعت سیمان را نشان می‌دهد (نمودار ۱) [۲].

از هم‌اکنون تا سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان از ۷ به ۹ میلیارد افزایش می‌یابد، که بطور عمده در مناطق شهری است و در نتیجه نیاز به زیرساخت‌ها و مسکن افزایش می‌یابد و منتهی به افزایش تقاضا برای انرژی و مواد می‌شود. این افزایش به درازا می‌کشد در حالیکه منابع فعلی محدود هستند [۱]. بر اساس نتایج مطالعه ارزیابی



نمودار ۱- بررسی روند تولید سیمان و فولاد خام در مقایسه با رشد جمعیت.

۲- معرفی نقشه جهانی راه:

طی سال‌های اخیر با توجه به رشد آگاهی از گرم شدن کره زمین، نگرانی در مورد تاثیر انتشار کربن‌های آلاینده در جهان افزایش یافته است. به ازای تولید هر تن سیمان حدود یک تن دی اکسید کربن (CO_2) ایجاد می‌شود [۵] که دارای سهم بالایی از انتشار این گاز سمی و کاملاً مضر برای لایه ازن می‌باشد. این امر صنعت سیمان را به عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای انسان معرفی می‌نماید. تقریباً ۵٪ از انتشار جهانی گاز CO_2 مربوطه به تولید سیمان است که سومین منبع بزرگ انتشار کربن (درست بعد از صنایع شیمیایی و فولاد) است. همچنین برای تولید سیمان، علاوه بر انتشار دی اکسید کربن (CO_2)، میلیون‌ها تن گرد و غبار کوره سیمان (CKD^1) ایجاد می‌شود که هر ساله باعث ایجاد خطرات تنفسی و آلودگی می‌شود. به منظور دستیابی به اهداف توافقنامه پاریس (کاهش دمای کره زمین)، کاهش انتشار کربن برای انواع فعالیت‌های بشری مورد نیاز است. حدود ۵۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوخت‌های فسیلی است که

واضح است که در اسکلت ساختمان‌ها، سیمان و فولاد مصرف می‌گردد و بطور مقایسه‌ای در تولید فولاد، انرژی بیشتری نسبت به تولید سیمان صرف می‌شود. از طرف دیگر، مصرف فولاد و سازه‌های فلزی هزینه بیشتری به ساختمان تحمیل می‌نماید. به زعم کارشناسان و به علل مختلف، مصرف سیمان در ساختمان‌ها (سازه‌های بتنی) نسبت به فولاد (سازه‌های فلزی) ارجحیت دارد. بنابراین توجه به مسائل آتی صنعت سیمان بسیار مهم است.

بر اساس برنامه راهبردی توسعه صنعت سیمان، چشم‌انداز کسب جایگاه سوم جهان با ظرفیت تولید سالیانه ۱۲۰ میلیون تن و رتبه اول در صادرات جهانی و ظرفیت تولید در منطقه توسط وزارت صنعت، معدن و تجارت هدف‌گذاری شده است [۳]. ظرفیت تولید اسمی بالقوه صنعت سیمان کشور در چشم‌انداز ۱۴۰۰ حدود ۹۸ میلیون تن خواهد بود. با بهره‌گیری مناسب از افزودنی‌های پودری (مکمل سیمان)، صنعت سیمان کشور می‌تواند بالغ بر ۱۱۵ میلیون تن سیمان در چشم‌انداز ۱۴۰۰ تولید کند. این میزان تولید پاسخگوی نیاز کشور در دو دهه پیش‌رو خواهد بود. لذا، کشور تا سال‌ها نیاز به احداث کارخانه سیمان جدید ندارد [۴].

¹ Cement Kiln Dust (CKD)

می‌تواند با اقداماتی مانند سوخت‌های زیستی جایگزین شود. از سوئی دیگر شهرنشینی جهانی منجر به افزایش تقاضا برای سیمان شده است. لذا رشد مصرف سیمان، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد. با این حال، در یک نگرش جهانی، نقش استراتژی‌های کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای همواره مورد توجه قرار گرفته است. در گزارش زیست‌محیطی سازمان ملل (۲۰۱۸)، نقش سیاست نوآوری و ایجاد بازار در این زمینه را بسیار مهم معرفی نموده است [۶]. البته باید افزود که محققان موسسه تکنولوژی ماساچوست (MIT^۲) راهی برای از بین بردن انتشار کربن از تولید سیمان (منبع اصلی گازهای گلخانه‌ای جهانی) یافته‌اند. این محققان روش جدیدی برای ساخت مواد ایجاد کرده‌اند که می‌تواند این انتشارات را به کلی حذف کنند و حتی به برخی از محصولات مفید دیگر تبدیل نماید [۷]. این یافته‌ها توسط چیانگ و همکاران در مجله PNAS^۳ گزارش شده است. بر این اساس انتظار می‌رود تا سال ۲۰۶۰ تعداد ساختمان‌ها در سراسر جهان دو برابر شود، که معادل ساختن یک شهر جدید نیویورک در هر ۳۰ روز یکبار است [۸].

گوردون (۲۰۱۸) طی مقاله‌ای نقشه راه صنعت سیمان برای کاهش انتشار CO₂ به میزان ۲۴٪ کمتر از سطح فعلی تا سال ۲۰۵۰ را تشریح نمود [۹]. فونتا (۲۰۱۹) اقتصاد بین‌المللی جدید کربن (NICE^۴) را فرصتی برای سیمان و بتن می‌داند. به نظر او ذی‌نفعان مرتبط باید آگاهی خود را افزایش دهند. همانطور که مدیریت انتشار CO₂ خواهد توانست نقش اساسی در آینده داشته باشد، یکی از عناصر اصلی که باید مورد توجه تولیدکنندگان سیمان قرار گیرد، (به خصوص اگر بالاخره قیمت CO₂

تعیین شود)، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش انتشار غیر قابل اجتناب و استفاده از مقداری CO₂ در تولید و جذب بخشی از آن در بتن است. در سیستم NICE کربن ذخیره می‌شود و به تدریج CO₂ اسیر شده، دکربونیزاسیون می‌شود [۱۰]. در این زمینه کمپانی لافارژ-کانادا اولین مرحله از پروژه CO₂MENT را راه‌اندازی کرده است. هدف این پروژه آنست که یک چرخه کامل ایجاد شود تا CO₂ از سیمان استحصال و استفاده مجدد شود. رونمایی اخیر سوخت جدید کربن پایین (LCF^۵) در کارخانه ریچموند با هدف ایجاد این مزیت است. انتظار می‌رود تا پایان سال ۲۰۲۰ فن‌آوری‌های کارخانه سیمان ریچموند در سه مرحله به طور کامل عملیاتی شود. در مرحله اول، به کمک شرکا، تصفیه گاز دودکش‌های سیمان و جذب CO₂ انجام می‌شود؛ مرحله دوم بر تفکیک آن متمرکز خواهد بود. مرحله نهایی، مصرف CO₂ اسیر شده در فن‌آوری‌های موجود در سایت، مانند تزریق CO₂ در بتن خواهد بود. هانتزینگر و ایتمون (۲۰۰۸) چرخه عمر تولید سیمان پرتلند-مقایسه روند سنتی با فن‌آوری‌های جایگزین را ارزیابی نمودند و نشان دادند که سیمان مخلوط با استفاده از CKD^۶، بزرگترین اندوخته محیط زیستی را ارائه می‌کند [۱۱]. اشنایدر و همکارانش (۲۰۱۱) "تولید پایدار سیمان - حال و آینده" را بررسی نمودند [۱۲]. آنها عنوان کردند که به گفته آژانس بین‌المللی انرژی، اهرم‌های اصلی برای تولیدکنندگان سیمان، افزایش بهره‌وری انرژی و استفاده از مواد جایگزین، به عنوان سوخت یا مواد خام است. بر این اساس، استفاده از سوخت‌های جایگزین در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ اما پتانسیل افزایش بیشتر هنوز وجود دارد. در سیمان، کاهش فاکتور کلینکر یکی از اولویت‌های کلیدی است، که پیشرفت بسیار زیادی در پیش گرفته شده است. میلار و

² Massachusetts Institute of Technology

³ Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS. Journal)

⁴ New International Carbon Economy (NICE)

⁵ Lower carbon fuel (LCF)

⁶ Cement Kiln Dust (CKD)

همکارانش (۲۰۱۸) پتانسیل کاهش دی‌اکسیدکربن (CO₂) در صنعت سیمان جهان تا سال ۲۰۵۰ را بررسی نمودند [۱۳]. مطالعه آنها که به مجموعه یونپ^۷ در مورد سیمان‌های زیست محیطی کمک می‌کند، بررسی عوامل و راه‌حل‌های موثر در کاهش تولید CO₂ ناشی از تولید سیمان می‌باشد. در این مطالعه عوامل انتشار برای تمام مواد جایگزین با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA^۸) محاسبه شد. این مقاله نشان داد که اهداف سناریوی مدنظر کاهش ۲ درجه سانتی‌گرادی برای سال ۲۰۵۰ می‌تواند بدون نیاز به CCS^۹ در صورت افزایش استفاده از رس تکلیس شده و پراکنش^{۱۰} مواد مهندسی‌شده حاصل شود. معرفی پتنت جدید کلینکر جایگزین سیمان، استفاده از مواد فعال قلیایی و بهبود بهره‌وری از سیمان به طریق استحصال CO₂ و ذخیره‌سازی آن (CCS) [۱۴] می‌تواند به اهداف مذکور کمک بیشتری کند. آنها سهم بازار سیمان‌های مختلف را تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی نمودند. فراتر از روش‌های مذکور، توسعه فن‌آوری‌های جایگزین سیمان توانسته است به کاهش جهانی انتشار CO₂ در صنعت سیمان کمک کند. کلینکر با Ye'elimite (BYF^{۱۱}, CCSC) به عنوان فاز واکنش پذیر می‌تواند در کوره‌های سیمان معمولی تولید شود، اما نیاز به مواد معدنی غنی از آلومینیوم، سولفات‌ها و کربنات‌ها دارد. بازار CCSC محدود به بتن‌های صنعتی به ویژه برای بخش‌های نازک یا متخلخل، بدون تقویت فولاد است. فارفان و همکارانش (۲۰۱۹) "روند جهانی در صنعت سیمان و فرصت‌های بلندمدت بالقوه پایدار برای

ذخیره‌سازی و بهره‌برداری از کربن (CCU^{۱۳}) جهت تولید نیرو" را بررسی نمودند [۱۵]. به زعم آنها از انتشار CO₂ که منشأ آن پختن سنگ آهک است، نمی‌توان اجتناب نمود. لیکن در این فرآیند تولید CO₂ امکان بالقوه جذب و بهره‌برداری کربن وجود دارد. نقشه راه جهانی سیمان^{۱۴} سند بسیار مهمی برای تولیدکنندگان سیمان سراسر جهان می‌باشد که توسط شورای جهانی تجارت برای توسعه پایدار (WBCSD^{۱۵}) پایه‌گذاری شده است. بر اساس نقشه راه جهانی صنعت سیمان (نمودار ۲)، راهکارهای اصلی ارائه شده برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست شامل: ۱- مصرف موثر انرژی؛ ۲- سوخت‌های جایگزین (سبز یا با آلاینده‌گی کم)؛ ۳- جایگزینی کلینکر؛ ۴- CCS (بازیافت و ذخیره کربن) می‌باشند [۱۶-۱۷].

بر این اساس تا سال ۲۰۱۶ افزایش تولید سیمان و به تبع آن افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای اتفاق می‌افتد، اما در ادامه مسیر تا سال ۲۰۵۰ تولید سیمان توام با دستیابی اهداف استراتژیکی می‌باشد. در این نقشه، برای چهار هدف اصلی، شامل:

گام اول: مصرف موثر انرژی^{۱۶}،

گام دوم: سوخت‌های جایگزین،

گام سوم: کاهش نسبت کلینکر به سیمان،

گام چهارم: به دام انداختن کربن و مصرف آن (CCS)

می‌باشند. در این نقشه بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۵۰ تولید سیمان با نرخ رشد ۰/۸٪ تا ۱/۲٪ در سال برنامه‌ریزی شده است؛ این افزایش تولید از ۴۳٪ به ۷۲٪ از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۵۰ برای دستیابی به تولید ۳۷۰۰ تا ۴۴۰۰ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ محاسبه شده است. در این نقشه برای

⁷United Nations Environment Programme (UNEP)

⁸ life-cycle assessment (LCA)

⁹ Carbon Capture and Storage (CCS)

¹⁰¹⁰ Définition

¹¹ Belite-Ye'elimite-Ferrite clinkers (BYF)

(belite>ye'elimite>ferrite)

¹² Carbonatable Calcium Silicate clinkers (CCSC)

(کلینکرهای سیلیکات کلسیم کربناته)

¹³ Carbon Capture and Utilisation (CCU)

¹⁴¹⁴ Global roadmap cement

¹⁵ World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

¹⁶ Energy intensity

انتشار گازهای گلخانه‌ای دو سطح پایه^{۱۷} و آبی^{۱۸} (بالا و پائین) با اجرای برنامه‌های پیشنهادی تشریح شده‌اند. در مجموع با اجرای نقشه مذکور، دستیابی به ۱۰۰٪ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از سطح پایه ۲/۳۴ گیگاتن به ۱/۵۵ گیگاتن (سطح آبی) میسر می‌گردد.

در این رابطه به نظر می‌رسد که موضوع کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای صرفاً بر عهده تولیدکنندگان سیمان می‌باشد که شکل ۱ سهم بخش‌های مختلف شامل شرکت‌های تخریبی، شرکت‌های ساختمانی، مشاوران، تولیدکنندگان سیمان، تولیدکنندگان بتن و مدیریت پسماندهای ضایعاتی را در ۴ سناریوی مرجع، پیشرفت غیرمنتظره، بتن و سازه نشان می‌دهد.

مطابق نقشه مذکور اتحادیه ملی صنعت سیمان (SNIC^{۱۹}) و انجمن سیمان پرتلند برزیل (ABCP^{۲۰}) یک نقشه راه فن‌آوری سیمان را تا سال ۲۰۵۰ راه‌اندازی کرده‌اند [۱۸]. بر طبق این نقشه راه، اقدامات کلیدی تا سال ۲۰۳۰ شامل تقویت همکاری ملی و بین‌المللی، ارتقاء استانداردهای جدید سیمان، افزایش نرخ جایگزینی کلینکر در سیمان، ترویج استفاده از سوخت‌های جایگزین مطابق با سیاست ملی زباله‌های جامد (PNRS^{۲۱})، به اشتراک‌گذاری بهترین بهره‌وری انرژی و ترویج فن‌آوری بازیابی و توسعه گازهای گلخانه‌ای می‌باشند. کشور ویتنام نیز در این رابطه اقداماتی برای عرضه و تقاضای سیمان و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق بهبود بهره‌وری انرژی در صنعت سیمان دارد [۱۹]. در این زمینه کشور مصر [۲۰] و چین [۲۱] نیز اسناد مشابهی دارند. همچنین سند "نقشه راه فن‌آوری

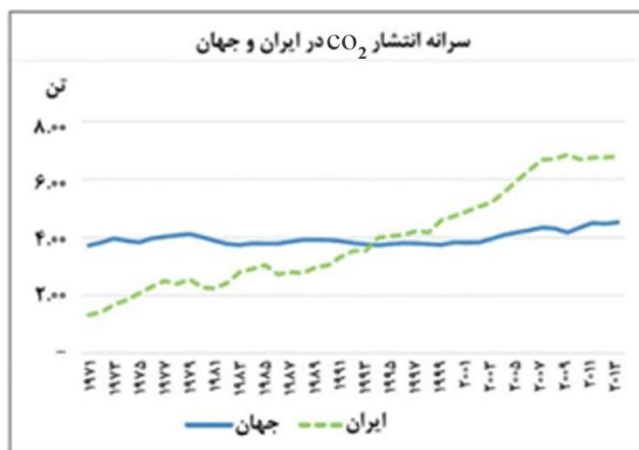
برای آینده‌ای پایدار با کاهش انتشار کربن در صنعت سیمان قزاقستان" [۲۲] تهیه شده است.

شایان ذکر است که اندرسون و پیترز (۲۰۱۶)، یک برنامه عملیاتی در قرن ۲۱ را ارائه دادند (نمودار ۳) [۲۳]. انتشار CO₂ و GHG در سراسر جهان برای هر بخش تا سال ۲۰۵۰ نیز تخمین زده شده است [۲۴].

بر اساس گزارش سالانه انرژی (پروفسور لی، ۲۰۱۷) تا سال ۲۰۳۰ باید اقدامات جدی برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای صورت پذیرد (نمودار ۴). بر این اساس انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از ۲۳/۷ گیگاتن در سال ۲۰۰۰ به ۳۷/۱ گیگاتن در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید و در سال ۲۰۵۰ نیز به ۳۱/۱ گیگاتن باید برسد.

۳- وضعیت ایران از منظر شاخص‌های نقشه جهانی:

در این زمینه در نمودار ۵ روند تغییرات سرانه انتشار CO₂ (بر حسب میلیون تن در سال) طی حدود ۴۰ سال گذشته در ایران دیده می‌شود (توضیح اینکه آمار به‌روز و مناسبی در این زمینه منتشر نشده است؛ زیرا صنایع مختلف تمایل و ضوابط کاملی برای انعکاس میزان آلودگی خود ندارند).



نمودار ۵- مقایسه سرانه انتشار CO₂ در ایران و جهان طی چهل سال گذشته [ط]

این آمار نشان می‌دهد که ضروری است در جهت نقشه جهانی صنعت سیمان و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گام برداشت. یکی از مشکلاتی که برخی سازمان‌ها در کشور ایران در مقایسه با کشورهای توسعه یافته صنعتی

¹⁷ Baseline emissions

¹⁸ BLUE emissions

¹⁹ Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC

²⁰ The National Union of Cement Industry (SNIC) and the Brazilian Portland Cement Association (ABCP)

²¹ National Solid Waste Policy (PNRS)

نوین با آن روبرو هستند، کمبود توجه به خط‌مشی‌های کلان ملی و بین‌المللی می‌باشد. واضح است که در بلندمدت این کمبود یا عدم توجه موجب ایجاد محدودیت در کسب موفقیت و تامین اهداف سازمان خواهد شد. امروزه در سازمان‌ها برای تعیین استراتژی‌ها علاوه بر لحاظ نمودن شرایط بومی، به سیاست‌های کلان ملی و نقشه راه جهانی صنعت نیز توجه می‌شود. در این راستا سند چشم‌انداز بتن ۱۴۰۴ [۲۶] (بر اساس سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ [۲۷] و برنامه ششم توسعه کشور [۲۸] تهیه شده) طی سه دوره چهار ساله (کوتاه، میان و بلندمدت) تدوین شده است. مطابق برنامه میان مدت (۱۴۰۰-۱۳۹۶) «مراحل از سند که در برنامه ۴ ساله اول (کوتاه‌مدت ۱۳۹۶-۱۳۹۲) اجرایی گردیده بود، مورد پایش و ارزیابی قرار می‌گیرند، تا نواقص، نیازها و خلاهای موجود شناسایی و رفع شوند. این طرح، در چندین شهر بزرگ و یا مراکز استان عملیاتی خواهد شد. همچنین در این بازه زمانی طبقه‌بندی بتن‌های مورد استفاده در انواع ساختمان‌ها با توجه به کاربرد و میزان ارتفاع و طبقات هر ساختمان تعیین خواهد شد. افزایش حداقل مقاومت مشخصه به ۴۵ مگاپاسکال، جهت طراحی و اجرای سازه‌های بتنی در پایان این برنامه مدنظر خواهد بود».

این سند شامل ۴ بخش: ۱-عوامل اثرگذار؛ ۲-اهداف؛ ۳-وظایف ذی‌نفعان؛ ۴-پیاده‌سازی می‌باشد. ذی‌نفعان نیز شامل: ۱-سازمان‌های دولتی و نهادهای حاکمیتی؛ ۲-تولیدکنندگان (بتن، سیمان، مصالح سنگدانه‌ای و افزودنی‌ها)؛ ۳-مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی؛ ۴-انجمن‌های صنفی و علمی؛ ۵-کمیته‌های علمی و تخصصی هستند. اهداف اصلی این سند شامل: ۱-تقویت عمر سازه‌های بتنی؛ ۲-افزایش کیفیت (مقاومت) بتن‌های مصرفی در ساختمان‌ها؛ ۳-بهبود فرآیندهای کنترلی در سیستم تولید بتن و اجزای آن؛ ۴-کاهش آلودگی‌های محیط زیستی؛ ۵-توسعه مصرف سیمان‌های آمیخته. بنابراین یکی از اهداف

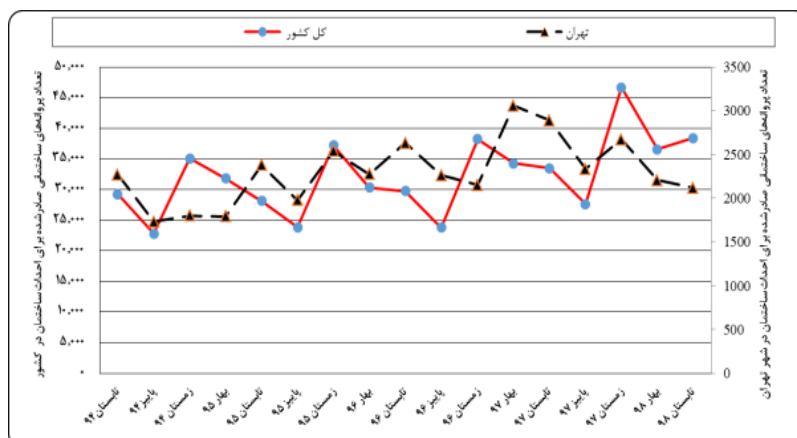
مهم برنامه دوم سند چشم‌انداز بتن ۱۴۰۴ دستیابی به مقاومت ۴۵ مگاپاسکال است که تولیدکنندگان سیمان موظفند با ارائه محصولات دارای مقاومت فشاری بالا به این هدف کمک نمایند. در مجموع می‌توان گفت که از منظر محیط زیست، اصول نقشه جهانی راه صنعت سیمان مویده مبانی سند چشم‌انداز بتن ۱۴۰۴ است.

از سوئی دیگر بیش از ۲۰ دلار یارانه انرژی برای تولید هر تن سیمان در اختیار تولیدکنندگان قرار می‌گیرد. بنابراین استفاده بهینه از این سرمایه‌های ملی (یارانه مذکور، مصرف ذخایر معدنی و انرژی برای تولید سیمان و غیره) امری ضروری است که توجه به نقشه مذکور در این راستا می‌باشد.

در کشور ما سالانه حدود ۹۰ میلیون مترمکعب بتن مصرف می‌شود که تقریباً معادل سرانه ۱/۱ مترمکعب می‌باشد و این میزان حدود ۳۸٪ بیش از مصرف جهانی است (رئیس انجمن بتن ایران، ۱۳۹۶). از طرف دیگر طی سال‌های اخیر به علت کاهش ساخت و ساز و بروز رکود در صنعت ساختمان، سرانه مصرف سیمان از ۷۵۰ کیلوگرم به ۵۵۰ کیلوگرم رسیده است (ایکنا به نقل از رئیس انجمن صنفی سیمان، ۱۳۹۵). در نمودار ۶ روند تغییرات تعداد پروانه‌های ساختمانی صادرشده برای احداث ساختمان در شهر تهران و کل کشور طی دوره زمانی تابستان ۱۳۹۴ تا تابستان ۱۳۹۸ مشاهده می‌گردد. در تابستان ۹۸ تعداد پروانه‌های احداث ساختمان برای شهر تهران ۲۱۲۵ مورد بوده است که ۸۳/۳٪ آنها بتنی بوده‌اند. این آمار (تعداد پروانه‌ها) در سطح کشور ۴۱۳۰۹ مورد و ۶۹/۵٪ آن به صورت بتنی بوده است. تعداد پروانه‌های ساختمانی صادرشده برای احداث ساختمان توسط شهرداری‌های کل کشور از ۳۳۴۵۷ در تابستان ۹۷ به ۳۸۳۹۳ در تابستان ۹۸ رسیده است، لیکن برای تهران از ۲۸۹۰ به ۲۱۱۶ مورد تنزل یافته است [۲۹]. البته به نظر می‌رسد در بلندمدت روند نزولی به صعودی تغییر یابد. از سوئی دیگر کارشناسان و متخصصان

نود، مصرف سیمان بیش از این حدود بود، بطور موقت و به علت ساخت انبوه پروژه مسکن مهر بوده است.

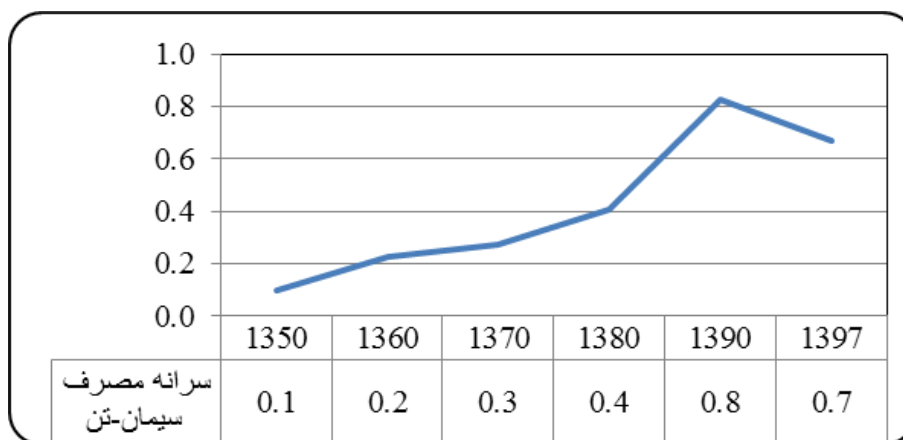
صنعت همواره اذعان داشته‌اند که مصرف داخلی سیمان بیش از ۵۰ میلیون تن در سال نیست و اگر در اواخر دهه



نمودار ۶- روند تغییرات تعداد پروانه‌های ساختمانی صادر شده برای احداث ساختمان در شهر تهران و کل کشور از تابستان ۱۳۹۴ تا تابستان ۱۳۹۸

بدیهی می‌باشد که با پیشرفت در صنعت ساختمان، مصرف بتن و در نتیجه سیمان افزایش یافته است و البته در سال ۱۳۹۰ با رونق در طرح مسکن مهر، این افزایش چشمگیر بود. در سال‌های اخیر بروز رکود در این صنعت، منتهی به کاهش مصرف سیمان شده است.

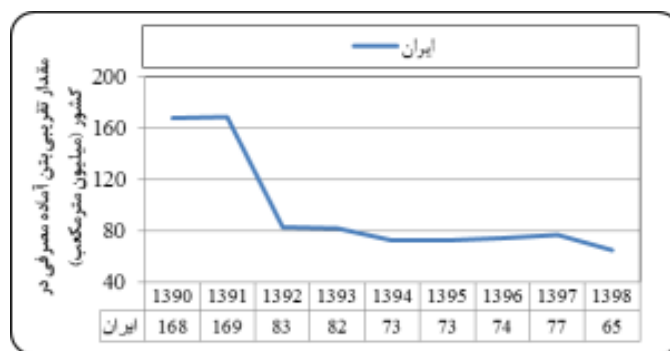
نمودار ۷ روند تغییرات سرانه مصرف سیمان در ایران طی حدود ۵۰ سال اخیر را نشان می‌دهد. در سال ۱۳۴۵ فقط ۰/۳٪ واحدهای مسکونی به صورت بادوام (اسکلت فلزی یا بتنی) بوده‌اند، حال آنکه این شاخص در سال ۱۳۸۵، ۳۸٪ و در سال ۱۳۹۵، ۵۷٪ آمارگیری شده است. از این‌رو



نمودار ۷- روند تغییرات سرانه مصرف سیمان در ایران طی ۵۰ سال گذشته

سیمان مصرف شده به صورت فله بر کل سیمان مصرفی، میزان سیمان مورد استفاده در بتن‌های آماده و پیش‌ساخته به دست می‌آید. از تقسیم این میزان به عدد ۰/۳۵۰ (که عیار سیمان در بتن پر مصرف ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است)، مقدار تقریبی کل بتن تولیدی حاصل می‌شود. نمودار ۸ این آمار را برای کشور نشان می‌دهد.

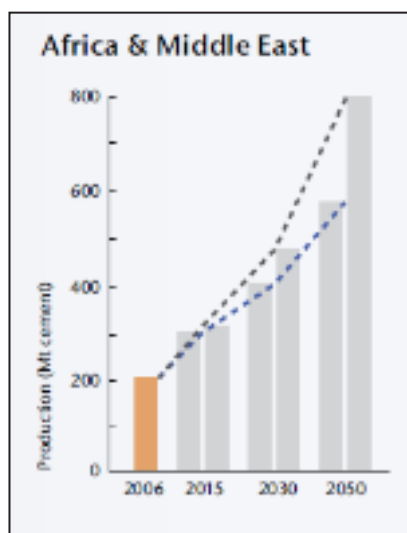
بر اساس آمارهای جهانی فقط ۲۴٪ سیمان‌ها در ملات و پلاستر استفاده می‌شود و مابقی صرف تولید بتن‌های آماده و پیش‌ساخته می‌گردد [۲]. در ایران این آمار به علت مشکلات مختلف (از جمله نامشخص بودن آمار دقیق تولیدکنندگان بتن، حجم بالای معاملات توسط واسطه‌ها و غیره) به صورت غیر مستقیم محاسبه می‌شود. لذا از تقسیم



نمودار ۸- روند تولید سیمان و بتن در ایران طی سال‌های گذشته

حوزه جغرافیائی ایران در محدوده خاورمیانه می‌باشد که الگوی نقشه مذکور برای آفریقا و خاورمیانه به صورت جدول ۱ است. بر طبق این نقشه تولید سیمان باید مطابق نمودار ۹ باشد. بر این اساس برای رسیدن به حداقل سطح مدنظر در سال ۲۰۵۰ باید: ۱- انرژی مصرفی حداکثر 47 Mtoe^{22} (میلیون تن نفت^{۲۳}) باشد؛ ۲- میزان سوخت‌های جایگزین به ۳۳٪ برسد؛ ۳- نسبت کلینکر به سیمان ۷۴٪ باشد؛ ۴- میزان به دام‌اندازی کربن به ۹۷/۱ میلیون تن برسد. جدول ۱- الگوی نقشه جهانی صنعت سیمان برای آفریقا و خاورمیانه

Africa and Middle East		BLUE low demand			BLUE high demand		
Technologies		2015	2030	2050	2015	2030	2050
Energy use (Mtoe)		25.5	30.5	47.0	26.4	35.3	68.0
Share of alternative fuel use		11%	22%	33%	14%	25%	35%
Clinker to cement ratio		0.82	0.77	0.74	0.81	0.76	0.76
CO ₂ captured (Mt)		0	8.4	97.1	0	21.5	158.7



نمودار ۹- الگوی نقشه جهانی تولید سیمان برای آفریقا و خاورمیانه

²² Millions of tonnes of oil equivalent (Mtoe).

²³ واحد انرژی معادل میلیون تن نفت است که برای توصیف محتوای انرژی کلیه سوخت‌ها و به طور معمول در مقیاس بسیار بزرگ استفاده Mtoe می‌شود و برابر با $10^{16} \times 4/1868$ ژول ، یا ۴۱,۸۶۸ پتاژول (مقدار فوق‌العاده‌ای از انرژی) است.

واضح می‌باشد که روند تولید سیمان همراه با انتشار گاز CO₂ است. البته انتشار سایر گازهای آلاینده همچون ناکس (NO_x)، دی اکسید گوگرد (SO₂)، مونو اکسید کربن (CO) و غیره باید مورد توجه قرار گیرد [۳۰].

در حال حاضر، مطابق آخرین آمارهای واصله از انجمن صنفی صنعت سیمان کشور، ۸۱ کارخانه فعال با ظرفیت

تولید سالیانه ۸۵/۷ میلیون تن کلینکر و ۸۹/۷ میلیون تن سیمان را دارند که البته ۱۲ کارخانه در حال احداث برای تولید سالیانه ۹/۲ میلیون تن کلینکر و ۹/۷ میلیون تن سیمان به آن افزوده خواهد شد. طی سال ۲۰۱۹ بیشترین تولید سیمان در کشورهای مختلف به صورت جدول ۲ می‌باشد (اقتصاد ۲۴).

جدول ۲- کشورهای نخست در تولید سیمان طی سال ۲۰۱۹

رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نام کشور	چین	هند	ویتنام	مصر	امریکا	اندونزی	ایران	روسیه	برزیل-کره	ژاپن
تولید سیمان (میلیون تن)	۲۲۰۰	۳۲۰	۹۵	۷۶	۸۹	۷۴	۶۰	۵۷	۵۵	۵۴

مطابق آمارهای داخلی، طی سال ۹۸، صادرات سیمان ۶/۷ میلیون تن و کلینکر ۱۰/۸ میلیون تن بوده است. با توجه به مصرف انرژی یارانه‌ای در صنعت و همچنین قیمت بسیار پائین سیمان ایران در بازار جهانی به علت تحریم‌ها، در نگاه کلان و محیط‌زیستی، نمی‌توان برای این نوع صادرات، ارزش قابل توجهی لحاظ نمود. البته باید افزود که با توجه به نامگذاری سال با عنوان "جهش تولید"، در سند اهم برنامه‌های وزارت صمت در سال ۹۹، شاخص کمی میزان تولید سیمان هفتاد میلیون تن در نظر شده است. [۳۱]

طبق سند نقشه راه صنعت و معدن، سال ۱۴۰۰ تولید سیمان ۷۰ میلیون تن در نظر گرفته شده است [۳۲]. بر

اساس ماده یک قانون مدیریت پسماندها جهت تحقق اصل پنجاهم (۵۰) قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران و به منظور حفظ محیط زیست کشور از آثار زیان‌بار پسماندها و مدیریت بهینه آنها، کلیه وزارتخانه‌ها و سازمان‌ها و مؤسسات و نهادهای دولتی و نهادهای عمومی غیردولتی که شمول قانون بر آنها مستلزم ذکر نام می‌باشد و کلیه شرکتها و مؤسسات و اشخاص حقیقی و حقوقی موظفند مقررات و سیاست‌های مقرر در این قانون را رعایت نمایند [۳۳]. البته موارد تشویقی خاصی در این مقررات لحاظ نشده است. لذا با توجه به پتانسیل موجود می‌توان از سوخت RDF در کوره‌های سیمان بهره گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

۱. مطابق نقشه جهانی صنعت، برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تولیدی از صنعت سیمان تا سال ۲۰۵۰، باید اقداماتی توسط بخش‌های مختلف شامل شرکت‌های تخریبی، شرکت‌های ساختمانی، مشاوران، تولیدکنندگان سیمان، تولیدکنندگان بتن و مدیریت پسماندهای ضایعاتی را در ۴ سناریوی مرجع، پیشرفت غیرمنتظره، بتن و سازه انجام شود؛
۲. بر اساس این نقشه، راهکارهای اصلی ارائه شده برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست شامل: ۱- مصرف موثر انرژی؛ ۲- سوخت‌های جایگزین (سبز یا با آلاینده‌گی کم)؛ ۳- جایگزینی کلینکر (با پوزولان‌ها و مواد مشابه)؛ ۴- CCS (بازیافت و ذخیره کربن) می‌باشند؛
۳. طبق اطلاعات ارائه شده، در حال حاضر شاخص‌های آلاینده‌گی، مصرف سیمان و جایگزینی کلینکر در ایران با نورم‌های جهانی متفاوت می‌باشد و در زمینه سوخت‌های جایگزین و CCS نیز کاملاً مغایر است؛
۴. با توجه به کمبود انسجام در اسناد ملی در زمینه این نقشه، پیشنهاد می‌گردد تا نقشه مذکور به صورت بومی و البته مطابق شاخص‌های جهانی تهیه گردد.

تشکر و قدردانی از مدیران و پرسنل محترم مجتمع صنعتی سیمان تهران را داریم.

- [1] Sabbie A. Miller & Vanderley M. John & Sergio A. Pacca & Arpad Horvath (2018). "Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050". *Cement and Concrete Research Volume 114*, December 2018, Pages 115-124.
- [2] Aurélie FAVIER & Catherine DE WOLF & Karen SCRIVENER & Guillaume HABERT. (2018). "A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE EUROPEAN CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY- Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050". *ETH Zurich*.
- [۳] برنامه راهبردی وزارت صنعت، معدن و تجارت، وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴.
- [۴] معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی، دفتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن. (۱۳۹۷). "آسیب‌شناسی مشکلات ساختاری صنعت سیمان کشور". شماره مسلسل: ۱۶۳۰۵.
- [5] Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050".
- [6] MIT (2019). "New approach suggests path to emissions-free cement".
- [7] United Nations Environment Programme. (2018). "Emissions Gap Report 2018".
- [8] Robbie M. Andrew (2018). "Global CO2 emissions from cement production". *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195–217, 2018.
- [9] USGS, 2014, 2018; Mohr et al., 2015; BP, 2018.
- [10] Gabriel Gordon-Harper. (12 April 2018). "Cement Industry Initiative Releases Technology Roadmap to Cut CO2 Emissions 24% by 2050". From: <https://sdg.iisd.org/>.
- [11] Philippe Fonta. (September 2019). "The New International Carbon Economy (NICE): An opportunity for cement and concrete". *Global Cement Magazine*. P:24-26.
- [12] Deborah N Huntzinger, Thomas D. Eatmon. (2009) "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies". *Journal of Cleaner Production*, 2009
- [13] M Schneider, M Romer, M Tschudin, H Bolio (2011). "Sustainable cement production—present and future". *Cement and Concrete Research*, Volume 41, Issue 7, July 2011, Pages 642-650.
- [14] Sabbie A. Miller & Vanderley M. John & Sergio A. Pacca & Arpad Horvath (2018). "Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050". *Cement and Concrete Research Volume 114*, December 2018, Pages 115-124.
- [15] Timothy Millar (2017) "Carbon Capture & Storage in the Cement Industry-A viable option for Sweden?" Thesis for the fulfilment of the Master of Science in Environmental Management and Policy.
- [16] Avier Farfan & Mahdi Fasihi & Christian Breyer. (2019) "Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X". *Journal of Cleaner Production*, Volume 217, 20 April 2019, Pages 821-835.
- [۱۷] کفایش بازاری علی اکبر، سرخان‌پور مهدی. (۱۳۹۸). "نقشه راه جهانی سیمان-بخش اول". ماهنامه علمی تخصصی فناوری سیمان، ۱۲۵، صفحات ۶-۲.
- [18] Global Cement staff. (2019). "SNIC launches Cement Technology Roadmap for Brazil".
- [19] Submitted to the World Bank Carbon Finance Assist Program – Vietnam (2020). "POTENTIAL CLIMATE CHANGE MITIGATION OPPORTUNITIES IN INDUSTRY SECTOR IN VIETNAM".

- [20] Bruno Vanderborcht & Francisco Koch & Laurent Grimmeissen & Stefan Wehner & Piet Hein Heersche & Jean-Pierre Degré. (2016) "Low-Carbon Roadmap for the Egyptian Cement Industry". European Bank for Reconstruction and Development (EBRD).
- [21] Ali Hasanbeigi, Nina Khanna, and Lynn Price. (2017). "Air Pollutant Emissions Projections for the Cement and Steel Industry in China and the Impact of Emissions Control Technologies". Energy Analysis and Environmental Impacts Division Lawrence Berkeley National Laboratory. China Energy Group.
- [22] Jelmer Hoogzaad & Jürgen Wiesmann & Inna Lissova & Michael Clark (28 October 2016) "Technology Roadmap For a sustainable low-carbon future of the Kazakhstan cement industry". Carbon Project and Asset Development Facility - Technology and Policy Scoping for a Low-Carbon Kazakhstan Cement Industry (TCS ID: 41971).
- [23] Laurent Barcelo & John Kline & Gunther Walenta & Ellis Gartner (2013). "Cement and carbon emissions". Materials and Structures. 47, 6. 1055-1065.
- [24] Kevin Anderson & Glen Peters. (2016). "The trouble with negative emissions". Science 354(6309):182-183.
- [25] Minqi Li. (2017). "World Energy 2017-2050: Annual Report". Peak Oil Barrel, from: <http://peakoilbarrel.com>.

[۲۶] -سند جامع چشم‌انداز بتن ۱۴۰۴ (گامی بسوی توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز). مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

[۲۷] سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴ هجری شمسی.

[۲۸] ابلاغیه قانون برنامه پنج‌ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۵/۱۲/۱۴).

[۲۹] مرکز آمار ایران (۱۳۹۵) "بررسی روند تغییرات ساختار و ترکیب جمعیت کشور و آینده آن تا افق ۱۴۳۰ شمسی بر اساس نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن" دفتر جمعیت، نیروی کار و سرشماری - گروه جمعیت و سلامت. لالی موسوی، سیدعلی و دیگران. "بهبود فناوری تولید سیمان با هدف کاهش دی اکسید کربن"، ۱۳۹۴.

[۳۰] تصویب‌نامه هیات وزیران ابلاغی به سازمان حفاظت محیط زیست. (۱۳۹۵). شماره ۹۵۰۵/ت ۴۹۰۶۵.

[۳۱] "اهم برنامه‌های وزارت صنعت، معدن، تجارت در سال ۹۹".

[۳۲] نقشه راه بخش معدن و صنایع معدنی ایران و برنامه چهار ساله وزارت صنعت، معدن و تجارت (۱۴۰۰-۱۳۹۶).

قانون مدیریت پسماندها، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۸۳.

مروری بر ارزیابی خواص و دوام بتن‌های خاص در برابر فرسایش



امیرمحمد رمضانپور
استادیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تهران



محمد شکرچی‌زاده
استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تهران، سرپرست انستیتو مصالح
ساختمانی دانشگاه تهران



محمد جواد محمدی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی
عمران، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تهران

چکیده

سازه های بتنی از قبیل سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها و تاسیسات وابسته به آن در طول عمر خود دچار آسیب های فیزیکی (شامل سایش و فرسایش، پدیده خلاء زایی و چرخه های ذوب و انجماد)، شیمیایی و اجرایی متنوعی می شود. در این پژوهش، ابتدا روش عملکرد عوامل مخرب فرسایش ناشی از سایش و خلاءزایی مورد بررسی قرار می گیرد. عوامل تاثیرگذار بر میزان سایش به دو دسته هیدرولیکی (سختی ذرات، سرعت آب، مسیر جریان، شکل سطح بتنی و مدت زمان قرار گرفتن سازه در معرض سایش) و خواص بتن تقسیم می شود. عواملی که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می شود، مقاومت سایشی را می تواند افزایش دهد، مانند؛ مشخصات سنگدانه ها، مقاومت بتن، نسبت های اختلاط، استفاده از سیمان های خاص و مواد افزودنی معدنی مانند میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی، الیاف و دو عامل پرداخت سطح و شرایط عمل آوری. لزوم تامین دوام سازه ها، محققین را به سمت استفاده از بتن های خاص در برابر فرسایش برده است. عملکرد بتن های خاص از قبیل بتن غلتکی، خود تراکم، پرمقاومت، الیافی، توانمند، فوق توانمند و پلیمری از نظر مشخصات مکانیکی در برابر عوامل مخرب بررسی شدند.

از نتایج کلی این تحقیق، افزایش دوام بتن در برابر فرسایش با تغییر در پارامترهای طرح مخلوط بتن مانند افزایش سختی و ابعاد سنگدانه، استفاده بهینه از افزودنی های معدنی و الیاف که با قرارگیری مناسب در سطح می تواند باعث بهبود مقاومت در برابر سایش شود. افزایش مقاومت فشاری و سطح بتن مهمترین عوامل تاثیرگذار بر بهبود مقاومت سایشی بتن می باشد. کلمات کلیدی: سازه های بتنی هیدرولیکی، آسیب فیزیکی، مقاومت سایشی، دوام، بتن

۱ مقدمه

مهم هر کشور و منطقه محسوب می شود. اهمیت کاربرد بتن به عنوان اصلی ترین و پرمصرف ترین ماده در ساخت سازه های هیدرولیکی امری بدیهی به نظر می رسد. سدها و دیگر سازه های هیدرولیکی، سازه هایی با عمر بهره برداری طولانی هستند که به علت هزینه بالای تعمیرات، مسأله

سازه های هیدرولیکی به ویژه سدها به عنوان یکی از قدیمی ترین و پیچیده ترین فعالیت های ساختمانی همواره مد نظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی یکی از منابع

دوام آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دوام از جمله مسائلی است که در گذشته کمتر به آن پرداخته شده است و طراحان اغلب مقاومت فشاری را تنها معیار تاثیرگذار بر مقاومت و کیفیت سازه می‌دانستند. در صورتی که شرایط محیطی بتن می‌تواند عامل موثری بر کیفیت سازه و عمر مفید سازه باشد. بتن تحت شرایط محیطی مخرب می‌تواند به سرعت و در مدتی کمتر از عمر مفید در نظر گرفته شده، آسیب دیده و مقاومت را از دست بدهد. این خرابی‌ها گویای اهمیت دوام بتن بوده و در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از مصالح نامناسب و غیر استاندارد در بتن، عدم رعایت اصول فنی در ساخت و اجرای سازه‌های بتنی، وجود عوامل و شرایط محیطی مخرب، آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی ناشی از عوامل مخرب، عدم دقت در عمل‌آوری بتن، عدم حفاظت و نگهداری بتن و عدم انجام تعمیرات جزئی لازم در حین بهره‌برداری از عوامل عمده خرابی‌های زودرس در کشور می‌باشد. [۱]

سایش و کاویتاسیون از جمله آسیب‌های فیزیکی می‌باشد که بیشترین آمار آسیب در سازه‌های هیدرولیکی کشورهای مختلف را دارد. سازه‌های هیدرولیکی مستعد سایش سرریزها، حوضچه‌های آرامش، دیواره بالادست مخزن، دیواره کانال‌ها، لوله‌های زهکشی، کالورت‌ها، تونل‌های انتقال آب و دهانه تخلیه کننده‌ها هستند. فرسایش ناشی از سایش همواره به صورت یک موضوع پیوسته و دائمی در نگهداری سازه‌های هیدرولیکی مطرح بوده و باید حین طراحی سازه در طرح اختلاط بتن لحاظ گردد. خسارت ناشی از سایش در حد چند سانتیمتر است ولی بعد از گذشت زمان، طی عمل سایش، میزان تخریب به‌طور مشخصی بیشتر از این مقدار خواهد بود. اندازه‌گیری سایش بتن توسط آزمایش‌های مختلفی انجام می‌شود. ولی برای

سازه‌های هیدرولیکی، استاندارد ASTM C1138^۱ شبیه‌سازی را بهتر انجام می‌دهد.

سایش به عوامل گوناگونی وابسته می‌باشد. سختی ذرات، سرعت آب، مسیر جریان، شکل سطح بتنی، مقاومت بتن و همچنین مدت زمان قرار گرفتن سازه در معرض این مولفه‌ها عوامل تاثیرگذار بر مقدار سایش می‌باشد و عواملی که بر مقاومت سایشی بتن اثر می‌گذارد شامل مشخصات سنگدانه‌ها، مقاومت بتن، نسبت‌های اختلاط، استفاده از سیمن‌های خاص و مواد افزودنی معدنی مانند میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی، الیاف و دو عامل پرداخت سطح و شرایط عمل‌آوری.

لزوم افزایش کیفیت بتن برای بهبود عملکرد در برابر عوامل آسیب فیزیکی باعث می‌شود تا عملکرد بتن‌های خاص که از طرح‌های مخلوط و مصالح مختلف تشکیل شده‌اند مورد توجه قرار بگیرند.

بتن‌های خاص یعنی بتنی که حداقل در یکی از ویژگی‌هایش تفاوت قابل ملاحظه با بتن معمولی داشته باشد. علت دستیابی به عمده بتن‌های خاص موجود، پیشرفت‌هایی است که در تولید مواد افزودنی، ماشین آلات و تجهیزات به وجود آمده است.

۲. فرسایش در بتن

انجمن بتن آمریکا^۲ (ACI) فرسایش بتن در سازه‌های هیدرولیکی را به معنی جدا شدن پیش‌رونده ذرات جامد بتن توسط سایش، خلاءزایی (کاویتاسیون) و حمله شیمیایی می‌داند. [۱] آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی وارد بر بتن در سازه‌های هیدرولیکی باعث کاهش جدی مقاومت، دوام و پایداری می‌گردد.

اغلب آسیب‌های موجود در سازه‌های هیدرولیکی در اثر عوامل فیزیکی که شامل سایش و کاویتاسیون می‌باشد، در

^۱ American Society for testing and materials (ASTM)

^۲ American Concrete Institute

سطوح در معرض برخورد اجسام سخت، کانال‌ها و سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریز، حوضچه آرامش و تونل‌های انتقال آب رخ داده است. [۲] در چند سرریز و حوضچه آرامش کشورمان نیز پدیده کاویتاسیون و سایش سبب خسارت‌های عمده‌ای شده است. در جدول ۱، چند نمونه از سازه‌های آسیب دیده توسط عوامل فیزیکی سایش و کاویتاسیون بیان شده است. [۲]

جدول ۱- چند نمونه از آسیب‌های فیزیکی بتن (انجمن بتن آمریکا، کمیته ۲۱۰)

نام پروژه	محل پروژه	نوع سازه	نوع آسیب
Arkabutla Lake	Coldwater, MS	حوضچه آرامش	سایش
Arthur R. Bowman Dam	Oregon	خروجی تونل	کاویتاسیون
Blue Mesa Dam	Colorado	تونل انتقال آب	سایش
Bratsk Dam	Bratsk, Irkutsk, U.S.S.R	سرریز	کاویتاسیون
Center Hill Dam	Carthage, TN	حوضچه آرامش	سایش و کاویتاسیون
Derbendikhan Dam	Sulaymaniya, Iraq	سرریز	کاویتاسیون
Oologah Lake Dam	Tulsa, OK	حوضچه آرامش	سایش
Palisades Dam	Irwin, ED	سرریز	سایش و کاویتاسیون

۱.۲. کاویتاسیون (خلأزایی)

ضربات قدرتمندی می‌تواند ذرات بتن را قله‌کن کرده و باعث تشکیل ناپیوستگی می‌شود که خود آن می‌تواند باعث آسیب گسترده‌تری در اثر پدیده کاویتاسیون گردد. [۱] پدیده کاویتاسیون اغلب در سرریزها و تونل‌های انتقال آب رخ می‌دهد. عوامل تاثیرگذار بر این پدیده به سه دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از: عوامل هندسی: ناهمواری‌ها، شکاف‌ها، دهانه مجرا و انحنا، عوامل هیدرودینامیکی: مقدار دبی مخصوص و سرعت آب، عوامل متفرقه: درجه حرارت آب، پراکندگی هوا و میزان انتقال حرارت.

مطابق تعریف انجمن بتن آمریکا (ACI)، تخریب در اثر خلأزایی یا کاویتاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که جریان آب با سرعت بالا به صورت نامنظم و ناپیوسته به سطح بتن برخورد کند. ناپیوستگی در مسیر جریان باعث ایجاد مناطق فشار منفی شده و حباب‌هایی از خلأ ایجاد گردد. این حباب‌ها به پایین دست جریان حرکت کرده و می‌ترکند. اگر ترکیدگی حباب‌ها، مجاور یک سطح بتنی اتفاق بیافتد، یک ناحیه ضربه‌ای با فشار بالا در یک منطقه بی‌نهایت کوچک روی سطح بتن ایجاد می‌کند. چنین



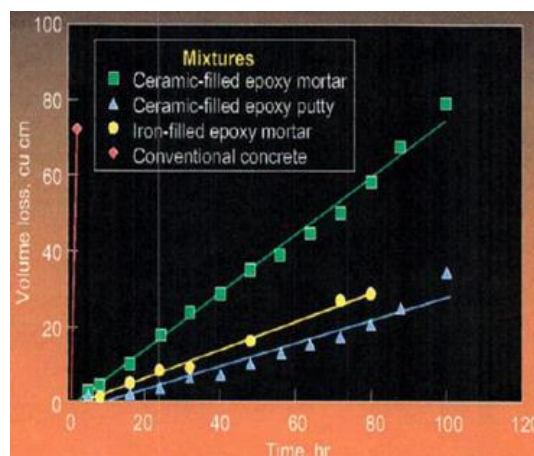
شکل ۱- نمونه‌های خسارت ناشی از کاویتاسیون در سازه هیدرولیکی

۱.۱.۲. ارزیابی مقاومت مصالح در برابر کاویتاسیون

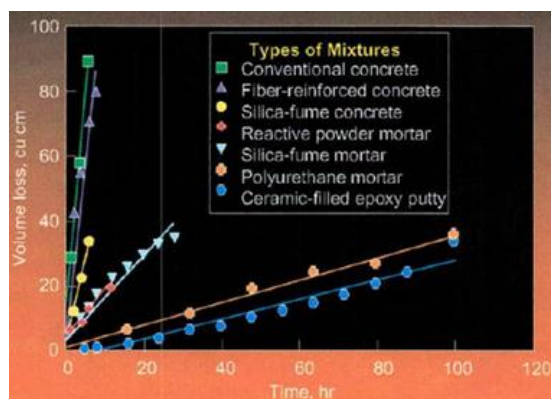
مکدونالد [۳] بر روی مقاومت ۸۰ نوع مصالح مختلف ترمیمی و روکش محافظ در برابر کاویتاسیون با استفاده از روش ونتوری^۱ تحقیق کرد.

مقاومت در برابر کاویتاسیون بتن‌های معمولی با استفاده از لاتکس، میکروسیلیس، افزودنی شیمیایی کاهنده آب، پودرهای فعال و الیاف فولادی افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری باعث بهبود مقاومت در برابر کاویتاسیون می‌شود. (شکل ۲) رابطه مشخصی بین اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه و مقاومت در برابر کاویتاسیون در مصالح با پایه سیمانی وجود ندارد. [۳]

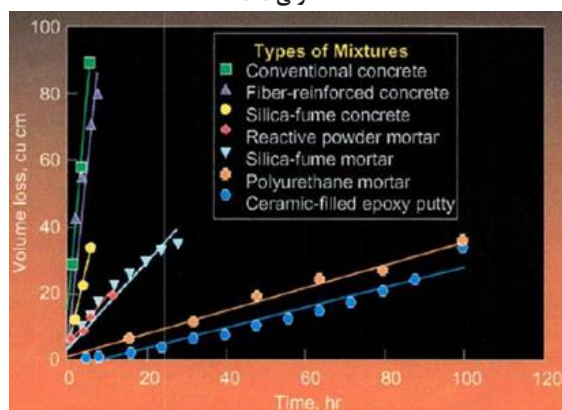
برخلاف مصالح با پایه سیمانی در مصالح با پایه پلیمری رابطه مشخصی بین مقاومت فشاری و کاهش حجم ناشی از کاویتاسیون وجود ندارد. این مصالح بعد از قرارگیری در معرض شرایط کاویتاسیون به مدت ۸۰ تا ۱۰۰ ساعت، کاهش حجمی کمتر از ۵۰ سانتی‌متر مکعب داشتند. ملات شامل پلی اورتان بهترین مقاومت در برابر کاویتاسیون را نشان داد. انواعی از ملات‌های اپوکسی در این آزمایش استفاده شده است، نتایج را در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. چسب سرامیکی پر شده اپوکسی بهترین نتیجه را در برابر کاویتاسیون دارد.



شکل ۲- کاهش حجم کاویتاسیون در برابر مقاومت فشاری مصالح با پایه سیمانی [۳]



شکل ۳- مقاومت در برابر کاویتاسیون سیستم‌های اپوکسی در مقایسه با بتن معمولی [۳]



شکل ۴- مقاومت در برابر کاویتاسیون مصالح ترمیمی مختلف [۳]

کاهش حجم ناشی از کاویتاسیون در اکثر مصالح با پایه پلیمری کمتر از بسیاری از مصالح با پایه سیمانی مختلف می‌باشد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد بعد از ۵۰ ساعت قرار دادن نمونه‌ها در معرض شرایط کاویتاسیون، ۲۰ نمونه مصالح با پایه پلیمری و فقط ۶ نمونه مصالح با پایه سیمانی مقاومت بالا کاهش حجم کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب داشتند.

در شکل ۴ مقایسه بین طرح‌های مختلف مصالح ترمیمی در برابر مدت زمان در معرض کاویتاسیون انجام شده است. به ترتیب چسب سرامیکی اپوکسی، ملات پلی اورتان، ملات میکروسیلیس و پودر فعال بهترین نتایج را در برابر کاویتاسیون دادند.

مهندسین ارتش ایالات متحده در آزمایشگاه، مقاومت کاویتاسیون بسیاری از مواد ترمیمی مختلف را آزمایش کرده اند؛ با این حال تا به امروز، هیچ ماده از جمله فولاد

¹ Venturi-type apparatus

ضد زنگ و چدن، قادر به مقاومت کامل در برابر کاویتاسیون نشدند. [۴] در بسیاری از موارد بتن پلیمری، ملات اپوکسی و ملات‌های سیمانی برای ترمیم کاویتاسیون استفاده شده است. بسته به شرایط محل و نوع آسیب یکی از روش‌های فوق اجرا می‌شود.

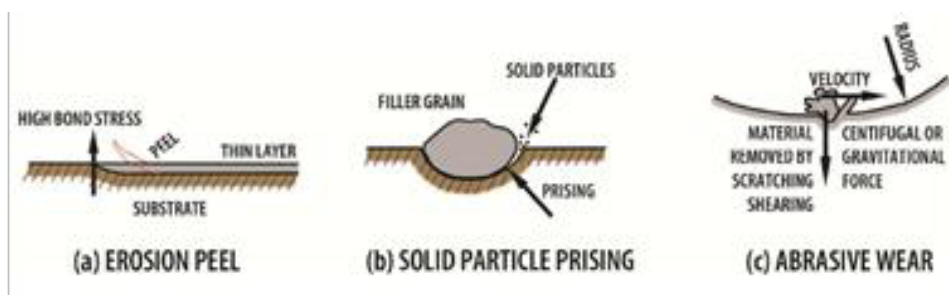
ون فای [۵] برنامه برای ارزیابی مصالح ترمیمی استفاده شده در سرریز سد (Yellowtail) انجام داد که مصالحی را انتخاب کند تا بهترین شانس موفقیت را با توجه به موقعیت دشوار و شرایط نوردی سخت داشته باشد.

۲.۲. سایش

مطابق تعریف انجمن بتن آمریکا (ACI)، سازه‌های بتنی که آب با سرعت بالا همراه با گل و لای، سنگریزه، شن و ذرات معلق منتقل می‌کنند، موضوعات مورد مطالعه خرابی بتن در اثر سایش می‌باشند. حوضچه‌های آرامش و سرریزها در سدها، بیشتر در معرض سایش قرار دارند. [۱] سایش در اثر ضربه مواد زائد به سطح کف اتفاق می‌افتد. آسیب ناشی از این خرابی به صورت صیقلی شدن سطح بتن ظاهر می‌شود. زمانی که جریان‌های شدید و آشفته

وجود دارد، نیروی ضربه اجسام بیشتر و تخریب‌های قابل توجهی به وجود می‌آید. میزان تخریب سایش تابعی از سختی ذرات، سرعت آب، مسیر جریان، شکل سطح بتنی، مقاومت بتن و همچنین مدت زمان قرار گرفتن سازه در معرض این مولفه‌ها می‌باشد. فرسایش ناشی از سایش آب و مواد جامد باعث گسترش ریز ترک‌ها روی سطوح بتنی سازه می‌شود. توسعه ترک‌ها به دلیل بیش از حد بودن تنش کششی وارد بر بتن می‌باشد. نیروهای فشاری و کششی باعث تسریع در گسترش ترک‌های بتن، ضعف سازه از جنبه مقاومت خستگی و از بین رفتن اتصال خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود. [۴، ۶]

لیو و همکاران [۷] مکانیزم خرابی بر اثر سایش را در سه مرحله تعریف کرد. (شکل ۵) مرحله اول در اثر جریان آب و نفوذ آن باعث پوسته شدن سطح بتن می‌شود و سپس بر اثر ضربه ذرات جامد معلق ریز ترک‌هایی در سطح بتن به وجود می‌آید. مرحله سوم سایش اتفاق می‌افتد. در شکل ۶ و ۷ نمونه‌هایی از خرابی ناشی از سایش نشان داده شده است.



شکل ۵- عملکرد سایش تحت آب روی سطح بتن [۷]



شکل ۶- خرابی ناشی از سایش در حوضچه آرامش

شکل ۷- خرابی ناشی از سایش در سرریز سد

آزمایش‌های مختلفی در ASTM تعریف شده است. [۸]

ASTM C418 روش آزمایش به وسیله ماسه پاشی (سند بلاست)^۱ بر روی سطح بتن.

ASTM C779 سه روش آزمایش برای سایش سطح افقی در آزمایشگاه.

ASTM C994 روش آزمایش مقاومت سایشی برای سطح بتن یا ملات با استفاده از روش دوار – برش.

ASTM C1138 روش آزمایش مقاومت بتن در برابر سایش در سازه‌های هیدرولیکی (روش زیر آب).

کاربرد آزمایش‌های فوق را در شرایط مختلف در جدول ۲ مشاهده می‌کنید. هورسچارک [۹] نشان داد که برای ارزیابی سایش بتن هیدرولیکی، روش بوهم مناسب نیست و باید با روش سایش تحت آب (ASTM C1138) مدل شود تا شرایط طبیعی سایش برقرار گردد.

جدول ۲- کاربرد آزمایش‌ها برای مقاومت سایشی بتن [۸]

Type of Abrasion	ASTM C418	ASTM C779			ASTM C944	ASTM C1138
		Method A	Method B	Method C		
Foot traffic or light to medium tire-wheeled traffic etc.		X			X	
Forklift, heavy tire-wheeled traffic, automobile with chains, heavy steel wheeled traffic or studded tires			X	X	X	
Abrasive Erosion of waterborne particles on hydraulic structures	X					X

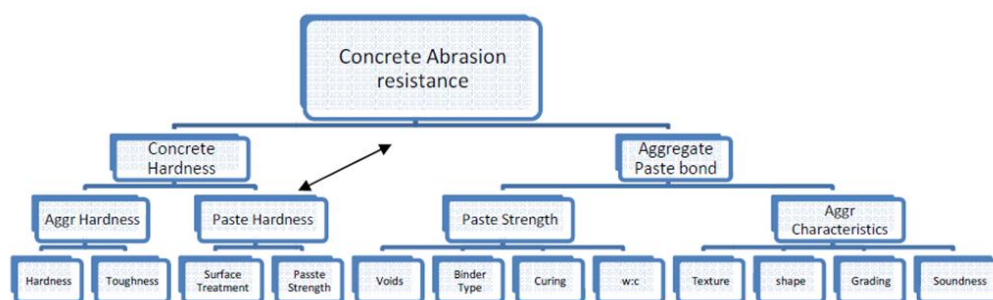
۱.۲.۲. تاثیر مصالح بر مقاومت سایشی بتن

پاپنفوس [۱۰] عوامل اصلی مقاومت سایشی بتن را سخت شدگی بتن و پیوند بین سنگدانه و خمیر می‌داند. این عوامل به ویژگی‌هایی مختلفی بستگی دارد. (شکل ۸)

برای مقاومت سایشی و فشاری دو پارامتر خواص فیزیکی سنگدانه، سختی و چقرمگی اهمیت دارد. چقرمگی توانایی جذب انرژی سنگدانه و تغییر شکل پلاستیک بدون گسیختگی می‌باشد. ریزدانه به علت توانایی ارتباط بهتر با یکدیگر عملکرد بهتری در سایش نسبت به درشت‌دانه دارد. [۱۱]

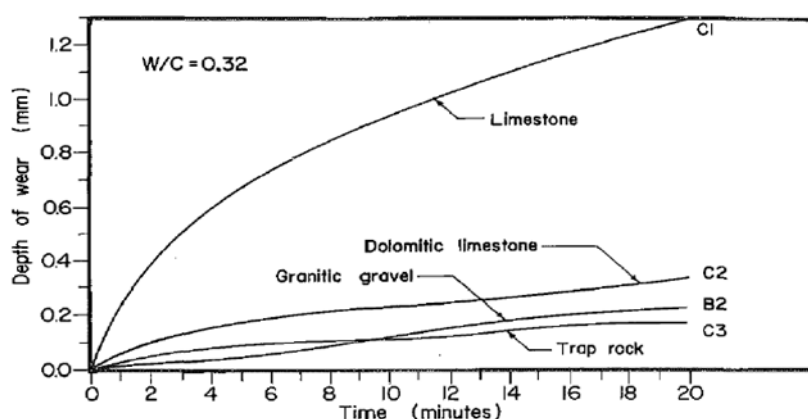
لاپلانته و همکاران [۱۲] چهار نوع سنگدانه، گرانیته، آهکی، آهکی دولومیتی، نوعی سنگ آذرین (ترکیبی از بازالت و گابرو) در بتن را از نظر مقاومت سایشی بررسی کردند (شکل ۹). کاهش عمق تحت سایش هر سنگدانه توسط آزمایش لس آنجلس و در بتن مطابق با استاندارد (ASTM C779) اندازه گیری شده است.

¹ Sandblast



شکل ۸- عوامل تاثیرگذار بر مقاومت سایشی بتن [۱۰]

نتایج نشان می‌دهد (شکل ۹) که سنگدانه آهکی بیشترین و سنگدانه گرانیتی و آذرین کمترین عمق سایش را دارند. عمق سایش بتن متناسب با مقاومت سنگدانه‌ها می‌باشد، با سختی کمتر سنگدانه، کاهش عمق ناشی از سایش افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقایسه سایش چهار نوع بتن ساخته شده با سنگدانه‌های مختلف [۱۲]

(گابرو و بازالت) با دانه‌های ریز نسبت به ماسه سنگ با دانه‌های درشت، بتن با مقاومت سایشی بیشتری را تولید می‌کنند. [۱۳] ویژگی‌هایی از سنگدانه که در مقاومت سایشی تاثیر مهمی دارد عبارتند از: بافت، شکل، دانه‌بندی و سلامت که پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه را بهبود می‌بخشد. چقرمگی سنگدانه‌ها عامل بسیار مهمی برای سختی سنگدانه‌ها می‌باشد. [۱۰]

لیو و همکاران [۷] تاثیر بزرگترین اندازه سنگدانه را در آزمایش بررسی کردند. بزرگترین اندازه‌های ۵، ۱۳ و ۲۵ میلیمتر در طرح‌های بتن با مقاومت فشاری پایین و بالا (تقریباً ۲۵ تا ۹۰ مگاپاسکال) وارد شدند. برای بتن با مقاومت کم، افزایش بزرگترین اندازه سنگدانه، مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد. اندازه سنگدانه بزرگتر، سطح مخصوص کمتری دارد و به خمیر سیمان کمتری برای پوشش نیاز دارد بنابراین اتصال بهتری پیدا کرده و باعث کاهش مقدار سنگدانه‌های تحت سایش می‌شود اگرچه سنگدانه بزرگتر زمانی که مقاومت بتن کم است، نیاز به

محققین مشاهده کردند که نوع سنگدانه عامل مهمی در مقاومت سایشی بتن است.

کیلیچ و همکاران [۱۳] تاثیرات سختی سنگدانه‌ها بر مقاومت سایشی بتن را بررسی کردند. پنج نوع درشت‌دانه شکسته، گابرو، بازالت، کوارتز، سنگ آهک و ماسه سنگ را ارزیابی کردند. مقاومت فشاری و مقاومت سایشی از آزمایش لس آنجلس را برای هر سنگ محاسبه کردند و رابطه مناسبی بین سختی و مقاومت سایشی سنگدانه مشاهده شد. در بتن عادی ممکن است سنگدانه ضعیف‌تر و نرم‌تر نسبت به سنگدانه قوی‌تر سایش بیشتری را متحمل می‌شود زیرا در مقاومت فشاری بالا در حالی که سنگدانه شکسته نمی‌شود بتن به مقاومت فشاری می‌رسد و در این حالت خمیر سیمان عامل تعیین کننده مقاومت خواهد بود.

بتن ساخته شده با سنگدانه‌های گابرو و بازالت بیشترین مقاومت فشاری و سایشی بدست آمد و ماسه سنگ عملکرد ضعیفی در برابر این خواص داشت. در این مورد تاثیر اندازه ذرات در سنگ اصلی مشهود بود. سنگدانه‌های آذرین

انرژی بیشتری برای کنده شدن دارد. در بتن با مقاومت بالا رابطه‌ای با اندازه سنگدانه وجود ندارد.

مطابق تحقیقات انجام شده، اندازه درشت‌دانه، کیفیت و پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه عوامل مهم در مقاومت سایشی بتن می‌باشد. درشت‌دانه در سطح بالای بتن اغلب توسط جریان آب و ماسه کنده شده و باعث ایجاد حفره در سطح می‌شود و سایش بیشتری را ایجاد می‌کند.

اگر نسبت آب به سیمان بالا باشد، مقدار مصالح سیمانی بتن افزایش و درشت‌دانه کاهش می‌یابد که باعث افزایش سرعت فرسایش تحت سایش می‌شود. زمانی که اندازه سنگدانه بیشتر از ۱۳ میلیمتر باشد، مقاومت سایشی افزایش می‌یابد و اگر تقریباً از ۵ میلیمتر کمتر باشد، مقاومت سایشی کاهش می‌یابد. [۷]



شکل ۱۰- ترک‌های اتصال بین سنگدانه و خمیر با نسبت آب به سیمان ۰/۰۵ [۷]

میکروسلیس، پوزولانی ریز می‌باشد که حفره‌های بتن را پر کرده و تخلخل را کاهش می‌دهد. واکنش‌های پوزولانی میکروسلیس باعث بهبود در ناحیه انتقال بتن شده و مقاومت فشاری و سایشی را افزایش می‌دهد. [۱۴]

هلند و گوتشو [۱۵] برای سد (Kinza) و کانال رودخانه لس آنجلس^۱ که دچار سایش شدیدی شده بودند، بتن میکروسلیسی با مقاومت بالا پیشنهاد دادند. مقدار میکروسلیس ۱۵٪ وزن سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۳ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که این بتن، مقاومت سایشی بالایی دارد.

لیو و همکاران [۱۴] اثر میکروسلیس بر مقاومت سایشی را بررسی کردند. دو طرح مخلوط با میکروسلیس به مقدار ۵٪ و ۱۰٪ وزن سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و ۰/۴ ساخته شده و به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری مرطوب شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت سایش ۱۰٪ و ۱۶٪ در مقایسه با بتن کنترل (بدون میکروسلیس) کاهش می‌یابد. علت این کاهش، تراکم بهتر بتن، بهبود ناحیه انتقال و پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌باشد. شکل ۱۱ اثر میکروسلیس بر سرعت سایش را نشان می‌دهد.

حسن [۱۶] بر روی مقاومت سایشی چهار نوع مصالح ترمیمی بتن معمولی، اصلاح شده با لاتکس، بتن الیافی با میکروسلیس و خاکستربادی تحقیق کرد. بتن الیافی با میکروسلیس و بعد از آن، بتن اصلاح شده با لاتکس بهترین نتیجه را در برابر سایش دارند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مواد مکمل سیمان، مقاومت در برابر سایش بتن را افزایش می‌دهند. (جدول ۳)

سرباره کوره آهن گدازی باعث بهبود ریزساختار بتن و کاهش تخلخل می‌شود. استفاده از سرباره کارایی را افزایش، رشد مقاومت را کاهش و مقاومت دراز مدت را افزایش می‌دهد. خواص این ماده باعث افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود. [۱۱]

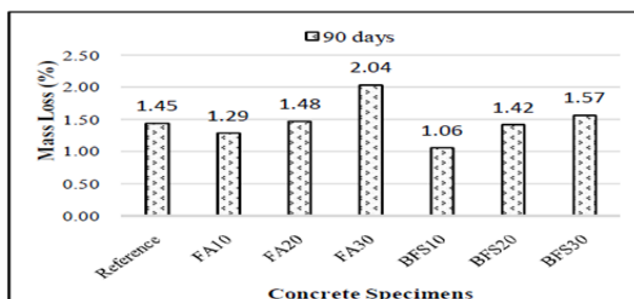
وو^۲ و همکاران [۱۷] بر روی مقاومت سایشی بتن حاوی سرباره تحقیق کردند. پنج نسبت آب به سیمان و چهار درصد استفاده مختلف سرباره در این تحقیق استفاده شده است و دیگر پارامترها ثابت می‌باشد. سیمان نوع یک، حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلیمتر و مدول نرمی ماسه ۲/۸۲ می‌باشد. در تمامی طرح‌ها از فوق روان‌کننده استفاده شده است. روش آزمایش سایش انجام شده به این صورت است که جریان آب به همراه ماسه و کوارتز در زاویه ۴۵ درجه نسبت به نمونه قرار دارد.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که در مقدار سرباره ۴۵٪ و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ بهترین کاهش حجم سایش را دارد. بعد از مقدار ۴۵٪ مقاومت سایشی کاهش می‌یابد. با

² Wu

¹ Los Angeles River

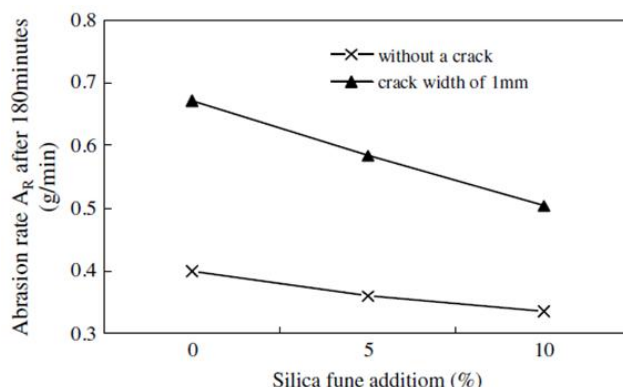
کردن ۱۰٪ سرباره به جای سیمان، بهترین مقاومت سایشی را دارد. شکل ۱۳ مقدار کاهش وزن ناشی از سایش را در برابر طرح‌های شامل سرباره و خاکستر بادی در مقایسه با بتن عادی و محدودیت در استفاده از این مواد را نشان می‌دهد. با استفاده از سرباره و خاکستر بادی جایگزین سیمان در این تحقیق، بتن‌های مقاوم در برابر سایش با یک راه حل زیست محیطی و اقتصادی تولید می‌شوند.



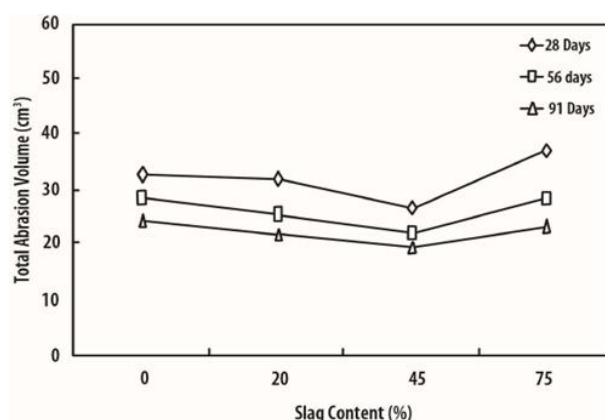
شکل ۱۳- کاهش وزن بتن‌ها در آزمایش سایش ASTM C1138 [۱۸]

هه و همکاران [۱۹] در تحقیق خود با جایگذاری ۴۰٪ سرباره ریز به جای سیمان، تاثیر آن را بر مقاومت سایشی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن این ماده افزودنی ریز، به علت تولید سیلیکات کلسیم هیدراته و بهبود ناحیه انتقال باعث بهبود ۸۲٪ مقاومت سایشی سطح ملات می‌شود. آزمایش سایش در این تحقیق مطابق با مشخصات استاندارد DL/T 5150-2017 اندازه‌گیری شده است. مقاومت فشاری بتن با سرباره ریز ۹۵٪ افزایش داشته است.

کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۲ به ۰/۲۸ مقاومت در برابر سایش افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ نمودار تغییرات سایش نسبت به مقدار سرباره را نشان می‌دهد. [۱۷] یکی از نتایج این تحقیق، استفاده از سرباره باعث سختی بیشتر سطح می‌شود و فرسایش ناشی از سایش دیرتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۱- تاثیر میکروسیلیس بر سرعت سایش [۱۴]



شکل ۱۲- تاثیر مقدار سرباره بر مقاومت سایشی بتن [۱۷]

بایازیت و همکاران [۱۸]، مقاومت سایشی بتن با سرباره به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ جایگزین سیمان ساخته و با بتن پایه مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزین

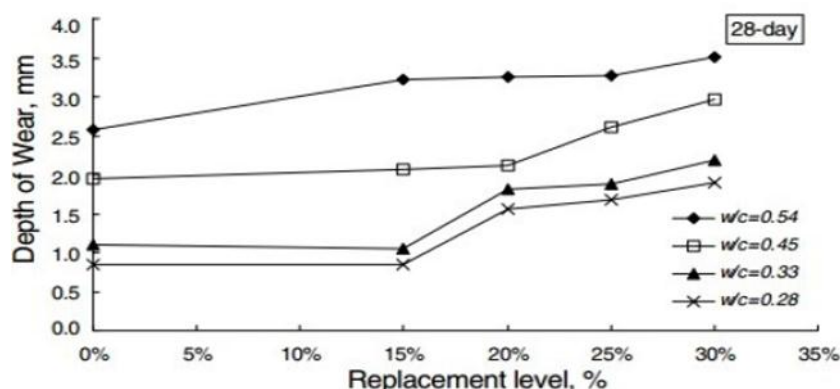
جدول ۳- مقاومت فشاری، خمشی و سرعت سایش بتن در ۲۸ روز [۱۶]

	Compressive Strength MPa	Flexural Strength MPa	Abrasion rate (g/m ² /min)
Concrete Material	41.9	5.3	6.36
Latex modified Repair Material	45.4	7.5	5.04
Silica Fume Repair Material	57.8	12	2.91
Fly Ash Repair Material	48.15	11	7.15

کارایی را افزایش می‌دهد باعث افزایش میزان سگدانه در بتن شده و همین عامل باعث افزایش مقاومت در برابر سایش می‌گردد. [۲۰]

نایک و همکاران [۲۱] اثر خاکستربادی کلاس C بر مقاومت سایشی بتن پرمقاومت را بررسی کرد. پنج مقدار مختلف جایگزین سیمان (۱۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰٪) استفاده کردند. این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت سایشی وابستگی به مقاومت فشاری دارد. خاکستربادی کلاس C تا ۳۰٪ جایگزینی سیمان، مقاومت سایشی شبیه به بتن عادی بدون خاکستربادی می‌دهد. با بیشتر شدن مقدار خاکستربادی از ۳۰٪، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد بنابراین مقاومت سایشی نیز کاهش می‌یابد.

ین و همکاران [۲۲] اظهار داشت که بتن با ۱۵٪ خاکستربادی جایگزین سیمان از نظر مقاومت سایشی مشابه بتن عادی بدون خاکستربادی می‌باشد. اگر بیشتر از ۱۵٪ خاکستربادی جایگزین شود در نسبت آب به سیمان پایین، مقاومت سایشی کاهش می‌یابد. در این تحقیق مقاومت سایشی بتن پرمقاومت مطابق با ASTM C1138 و خاکستربادی کلاس F جایگزین سیمان در چهار مقدار مختلف (۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰٪) بررسی شد. شکل ۱۴ رابطه بین عمق کنده شده بتن توسط سایش در ۲۸ روز و درصد وزنی خاکستربادی جایگزین سیمان نشان می‌دهد.



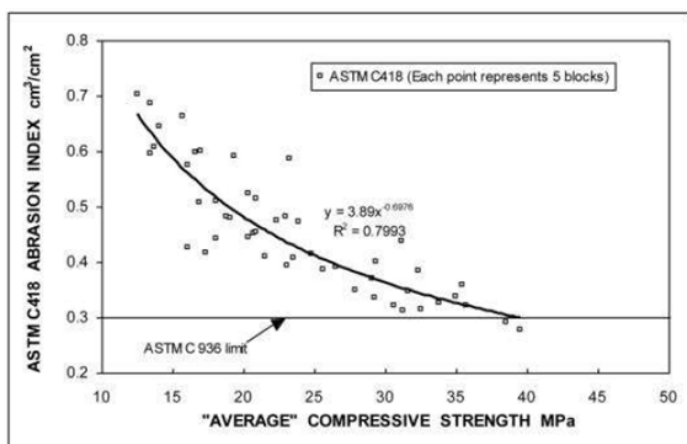
شکل ۷- تاثیر خاکستربادی بر مقاومت سایشی بتن در ۲۸ روز [۲۲]

نتایج کلی آزمایش نشان داد که استفاده از افزودنی‌های معدنی در مقادیر مناسب می‌تواند مقاومت سایشی بتن را بهبود بخشد.

هورسچاک [۲۳] در تحقیقی که بر روی مقاومت سایشی بتن توانمند و بتن توانمند الیافی داشت، سه نوع الیاف (فولادی به طول ۳۰، ۵۰ میلیمتر و پلی‌پروپیلن به طول ۱۹ میلیمتر) استفاده کرد. آزمایش سایش انجام شده مطابق با استاندارد ASTM C1138 و به مدت ۱۲۰ ساعت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اگر سرعت جریان کم باشد، الیاف فلزی مقاومت سایشی را افزایش نمی‌دهد. فرسایش ناشی از سایش بستگی به قرارگیری الیاف در بتن

بایازیت و همکاران [۱۸]، مقاومت سایشی بتن تحت آزمایش ASTM C1138 با خاکستربادی به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ جایگزین سیمان ساخته و با بتن پایه مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزین کردن ۱۰٪ خاکستربادی به جای سیمان، مقاومت سایشی مشابهی با بتن معمولی دارد. در شکل ۱۳ مقدار کاهش وزن ناشی از سایش را در برابر طرح‌های شامل سرباره و خاکستربادی در مقایسه با بتن عادی و محدودیت در استفاده از این مواد را نشان داده شده است.

سایشی را دارد. مانند نسبت آب به سیمان، مقدار و نوع سیمان، طرح مخلوط، تراکم و عمل‌آوری. پاپنفوس در تحقیق خود می‌گوید که "اگرچه مقاومت سایشی به طور کلی با مقاومت فشاری رابطه دارد، با استفاده از پرداخت سطح‌های خاص یا مصالح، می‌توان به سطحی با مقاومت سایشی بیشتر با استفاده از بتن مقاومت فشاری کم، رسید" و همین‌طور "از ساخت و اجرای ضعیف، ممکن است سطحی با کیفیت کم تولید کند که دارای مقاومت سایشی کم از بتن مقاومت بالا باشد". مثلاً بتنی که مقاومت زیادی داشته باشد ولی در معرض آب انداختگی یا عمل‌آوری نامناسب قرار بگیرد، سطح بتن می‌تواند در معرض خطر باشد و مقاومت سایشی کمی را حاصل شود. مطابق این تحقیق، رابطه بین مقاومت سایشی و مقاومت فشاری در شکل ۱۵ بررسی شده است.



شکل ۱۵- رابطه بین مقاومت فشاری و سایشی [۱۰]

نسبت آب به سیمان معیار اصلی تعیین مقاومت بتن می‌باشد. بتن با آب به سیمان کم، تخلخل کمتری دارد که باعث افزایش مقاومت و اتصال قوی‌تری در بتن سخت شده می‌شود و در نتیجه بر عملکرد کلی فرسایش ناشی از سایش تاثیر می‌گذارد. هرچه این نسبت بیشتر شود، کارایی نیز افزایش می‌یابد و مقدار آب اضافی باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود.

لیو و همکاران [۷] در تحقیق خود، مقاومت سایشی بتنی با سیمان پرتلند نوع یک شامل ۳۰٪ سرباره کلاس F و برای

خصوصاً الیاف موجود در سطح و زاویه برخورد ذرات ساینده به الیاف دارد. با بررسی نتایج، بهترین مقاومت سایشی برای بتن با الیاف فولادی ۵۰ میلیمتری (قطر ۱ میلیمتر) می‌باشد زیرا این الیاف سختی کمتری دارد. بتن با الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت سایشی بهتری از بتن بدون الیاف دارد.

چنگ و همکاران [۲۴] عملکرد الیاف فولادی را در بتن بررسی کردند. آن‌ها دست یافتند که وقتی نسبت آب به سیمان زیاد است، افزودن الیاف کمکی به افزایش مقاومت سایشی نمی‌کند. اگرچه زمانی که نسبت آب به سیمان پایین باشد، پس از عمل‌آوری دراز مدت، افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت سایشی بتن می‌شود.

۲.۲.۲. تاثیر مقاومت فشاری و نسبت آب به سیمان

بر مقاومت سایشی

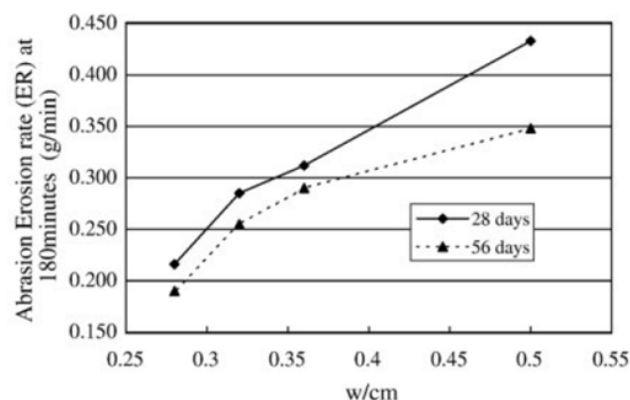
مقاومت سایشی بتن با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد ولی به معنی این نمی‌باشد که مقاومت فشاری کم لزوماً مقاومت سایشی کمی دارد. طبق بحث‌های گذشته مقاومت سایشی بخشی از دوام بتن می‌باشد و دوام لزوماً مقاومت فشاری زیادی نیاز ندارد. اگرچه بتن با دوام زیاد مقاومت فشاری زیادی دارد ولی اگر مقاومت فشاری کم باشد لزوماً نمی‌توان نتیجه گرفت دوام بتن کم می‌باشد. [۲۵] عواملی مانند نوع ملات، روش تراکم، پرداخت سطح و عمل‌آوری تاثیرگذار در دوام بتن می‌باشد.

اکثر محققین بر این باورند که در حالت کلی، رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بتن وجود دارد که افزایش مقاومت فشاری بتن، اثرات ناشی از ایش را کاهش داده و مقاومت در برابر سایش افزایش می‌یابد. مقاومت سایشی توجه بیشتری به سطح بتن دارد درحالی که در مقاومت فشاری توانایی هسته بتن برای تحمل تنش فشاری می‌باشد.

پاپنفوس [۱۰] معتقد است اقداماتی که برای بهبود مقاومت فشاری انجام می‌شود توانایی بهبود مقاومت

چهار نسبت آب به سیمان ۰/۵، ۰/۳۶، ۰/۳۲ و ۰/۲۸ به روش جت آب بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت سایشی رابطه معکوس با نسبت آب به سیمان دارد. شکل ۱۶ رابطه نسبت آب به سیمان و سرعت سایش را نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، سرعت سایش افزایش می‌یابد.

لاپاته [۱۲] چهار نسبت آب به سیمان ۰/۳۲، ۰/۲۷، ۰/۳۳ و ۰/۴۱ در بتن استفاده کرد. در تمام نمونه‌ها از فوق روان‌کننده استفاده شده است و اسلامپ حدود ۹۰ تا ۱۹۰ میلیمتر می‌باشد. این تحقیق نتایج مطابق انتظار از خود نشان داد و با کاهش W/C، مقاومت فشاری افزایش و مقاومت سایشی در بتن و ملات افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶- رابطه بین نسبت آب به سیمان و سرعت سایش [۷]

۳. عملکرد بتن‌های خاص در برابر سایش

۳.۱. بتن غلتکی

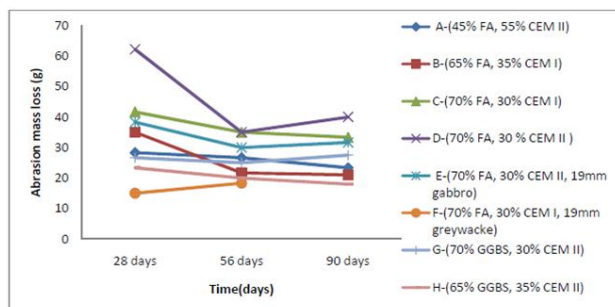
بتن غلتکی به دلیل وجود سیمان کم و سنگدانه زیاد، بسته به جنس سنگدانه، مقاومت سایشی بیشتری از بتن معمولی دارد.

ژین و همکاران [۲۶] بر روی مقاومت سایشی بتن غلتکی در برابر سرعت آب بالا تحقیق کرد. این تحقیق به علت ساخت سد جدید در پایین سد قدیم می‌باشد که در معرض سرعت بالای آب (حدود ۴۰ متر بر ثانیه) قرار دارد. رابطه کلی بین سرعت سایش و آب به صورت $N=c.v^p$ برآورد شده است. (P بین ۳/۳۳ و ۳/۹۳) در این تحقیق

مقایسه بین بتن غلتکی و بتن تغییر شکل یافته^۱ انجام شده است. مقدار خمیر سیمان در بتن تغییر شکل یافته بیشتر است، سطح این بتن صاف‌تر و متراکم‌تری نسبت به بتن غلتکی دارد که باعث فرسایش کم‌تر می‌شود.

پویو [۱۱] بر روی مقاومت سایشی بتن غلتکی با عیار بالا تحقیق کرد. از نظر مقاومت سایشی عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی دارد. در این تحقیق، وقتی ۶۵٪ از خاکستربادی در بتن غلتکی استفاده شده است، عملکرد این بتن شبیه به بتن عادی می‌باشد. در این تحقیق رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بدست نیامد. دلیل آن، عملکرد مهم سطح بتن نسبت به مقاومت فشاری می‌باشد.

بتن غلتکی با ۶۵٪ خاکستربادی تقریباً مقاومت سایشی شبیه به بتن عادی با ۴۵٪ خاکستربادی دارد. بتن ساخته شده با سرباره در مقایسه با خاکستربادی با درصد یکسان، مقاومت سایشی بیشتری دارد.



شکل ۱۷- کاهش وزن تحت سایش در مدت زمان [۱۱]

رائو و همکاران [۲۷] تاثیر سرباره بر خواص مکانیکی و سایشی بتن غلتکی را بررسی کردند. اکثر محققان در گذشته رابطه بین مقاومت سایشی و فشاری را بررسی کردند ولی حال مقاومت سایشی تابع مشخصات مقاومتی بتن می‌باشد. مقاومت سایشی بتن غلتکی در این تحقیق با روش (Cantabro) بررسی شد. این روش مطابق دستگاه لس آنجلس عمل می‌کند. روابط پیشنهادی این تحقیق

¹ Distorted Concrete

برای ارتباط بین مقاومت فشاری، خمشی و کششی شکافی با کاهش حجم توسط آزمایش (Cantabro) و مقاومت سایشی سطح را نشان می‌دهد. از نتایج کلی این تحقیق، افزایش مقاومت سایشی بتن غلتکی با افزایش عمل‌آوری برای همه نمونه‌ها و افزایش مقاومت سایشی با استفاده از سرباره می‌باشد.

۲.۳. بتن خودتراکم

ترک و کاراتاس [۲۸]، هشت نوع طرح مخلوط بتن خود تراکم با درصدهای مختلف میکروسیلیس و خاکستریادی جایگزین سیمان را با بتن عادی تراکم شده با اسلامپ ۶۸ میلیمتر مقایسه کردند. افزایش مقدار میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت سایشی می‌شود. در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی و مقاومت سایشی طرح‌های مخلوط فوق می‌پردازد. نتایج مقاومت فشاری، کششی شکافی، مدول الاستیسیته و حجم فرسایش در ۲۸ در جدول ۴ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های بتن خودتراکم عمق کمتر فرسایش نسبت به بتن عادی متراکم شده دارد. وقتی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد، مقاومت سایشی نیز افزایش پیدا می‌کند ولی این افزایش،

بستگی به تغییر مقاومت کششی ندارد. با افزایش میکروسیلیس و کاهش خاکستریادی، مقاومت در برابر سایش افزایش می‌یابد. زیرا میکروسیلیس اتصال بین سنگدانه و خمیر سیمان را بهبود می‌بخشد. [۲۸] غفوری و همکاران [۲۹]، مقاومت سایشی بتن خودتراکم و بتن عادی متراکم شده را با تغییر در مقدار خمیر و نسبت آب به سیمان مقایسه کردند. برای مقایسه چهار طرح با مقادیر خمیر ۳۸۶، ۴۴۵، ۵۰۴ و ۵۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ بررسی شده است. جهت بررسی تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی، نسبت‌های ۰/۴ و ۰/۴۵ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بتن خودتراکم عملکرد بهتری در برابر سایش دارد. زمانی که مقاومت فشاری بتن خودتراکم بیشتر از ۱۵ تا ۳۰٪ بتن عادی باشد، عمق‌های سایش کمتر از ۵۰ تا ۷۰٪ می‌باشد. افزایش کمیت و کیفیت خمیر بتن خودتراکم باعث افزایش مقاومت سایشی بتن می‌شود. کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث کاهش سرعت سایش می‌شود.

جدول ۴- خواص مکانیکی و نتایج فرسایش نمونه‌های بتن برای ۲۸ روز [۲۸]

Mixture code	Statistical values	Elasticity modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)	Loss on wear (cm ³ /50cm ²)
VTC	Average	33.59	38.32	2.07	11.03
	S.D.	3.10	1.08	0.10	0.20
SCC-FA25	Average	33.42	49.39	3.31	9.80
	S.D.	1.74	2.44	0.33	1.17
SCC-FA30	Average	32.70	45.11	3.77	10.14
	S.D.	1.09	2.12	0.60	0.84
SCC-FA35	Average	32.59	42.56	3.70	10.82
	S.D.	0.83	1.54	0.38	0.56
SCC-FA40	Average	32.81	45.26	3.24	11.33
	S.D.	1.36	1.91	0.28	1.23
SCC-SF5	Average	35.23	58.04	4.36	8.93
	S.D.	2.10	0.56	0.56	0.68
SCC-SF10	Average	35.71	62.81	4.99	8.36
	S.D.	1.42	0.84	0.18	1.04
SCC-SF15	Average	36.54	67.95	4.87	7.28
	S.D.	1.14	1.72	0.36	0.60
SCC-SF20	Average	36.06	66.35	4.70	7.74
	S.D.	1.83	1.87	0.14	0.58

S.D.: Standard deviation

۳.۳. بتن پرمقاومت

کورمان و همکاران [۳۱] عملکرد چهار مصالح ترمیمی برای سدها بر روی بتن پایه بررسی کردند. مصالح ترمیمی شامل ملات سیمان اصلاح شده با پلیمر، بتن الیافی، ملات اپوکسی و ملات میکروسیلیس می‌باشد. آزمایش سایش مطابق ASTM C1138 انجام شده است. بتن الیافی بعد از ملات اپوکسی بهترین نتیجه را در برابر سایش داده است. هر دو این طرح‌ها، سطحی صاف و منظم تامین می‌کند. بتن الیافی اگر الیاف موجود در سطح دچار خوردگی شوند، حفره‌های ایجاد شده باعث کمک به پدیده فرسایش ناشی از سایش می‌شود.

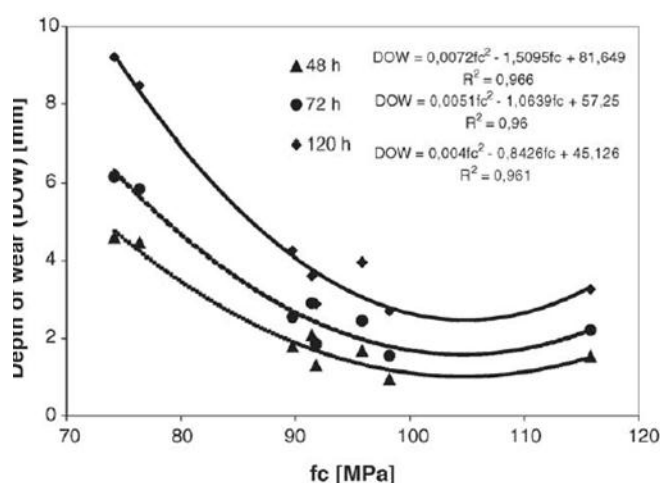
۳.۴. بتن توانمند

لیو و همکاران [۳۲]، بر روی بتن توانمند با سیمان کم برای کاربرد در ساخت سدهای تنظیمی استفاده کرد. آزمایش در محل با مقیاس واقعی برای مقاومت سایشی بین دو نوع بتن معمولی و بتن توانمند با سیمان کم انجام گردید. در ساخت این نوع بتن از خاکستربادی کلاس F و فوق روان‌کننده با نسبت آب به سیمان ۰/۵ استفاده شد. نرخ جریان ۶۴۰ مترمکعب بر ثانیه و ذرات جامد معلق باعث ایجاد انرژی دینامیکی سایشی بزرگی شد. ارتفاع سایش بلوک‌هایی که در معرض جریان آب قرار داده بودند، اندازه گرفتند.

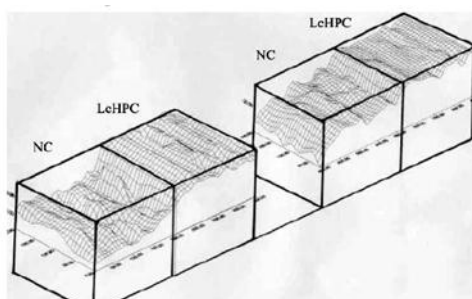
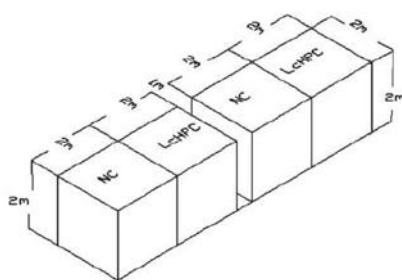
هورسچاک [۳۰] در تحقیق خود بر روی مقاومت سایشی نه بتن پرمقاومت با مقاومت فشاری ۷۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال کار کرد. در این بتن‌ها از میکروسیلیس، سیمان پرتلند و سربراه‌ای، سنگدانه بازالتی و فوق روان‌کننده استفاده شده است. طرح‌ها شامل دو الیاف فولادی ۳۰ و ۵۰ میلیمتری و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد. دو نمونه از طرح‌ها با لاتکس اصلاح شده است. برای بررسی مقاومت سایشی از ASTM C1138 استفاده شده است.

در تحقیق به این نتیجه رسیده شده است که مقاومت سایشی بستگی به مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مصالح الیافی و ابعاد دارد.

اضافه کردن لاتکس بهبودی در مقاومت سایشی بتن ندارد. با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن در آن محدوده سایش کمتری اتفاق می‌افتد.



۱۸- رابطه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و عمق فرسایش [۳۰]



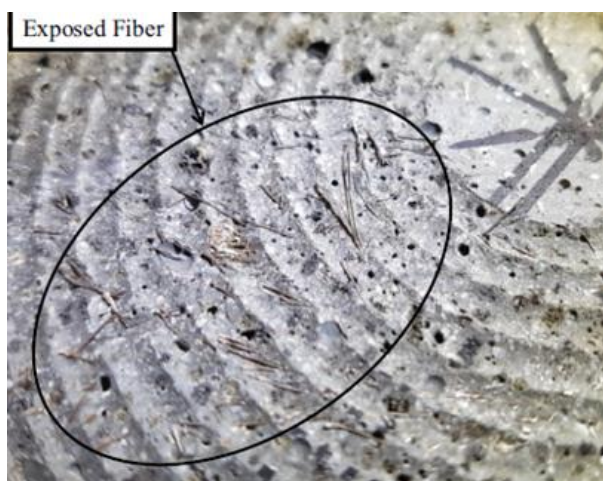
۱۹- مقایسه خرابی سایش در دو نوع بتن معمولی و توانمند با سیمان کم [۳۲]

الیاف و خمیر سیمانی قوی‌تر شده و خصوصیات مکانیکی مخلوط سیمانی را بهبود می‌دهد.

پیو و همکاران [۳۴]، مقاومت سایشی بتن فوق توانمند شامل درشت‌دانه مطابق با ASTM C944 بررسی کردند. نتایج حاکی از مقاومت سایشی عالی بتن فوق توانمند می‌باشد اگرچه وقتی از درشت‌دانه استفاده می‌شود نسبت به بتن فوق توانمند بدون درشت‌دانه، مقاومت سایشی حدود ۵۰٪ کمتر دارد.

خصوصیات درشت‌دانه مصرفی و مشخصات مکانیکی و نسب‌های وزنی طرح مخلوط‌های در نظر گرفته شده است.

بتن فوق توانمند با دولومیت کاهش وزن ناشی از سایش کمتری نسبت به سنگدانه بازالتی دارد. این موضوع وابسته به طبیعت سنگدانه می‌باشد. مقاومت سایشی بتن فوق توانمند وابسته به مقاومت فشاری و کششی می‌باشد. بعد از ایجاد سایش در بتن فوق توانمند، در الیاف موجود در سطح امکان ایجاد خوردگی وجود دارد.



شکل ۲۰- الیاف موجود در بتن فوق توانمند در معرض خوردگی [۳۴]

سبیا و همکاران [۳۵] بر روی بهینه کردن بتن فوق توانمند با نانو و میکرو الیاف تحقیق کردند و ارزیابی برای مقاومت سایشی طبق ASTM C944 انجام دادند. زمانی که بتن شامل میکرو و نانو الیاف بود باعث بهبود مقاومت سایشی شد و ارتباطی واضحی بین درصد الیاف و کاهش وزن سایش نبود. محققین به این نتیجه رسیدند که وجود

بعد از کنده شدن بتن به علت سایش در بتن معمولی، آرماتورها نمایان شده است و دچار مشکل می‌شود. مقاومت سایشی به مقاومت فشاری، چگالی بتن و نحوه توزیع ریزترک‌ها که در طول فرایند هیدراتاسیون به وجود می‌آید، بستگی دارد. بتن توانمند با سیمان کم مقاومت سایشی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. با کم کردن مقدار سیمان و استفاده از افزودنی‌هایی مانند خاکستربادی و سرباره می‌توان شکل‌گیری ریزترک‌ها را بهتر و چگالی بتن را بیشتر کند. [۳۲]

استفاده از بتن توانمند وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که علاوه بر تحمل شرایط سایش، با تقویت خمیر سیمان بتواند در برابر شرایط محیطی و کاویتاسیون تحمل کند و اغلب به این منظور از الیاف استفاده می‌شود. هورسچارک (۲۰۰۹) بر روی دو نوع بتن توانمند ساده و الیافی تحقیق کرد که در سرعت‌های پایین آب (سرعت کم‌تر از سرعت کاویتاسیون) تاثیر قابل توجهی در بهبود سایش ندارد. [۲۳]

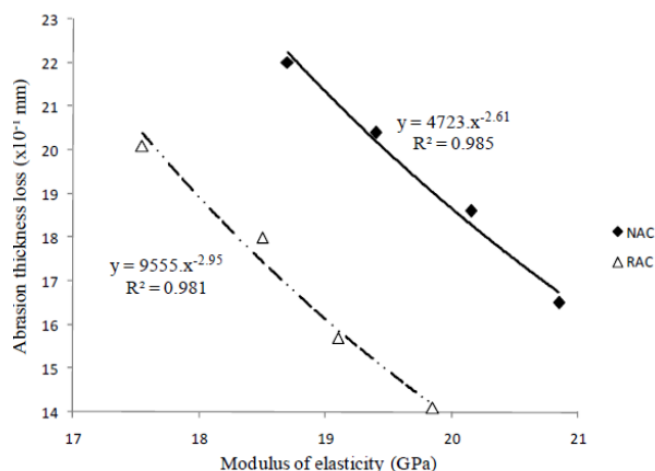
۳.۵. بتن فوق توانمند

یالسنکای و همکاران [۳۳] به بررسی مقاومت سایشی و خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر پرداختند. بتن پودری واکنش‌پذیر نوعی از بتن فوق توانمند می‌باشد. آن‌ها جهت بررسی مقاومت بتن پودری واکنش‌پذیر در برابر فرسایش سایشی در سازه‌ها و روسازی‌ها از آزمایش دیسک غلتان استفاده کردند. در این تحقیق، از الیاف فولادی با درصدهای مختلف صفر، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ و با نسب‌های آب به سیمان متفاوت ۰/۱۸، ۰/۲۲ و ۰/۲۸ استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که با افزودن الیاف فولادی به بتن سبب افزایش مقاومت سایشی بتن و ایجاد سطحی منسجم‌تر می‌شود. به علاوه، هر چه نسبت آب به سیمان در این مخلوط کمتر باشد، تخلخل نمونه کمتر و در نتیجه ساختار ژل C-S-H قوی‌تری تولید می‌شود. لذا اتصال بین

نانو و میکرو الیاف تاثیر قابل توجهی در مقاومت سایشی بتن فوق توانمند ندارد.

۳.۶. بتن با سنگدانه بازیافتی

ایوانگلیستا و بیرتو [۳۶] مقاومت سایشی بتن شامل ریزدانه بازیافتی که نتایج آن با ریزدانه طبیعی و دست نخورده مورد مقایسه قرار گرفته است. سنگدانه بازیافتی را به میزان ۳۰ و ۱۰۰٪ جایگزین کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که به ازای جایگزینی ۳۰ و ۱۰۰٪ کاهش حجم ناشی از سایش ۵ و ۳۰٪ بهبود می‌یابد. محققین دلیل این بهبود را پیوند بهتر بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌دانند. کنین و کوادیو [۳۷] مقاومت سایشی بتن شامل درشت‌دانه بازیافتی تحقیق کردند. در مقایسه بین مدول الاستیسیته و حجم سایش بتن با سنگدانه بازیافتی و طبیعی، بتن با درشت‌دانه بازیافتی مقاومت سایشی بیشتری نسبت به بتن با سنگدانه طبیعی دارد.



شکل ۲۱- ضخامت سایش در مقابل مدول الاستیسیته برای سنگدانه بازیافتی و طبیعی [۳۷]

۴. جمع‌بندی و نتایج

* سایش تحت حرکت جریان آب همراه با مواد جامد و خلاءزایی به علت ترکیدن حباب‌های خلاء ناشی از افت فشار در جریان آب رخ می‌دهد.

* عوامل تاثیرگذار بر میزان سایش به دو دسته هیدرولیکی (سختی ذرات، سرعت آب، مسیر جریان، شکل سطح بتنی و مدت زمان قرار گرفتن سازه در معرض سایش) و خواص بتن تقسیم می‌شود.

* عواملی که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود، مقاومت سایشی را می‌تواند افزایش دهد. مانند کاهش نسبت آب به سیمان، استفاده از مواد افزودنی برای بهبود ناحیه انتقال و سنگدانه با جنس سخت‌تر.

* اضافه کردن الیاف در آب به سیمان کم می‌تواند مفید در مقاومت سایشی باشد.

* مقاومت سایشی بتن غلتکی وابسته به طرح مخلوط می‌باشد و اگر عیار سیمان بالا باشد مقاومت سایشی بیشتری دارد.

* بتن خودتراکم، پرمقاومت، توانمند و فوق توانمند به علت ریز ساختار بهتر و پیوند بهتر بین خمیر سیمان و سنگدانه، مقاومت سایشی بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد.

* الیاف موجود در سطح بتن الیافی یا فوق توانمند می‌تواند بعد از سایش، توسط شرایط محیطی خورده شود و این عمل باعث کمک به پدیده سایش گردد.

* بتن با سنگدانه بازیافتی (درشت‌دانه یا ریزدانه) به علت پیوند بهتر خمیر سیمان و سنگدانه، مقاومت سایشی بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد.

۵. مراجع

- [1] J. R. and Graham et al., "ACI 210R-93 Erosion of Concrete in Hydraulic Structures Members of ACI Committee 210," 1998.
- [2] J. R. Graham, A. E. Herrera, and E. K. Schrader, "Compendium of Case Histories on Repair of Erosion-Damaged Concrete in Hydraulic Structures Reported by ACI Committee 210," 2004.
- [3] J. E. McDonald, "Evaluation of materials for repair of erosion damage in hydraulic structures," Spec. Publ., vol. 192, pp. 887–898, 2000.

- [4] K. F. von Fay, *Guide to Concrete Repair*, no. August. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 2015.
- [5] K. F. von Fay, "Laboratory Evaluation of Concrete Thin Repair Materials -Yellowtail Dam Spillway Tunnel Repairs," 2009.
- [6] Y. W. Liu, S. W. Cho, and T. H. Hsu, "Impact abrasion of hydraulic structures concrete," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 253–258, 2012.
- [7] Y. W. Liu, T. Yen, and T. H. Hsu, "Abrasion erosion of concrete by water-borne sand," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 1814–1820, 2006.
- [8] B. D. Scott and M. Safiuddin, "Abrasion resistance of concrete--design, construction and case study," *Concr. Res. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 136–148, 2015.
- [9] E. Horszczaruk, "Abrasion resistance of high-performance hydraulic concrete with polypropylene fibers," *Tribologia*, no. 1, pp. 63–72, 2012.
- [10] N. Papenfus, "Applying concrete technology to abrasion resistance," in *Proc. 7th Int. Conf. on 'Concrete block paving'*, Sun City, South Africa, 2003, p. 11.
- [11] M. Poyo, "Abrasion resistance of IV-RCC used to construct spillway concrete steps of South African dams," University of Cape Town, 2018.
- [12] P. Laplante, P.-C. Aitcin, and D. Vezina, "Abrasion resistance of concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–28, 1991.
- [13] A. Kiliç et al., "The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 4, pp. 290–296, 2008.
- [14] Y.-W. Liu, "Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 5, pp. 972–977, 2007.
- [15] T. C. Holland and R. A. Gutschow, "Erosion resistance with silica-fume concrete," *Concr. Int.*, vol. 9, no. 3, pp. 32–40, 1987.
- [16] M. S. Hasan, "Abrasion on Concrete Surfaces Caused by Hydraulic Loading with Water-Borne Sands," Concordia University, 2015.
- [17] Wu.C.H, Yen.T, Liu.Y.W, and Hsu.T.H., "The abrasion resistance of concrete containing blast-furnace slag," 2009.
- [18] Y. Bayazit, C. Karakurt, and R. Bakış, "Abrasion of Concrete on Hydraulic Structures with Underwater Method," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 2469–2474, 2018.
- [19] Z. He, X. Chen, and X. Cai, "Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 91–98, 2019.
- [20] B. Perrie, "Strength of hardened concrete," *Fulton's Concr. Technol. Ninth Ed.*, 2009.
- [21] T. R. Naik, S. S. Singh, and M. M. Hossain, "Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash," *Mater. J.*, vol. 92, no. 6, pp. 649–659, 1995.
- [22] T. Yen, T.-H. Hsu, Y.-W. Liu, and S. H. Chen, "Influence of Class F Fly Ash on the abrasion–erosion Resistance of High-Strength Concrete," *Constr. Build. Mater.*, no. 21.2, pp. 458–63, 2007.
- [23] E. K. Horszczaruk, "Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete," *Wear*, vol. 267, no. 1–4, pp. 110–115, 2009.
- [24] T.-C. Cheng, A. Cheng, R. Huang, and W.-T. Lin, "Abrasion Properties of Steel Fiber Reinforced Silica Fume Concrete According to Los Angeles and Water Abrasion Tests," *Mater. Sci.*, vol. 20, no. 4, pp. 498–502, 2014.
- [25] Beushausen, "Concrete Properties and Practice Lectures," 2015.

- [26] W. Xin, S. Luo, Y. Hu, Y. Qiang, H. Wang, and L. Zhao, "High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction," *J. Hydrodyn. Ser. B*, vol. 24, no. 1, pp. 32–38, 2012.
- [27] S. K. Rao, P. Sravana, and T. C. Rao, "Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 925–933, 2016.
- [28] K. Turk and M. Karatas, "Abrasion resistance and mechanical properties of self-compacting concrete with different dosages of fly ash/silica fume," *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 49–60, 2011.
- [29] N. Ghafoori, M. Najimi, and M. A. Aqel, "Abrasion resistance of self-consolidating concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 2, pp. 296–303, 2014.
- [30] E. Horszczaruk, "Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures," *Wear*, vol. 259, no. 1–6, pp. 62–69, 2005.
- [31] A. C. M. Kormann, K. F. Portella, P. N. Pereira, and R. P. Santos, "Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams," *Cerâmica*, vol. 49, no. 309, pp. 48–54, 2005.
- [32] Y.-W. Liu, T. Yen, T.-H. Hsu, and J.-C. Liou, "Erosive resistibility of low cement high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 3, pp. 128–133, 2006.
- [33] Ç. Yalçinkaya, J. Sznajder, A. Beglarigale, O. Sancakouglu, and H. Yazici, "Abrasion resistance of reactive powder concrete: the influence of water-to-cement ratio and steel micro-fibers," *Adv. Mater. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 345–351, 2014.
- [34] S. Pyo, S. Y. Abate, and H.-K. K. Kim, "Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 11–16, 2018.
- [35] L. A. Sbia, A. Peyvandi, P. Soroushian, and A. M. Balachandra, "Optimization of ultra-high-performance concrete with nano-and micro-scale reinforcement," *Cogent Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 990673, 2014.
- [36] L. Evangelista and J. de Brito, "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 5, pp. 397–401, 2007.
- [37] A. Konin and D.M. Kouadio, "Mechanical and abrasion resistance of recycled aggregates concrete in relation to the cement content," *Modern Applied Science.*, vol. 6, no. 1, pp. 88, 2012.

تحلیل عددی اتصال تیر – ستون گوشه یک طرفه بتنی دارای نقص لرزه‌ای



فریدون رضایی

دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی

دانشگاه بوعلی سینا



صادق پوربهار

کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی

دانشگاه بوعلی سینا

چکیده

مطالعات میدانی از رخدادهای لرزه‌ای گذشته نشان داد که ساختمان‌هایی که قبل از اتخاذ ضوابط لرزه‌ای توسط آیین‌نامه‌های طراحی، بنا شده‌اند، در برابر بارهای رفت و برگشتی زلزله به شدت آسیب‌پذیر هستند. در این میان آسیب‌پذیری اتصالات معیوب تیر-ستون گوشه به عنوان یکی از حساس‌ترین مؤلفه‌های ساختمان، بسیار مشاهده شده است. در این پژوهش از تحلیل غیرخطی اجزای محدود برای بررسی رفتار اتصالات یک‌طرفه و دوطرفه بتنی تیر-ستون گوشه دارای نقص لرزه‌ای، تحت اثر بارهای لرزه‌ای استفاده شده است. برای شبیه‌سازی رفتار بتن از مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری بهره برده شد. برای بیان رفتار فشار تک محوری بتن از مدل تنش-کرنش هاگنستاد و برای معرفی رفتار کششی آن از مدل خطی استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار فولاد از مدل دو خطی با سخت شوندگی سینماتیک بهره برده شد. در این تحقیق رفتار یک اتصال یک‌طرفه بتنی مورد بررسی قرار گرفت. اتصال در دو مرحله بارگذاری شد و با استفاده از نتایج آزمایش پانتلیدس و همکاران صحت‌سنجی شد. در این حالت نتایج تحلیل عددی حالت گسیختگی اتصال یعنی گسیختگی برشی را نشان داد. عامل گسیختگی این اتصال در مدل آزمایشگاهی، از بین رفتن مهار و پیوستگی میلگردهای سفره تحتانی تیرها گزارش شد. در مقایسه با مدل آزمایشگاهی نشان داده شد که مدل اجزای محدود به خوبی توانسته است رفتار اتصال را پیش‌بینی کند. در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی حالت گسیختگی اتصال از نوع گسیختگی برشی است.

واژه‌های کلیدی: اتصال گوشه یک‌طرفه، نقص لرزه‌ای، تحلیل اجزای محدود، بارگذاری چرخه‌ای، گسیختگی برشی

۱- مقدمه

این تحقیق رفتار اتصالات تیر-ستون گوشه بتن مسلح که دارای نقص لرزه‌ای هستند و تحت اثر بارهای جانبی چرخه‌ای قرار دارند را با استفاده از تحلیل غیر خطی به

روش اجزای محدود بررسی می‌کند. ساختمان‌های بتن مسلح ساخته شده قبل از اتخاذ ضوابط طراحی لرزه‌ای توسط آیین‌نامه‌های طراحی، دارای نقص‌های طراحی زیادی هستند که خرابی آنها در زلزله‌ها منجر به خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری شده است. این چنین

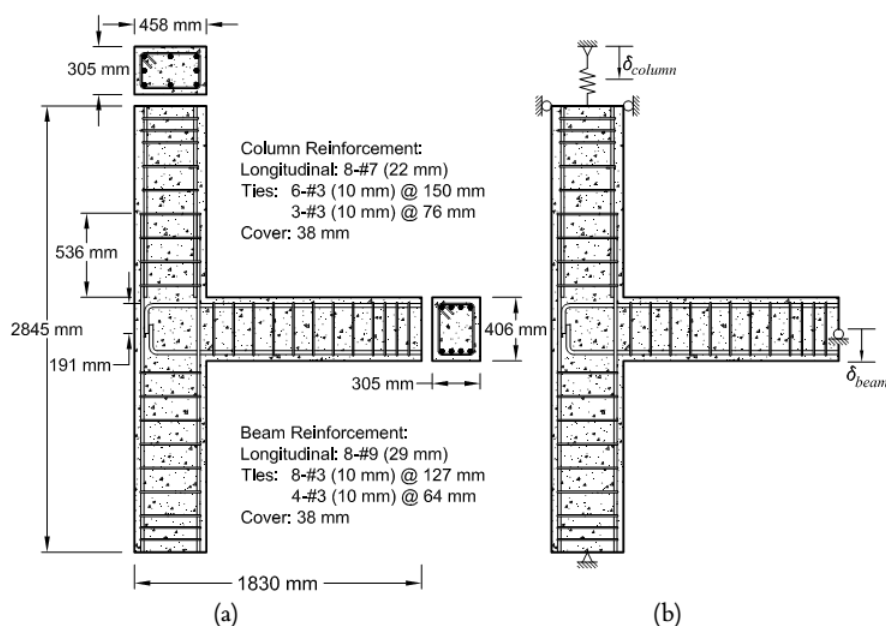
سازه‌هایی در سراسر مناطق لرزه‌خیز جهان وجود دارند و بزرگی خطر آنها در ارتباط با رخداد‌های لرزه‌ای به طور کامل شناخته شده نیست. اتصالات تیر به ستون از اجزای بحرانی در قابلیت تغییر شکل این سازه‌ها به شمار می‌روند چراکه این اتصالات نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های سازه‌ای ایفا می‌کنند. در دهه‌های اخیر آسیب‌پذیری لرزه‌ای اتصالات خارجی تیر به ستون به دفعات در گزارش‌های میدانی زلزله مشاهده شده است. به طوری که در بسیاری از موارد گسیختگی اتصال به عنوان یک عامل شرکت کننده در از بین رفتن ظرفیت باربری ثقلی سازه شناخته شده است [۱].

اتصالات گوشه خارجی نسبت به اتصالات داخلی در طی رخداد‌های لرزه‌ای معمولاً متحمل آسیب‌های بزرگتری می‌شوند. انجیندیز چند مورد از مهمترین دلایل این امر را به شرح زیر بیان کرد: (۱) این اتصالات به دلیل وجود تیر فقط در دو وجه از کمترین محصورشدگی در بین اتصالات ساختمان برخوردارند. (۲) بار محوری در ستون‌های خارجی معمولاً کمتر از ستون‌های داخلی است و این بار به دلیل ماهیت رفت و برگشتی بار جانبی زلزله می‌تواند کمتر هم شود. (۳) وجود نامتقارن تیر و دال در اتصالات خارجی منجر به افزایش پیچش انتقال یافته از تیرها به اتصال می‌شود. (۴) خمش دو محوره در ستون به دلیل اثر ترکیبی دو قاب عمود بر هم منجر به افزایش تنش محوری در گوشه‌های داخلی و خارجی ستون در ناحیه اتصال می‌شود و (۵) اتصالات خارجی به دلیل بیشترین فاصله‌ای که از مرکز سختی دارند در طی زلزله و پیچش کلی ساختمان، متحمل نیروی بیشتری نسبت به اتصالات داخلی می‌شوند [۲]. در این تحقیق، اتصال شماره ۴ آزمایش شده توسط پانتلیدس و همکاران [۳]، به صورت عددی با

استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مورد ارزیابی قرار گرفت. این اتصال یک‌طرفه دارای چند نقص است که عمده‌ترین آنها فقدان میلگرد عرضی در هسته اتصال است. بارگذاری اتصال به صورت چرخه‌ای و طی دو مرحله انجام شده است. اتصال با استفاده از آیین‌نامه ACI 318-63 [۴] طراحی شده است. این آیین‌نامه قبل از اتخاذ ضوابط لرزه‌ای تدوین شده است.

۲- معرفی و جزئیات اتصال یک طرفه

به منظور بررسی رفتار اتصالات گوشه یک طرفه، اتصالی که در آزمایشگاه توسط پانتلیدس و همکاران [۳] مورد آزمایش قرار گرفت، با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شد. هندسه، جزئیات میلگردگذاری، شرایط مرزی و مقاومت فولاد و بتن مصرفی مطابق با مطالعه آزمایشگاهی می‌باشد. هندسه و جزئیات میلگردگذاری اتصال مطالعه آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاومت بتن مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی ۴۱ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم میلگردهای طولی تیر، ستون و خاموت‌ها به ترتیب $454/4$ ، $469/5$ و $427/5$ مگاپاسکال بود. ستون با ابعاد 458×305 میلی‌متر به وسیله ۸ میلگرد با قطر ۲۲ میلی‌متر مسلح شده است که به این ترتیب نسبت فولاد طولی آن برابر $2/54$ درصد است. همچنین تیر با ابعاد 406×305 میلی‌متر به وسیله ۴ میلگرد با قطر ۲۹ میلی‌متر در هر سفره فوقانی و تحتانی مسلح شده است. هر دو سفره تحتانی و فوقانی میلگردهای تیر با استفاده از قلاب ۹۰ درجه مهار شده‌اند. همچنین میلگردهای طولی ستون در به فاصله ۵۳۶ میلی‌متر درست بالای هسته اتصال قطع و همپوشانی ایجاد شده است.



شکل ۱: هندسه، جزئیات میلگردگذاری و شرایط مرزی اتصال پانتلیدس و همکاران [۳]

۴- مدل‌های رفتاری مصالح در مطالعه عددی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن از مدل بتن آسیب‌دیده خمیری [۶] استفاده شده است. برای بیان رفتار فشاری بتن از مدل فشاری هاگنستاد [۷] استفاده شده است. منحنی تنش-کرنش بتن تحت تنش کششی اندکی رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد اگر چه تا حدود ۵۰ درصد مقاومت کششی بتن، رفتار آن خطی است. رفتار بتن در کشش به صورتی است که حتی پس از رسیدن به حداکثر مقاومت کششی، باز هم بتن قادر به تحمل مقداری کشش در جهت عمود بر ترک می‌باشد که به این پدیده سختی کششی باقیمانده گفته می‌شود. در این مطالعه عددی از مدل ساده خطی جهت مدل کردن رفتار کششی بتن استفاده شده است. برای شبیه‌سازی رفتار فولاد از نمودار دوخطی با سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده شده است. بررسی‌های اولیه نشان داد که رفتار اتصال حساسیت ناچیزی به رفتار فولاد دارد. همچنین برای مدلسازی رفتار پیوستگی- لغزش میلگردهای طولی و عرضی از تکنیک المان مدفون استفاده شده است. با استفاده از این تکنیک، درجات آزادی المان‌های مدفون (میلگردها) به درجات آزادی انتقالی المان‌های بتن میزبان

در این آزمایش ستون به صورت افقی قرار داده شد و دو انتهای آن به صورت تکیه‌گاه مفصلی مهار شد. یک بار محوری اولیه برابر با $0.25 f'_c A_g$ به وسیله یک جک هیدرولیکی به ستون اعمال شد. این نیرو در شروع آزمایش به ستون اعمال شده و در طول آزمایش به آن اجازه تغییر داده شد. تغییرات در بار محوری به وسیله کرنش‌سنج‌های تعبیه شده به میله‌های متصل به جک که نیرو از طریق آنها منتقل می‌شد، اندازه‌گیری شد.

۳- نیاز به شبیه‌سازی عددی

علیرغم پیشرفت‌های نشان داده شده در مطالعات که در قسمت قبل ذکر شدند، هنوز رفتار اتصالات دارای نقص لرزه‌ای واقع در گوشه ساختمان تحت اثر بارگذاری دو جهته به طور کامل شناخته شده نیست و عوامل زیادی برای مشخص کردن مقاومت و شکل‌پذیری این اتصالات نیاز به بررسی دارند. توصیه کمیته ۳۵۲ انستیتو بتن آمریکا [۵] به طور ویژه نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد رفتار اتصالات موجود با جزئیات غیر لرزه‌ای را به این صورت بیان می‌کند که: "اتصالات در سازه‌های بنا شده قبل از گسترش ضوابط طراحی موجود در آیین‌نامه فعلی با نیازهای فعلی مطابقت ندارند. نیاز است که این اتصالات به صورت جامع و مفصل مورد مطالعه قرار گیرند تا دید بهتری در مهندسان برای بهسازی این اتصالات ایجاد شود."

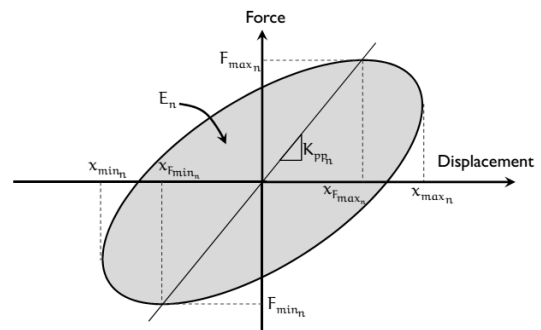
مقید می‌شود. به این ترتیب به نحوی چسبندگی کامل برای میلگردها در نظر گرفته می‌شود.

برای مش‌بندی بخش بتنی، از ۱۳۴۴ عدد المان C3D8R و برای میلگردهای طولی و نیز خاموت‌ها از المان خربای سه بعدی T3D2 با رفتار الاستوپلاستیک که تنها نیروی موجود در آنها نیروی محوری بوده و هیچ‌گونه لنگری را منتقل نمی‌کنند استفاده شده است. افزایش تعداد المان‌ها می‌تواند دقت نتایج را قدری بهبود بخشد اما از طرف دیگر زمان انجام محاسبات را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. برای نقاط تکیه گاهی و بارگذاری از المان‌های با سختی زیاد (نسبتاً صلب) استفاده شده است.

۵- پارامترهای مورد بررسی

در این تحقیق برای هر یک از اتصالات نمودار نیرو-جابجایی نسبی، زوال سختی، انرژی تلف شده طی بارگذاری و تنش برشی در هسته اتصال مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو اتصال بار به صورت نیرو یا جابجایی به نقاط انتهایی تیر وارد می‌شود و نیرو یا جابجایی متناظر با آن اندازه‌گیری می‌شود. سپس می‌توان نمودار نیرو-جابجایی نسبی انتهایی تیر را ترسیم کرد. انرژی تلف شده در هر سیکل برابر با مساحت محصور به نمودار نیرو-جابجایی در آن سیکل است (شکل ۲). زوال سختی اتصال در هر سیکل از روی نمودار نیرو-جابجایی و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در شکل ۲ پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۱) معرفی شده‌اند.

$$K_{ppn} = \frac{F_{max_n} - F_{min_n}}{X_{max_n} - X_{min_n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۲: زوال سختی و اتلاف انرژی در سیکل nام [۲]

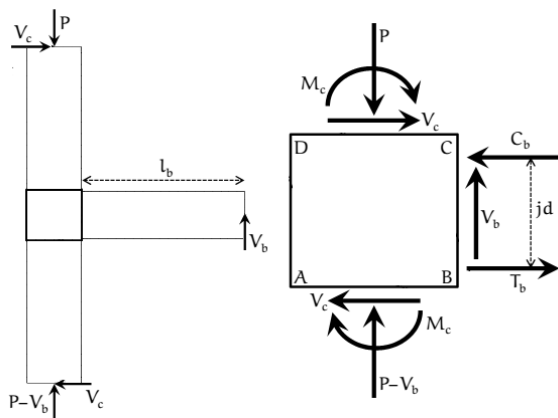
تنش برشی اتصال به صورت میانگین تنش‌های برشی وارد شده بر یک سطح افقی واقع در نیمه ارتفاع اتصال، تعریف می‌شود. برش اتصال در آزمایشگاه بر اساس مقدار عکس‌العمل‌های خارجی در انتهای تیر و ستون‌ها، محاسبه می‌شود. اگر نیروی وارد بر انتهای تیر V_b باشد، این نیروی لنگر خمشی برابر با $V_b l_b$ را بر وجه اتصال وارد می‌کند که در l_b طول تیر از نقطه اعمال نیرو تا وجه اتصال است (شکل ۳). این لنگر خمشی می‌تواند به وسیله یک زوج نیروی برابر C_b و T_b جایگزین شود که به فاصله j_d از هم قرار دارند (رابطه ۲). بازوی لنگر خمشی j_d ، معمولاً برابر با $0.875d$ عمق مؤثر تیر d ، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان نیروی برشی افقی اتصال V_{jh} را از رابطه ۳ بدست آورد.

$$C_b = T_b = \frac{V_b l_b}{j_d} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$V_{jh} = C_b - V_c \quad \text{رابطه (۳)}$$

تنش برشی اتصال با تقسیم کردن نیروی برشی بدست آمده بر مساحت مقطع عرضی اتصال در قسمت میانی از رابطه ۴ بدست آورد. h_b و h_c به ترتیب عرض تیرو عرض ستون است.

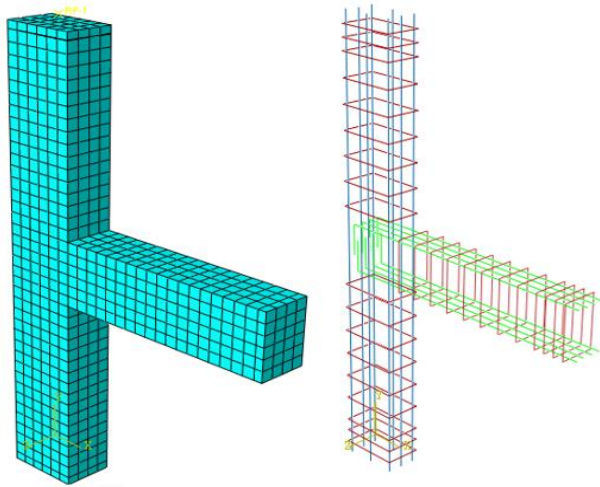
$$\tau_{jh} = \frac{V_{jh}}{h_b h_c} \quad \text{رابطه (۴)}$$



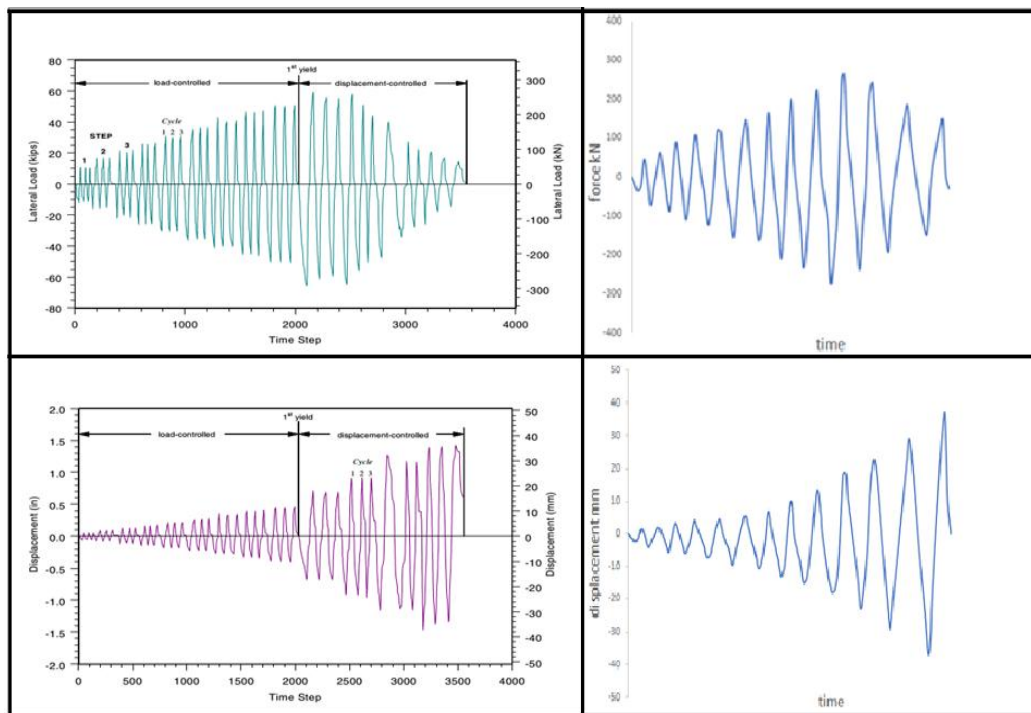
شکل ۳: تعادل اتصال و نیروهای وارد بر آن

۶- بارگذاری رفت و برگشتی اتصال

در مدل آزمایشگاهی بارگذاری طی دو مرحله به صورت چرخه‌ای رفت و برگشتی با استفاده از یک جک هیدرولیکی به انتهای تیر وارد شد. در مرحله اول، بار به صورت کنترل نیرو و طی ۹ گام و در مرحله دوم به صورت کنترل جابجایی و طی ۴ گام اعمال شد. هر گام بارگذاری متشکل از سه سیکل است که در مدل اجزای محدود (شکل ۴) با اعمال شرائط مرزی مطابق با شرائط تکیه‌گاهی مطالعه آزمایشگاهی (شکل ۱) و به منظور کاهش زمان محاسبات، از هر گام فقط یک سیکل آن اعمال شد. در شکل ۵ بارگذاری نمونه آزمایشگاهی و عددی دیده می‌شود.



شکل ۴: مدل اجزای محدود اتصال یک طرفه

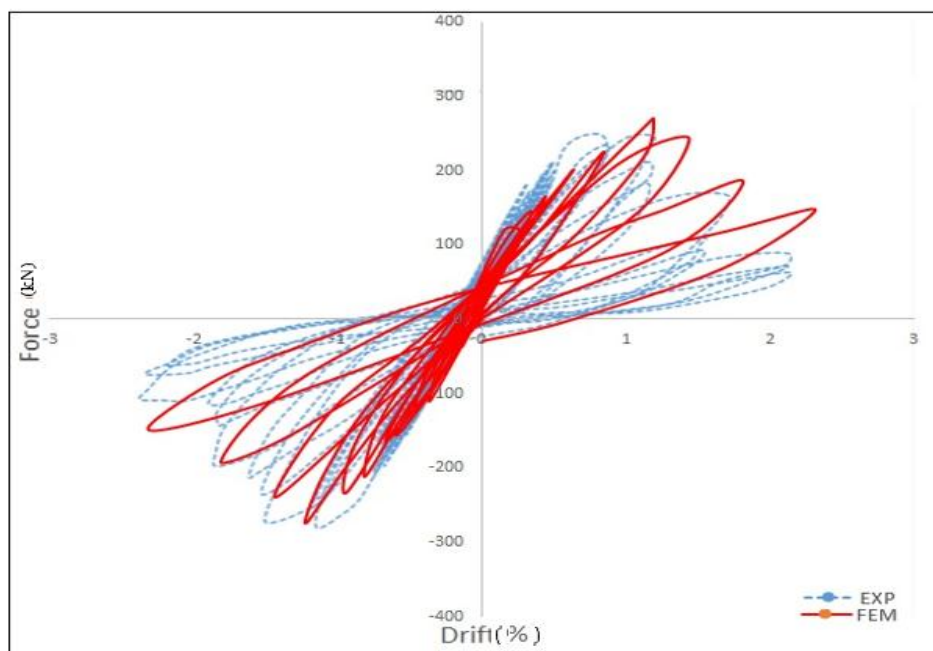


شکل ۵: نمودارهای نیرو و جابجایی انتهای تیر در مدل (a) آزمایشگاهی [۳] و (b) عددی

به نمودار و جدول بدست آمده، ملاحظه می‌گردد که تطابق و نزدیکی نسبتاً خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. اما در سیکل‌های پایانی بین بیشینه نیروی تیر در مدل آزمایشگاهی و عددی اختلاف وجود دارد که نشان می‌دهد که در مدل عددی زوال بتن دیرتر اتفاق می‌افتد. این اختلاف را می‌توان به ماهیت مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری و چگونگی شبیه‌سازی رفتار پیوستگی- لغزش میلگردها در مدل عددی نسبت داد.

۷- بررسی نتایج

در شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی نسبی نقطه انتهایی تیر در مقایسه با نمودار به دست آمده از کار آزمایشگاهی نشان داده شده است. اعداد محور افقی این نمودار نشان‌دهنده جابجایی نسبی هستند که از تقسیم مقادیر جابجایی انتهای تیر بر ۱۶۰۱ میلی‌متر که فاصله نقطه اثر بار تا محور مرکزی ستون است، بدست آمده‌اند. با استفاده از نمودار شکل ۶ می‌توان جدول ۱ را استخراج کرد. با توجه



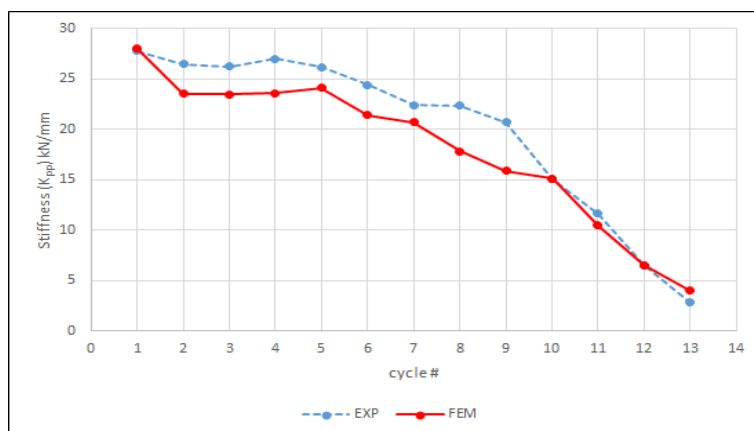
شکل ۶: نمودار نیرو-جابجایی نسبی نقطه انتهایی تیر

جدول ۱: مقایسه بیشینه نیرو و جابجایی انتهایی تیر در مطالعه آزمایشگاهی و عددی

بیشینه نیروی انتهایی تیر kN		بیشینه جابجایی انتهایی تیر mm		جهت	درصد جابجایی	سیکل
EXP [۳]	FEM	EXP [۳]	FEM			
-۴۹/۸۵	-۵۰	-۱/۷	-۲/۱۶	-	۰/۰۹	۱
۴۴/۶	۵۰	۱/۷	۱/۴۱	+		
-۶۹/۳۴	-۷۲/۲	-۲/۶	-۴/۲۲	-	۰/۱۳	۲
۷۰/۸۴	۷۲/۲	۲/۷	۱/۹۲	+		
-۹۱/۸۳	-۹۴/۴	-۳/۵	-۴/۳۲	-	۰/۱۹	۳
۹۱/۸۳	۹۴/۴	۳/۵	۳/۰۴	+		
-۱۱۱/۰۸	-۱۱۶/۶	-۴	-۵/۸۵	-	۰/۲۵	۴
۱۱۲/۸۲	۱۱۶/۶	۴/۳	۴/۰۵	+		
-۱۳۰/۳۲	-۱۳۸/۸	-۴/۸	-۷/۲۵	-	۰/۳۰	۵
۱۳۳/۸۱	۱۳۸/۸	۵/۳	۴/۲۶	+		
-۱۵۴/۸۱	-۱۶۱	-۵/۹	-۹/۵۴	-	۰/۳۹	۶
۱۵۴/۸۱	۱۶۱	۶/۸	۵/۵۱	+		
-۱۷۷/۵۵	-۱۸۳/۲	-۷	-۱۰/۶۶	-	۰/۴۸	۷
۱۸۱/۰۴	۱۸۳/۲	۹	۷/۰۴	+		
-۲۰۰/۲۹	-۲۰۵/۴	-۸/۱	-۱۳/۰۵	-	۰/۵۷	۸
۲۰۳/۷۹	۲۰۵/۴	۱۰	۱۰	+		
-۲۲۱/۲۸	-۲۲۷/۶	-۹/۸	-۱۵/۱۱	-	۰/۶۶	۹
۲۱۹/۵۳	۲۲۷/۶	۱۱/۵	۱۳/۵۷	+		
-۲۸۲/۷۵	-۲۷۴/۲۵	-۱۷/۹	-۱۸	-	۱/۰۶	۱۰
۲۵۹/۷۶	۲۷۰/۵۳	۱۸/۱	۱۸	+		
-۲۸۰/۵	-۲۳۹/۳۱	-۲۳	-۲۳	-	۱/۴۳	۱۱
۲۵۶/۲۶	۲۴۳/۲۲	۲۳	۲۳	+		
-۲۰۵/۵۳	-۱۹۱/۸۵	-۲۹/۵	-۲۹	-	۱/۸۴	۱۲
۱۷۶/۰۵	۱۸۵/۹۸	۲۹/۱	۲۹	+		
-۱۱۲/۸۲	-۱۴۸/۵۹	-۳۷	-۳۷	-	۲/۲۰	۱۳
۹۶/۲۳	۱۴۷/۶۵	۳۷	۳۷	+		

نسبت به مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد تا در نهایت در سیکل پایانی، مدل عددی سختی را بیشتر از مدل آزمایشگاهی نمایش می‌دهد. این اختلاف در زوال سختی را می‌توان به همان مواردی که قبلاً ذکر شد نسبت داد.

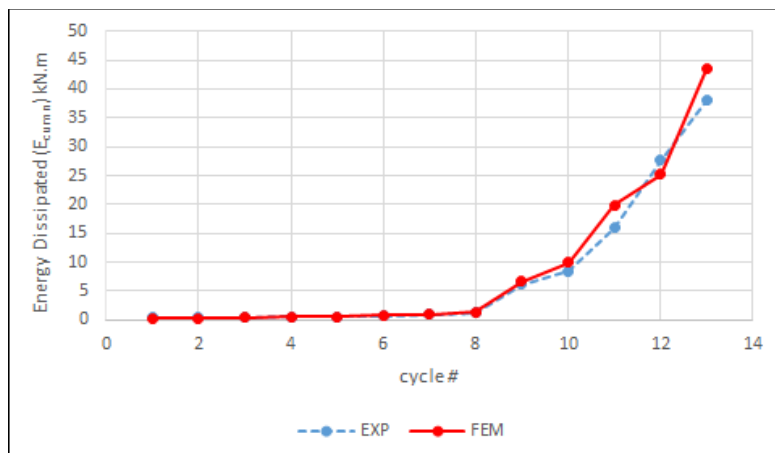
زوال سختی در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در سیکل اول سختی مدل عددی مقدار اندکی بیشتر از مدل آزمایشگاهی است اما در سیکل‌های بعدی، مدل عددی به دلیل جابجایی بیشتری که تجربه می‌کند سختی کمتری را



شکل ۷: زوال سختی در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی اتصال

بیشینه مقادیر تنش برشی مدل اجزای محدود در مقایسه با مدل آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان داده شده است. بیشترین تنش برشی در هر دو مدل در جابجایی منفی سیکل یازدهم اتفاق افتاده است به نحوه که مدل آزمایشگاهی تنشی را معادل ۱۴ درصد بیشتر از مدل عددی نشان می‌دهد. آیین‌نامه ACI 352R-02 [۵] نسبت تنش برشی به جذر مقاومت بتن برابر یک را به عنوان مرزی برای گسیختگی برشی اتصال در نظر می‌گیرد. با توجه به نتایج حاصله، در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی حالت گسیختگی اتصال از نوع گسیختگی برشی است.

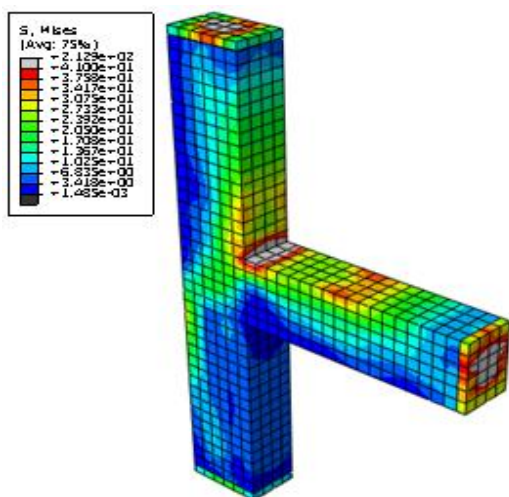
در شکل ۸ مقدار کل انرژی تلف شده تا سیکل n ام برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود تا سیکل نهم یعنی مرحله اول بارگذاری به دلیل کوچک بودن ارتعاشات، اتلاف انرژی نیز اندک است اما در سیکل‌های بعدی با افزایش جابجایی انتهای تیر، اتلاف انرژی در مدل آزمایشگاهی و عددی افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌گردد در آخرین سیکل، اتلاف انرژی در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی بیشتر است که البته قابل انتظار است چراکه به دلیل بیشتر بودن نیرو در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی، مساحت محصور در این سیکل در مدل عددی بیشتر است.



شکل ۸: مقایسه انرژی تلف شده تا سیکل n ام در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی اتصال

جدول ۲: بیشینه تنش برشی اتصال

نسبت بیشینه تنش برشی اتصال به جذر مقاومت فشاری بتن ($/\sqrt{f'_c}$)				
سیکل	جابجایی نسبی %	جهت	EXP	FEM
۱	۰/۰۹	—	۰/۱۶	۰/۱۶
		+	-۰/۱۸	-۰/۲۱
۲	۰/۱۳	—	۰/۲۷	۰/۲۹
			-۰/۲۸	-۰/۲۹
۳	۰/۱۹	—	۰/۳۵	۰/۳۴
		+	-۰/۳۷	-۰/۴۰
۴	۰/۲۵	—	۰/۴۵	۰/۴۵
		+	-۰/۴۴	-۰/۴۷
۵	۰/۳۰	—	۰/۴۳	۰/۴۷
		+	-۰/۴۳	۰/۴۲
۶	۰/۳۹	—	۰/۶۰	۰/۶۵
		+	-۰/۶۱	-۰/۵۷
۷	۰/۴۸	—	۰/۷۲	۰/۷۱
		+	-۰/۷۳	-۰/۷۲
۸	۰/۵۷	—	۰/۸۱	۰/۸۴
		+	-۰/۷۹	-۰/۷۳
۹	۰/۶۶	—	۰/۸۴	۰/۸۵
		+	-۰/۸۲	-۰/۷۷
۱۰	۱/۰۶	—	۰/۹۰	۰/۹۴
		+	-۰/۹۱	-۰/۹۱
۱۱	۱/۴۳	—	۱/۱۵	۱/۰۱
		+	-۱/۰۴	-۰/۹۳
۱۲	۱/۸۴	—	۱/۱۳	۰/۹۶
		+	-۰/۹۸	-۰/۸۳
۱۳	۲/۲۰	—	۰/۸۳	۰/۹۲
		+	-۱/۰۲	-۰/۹۳

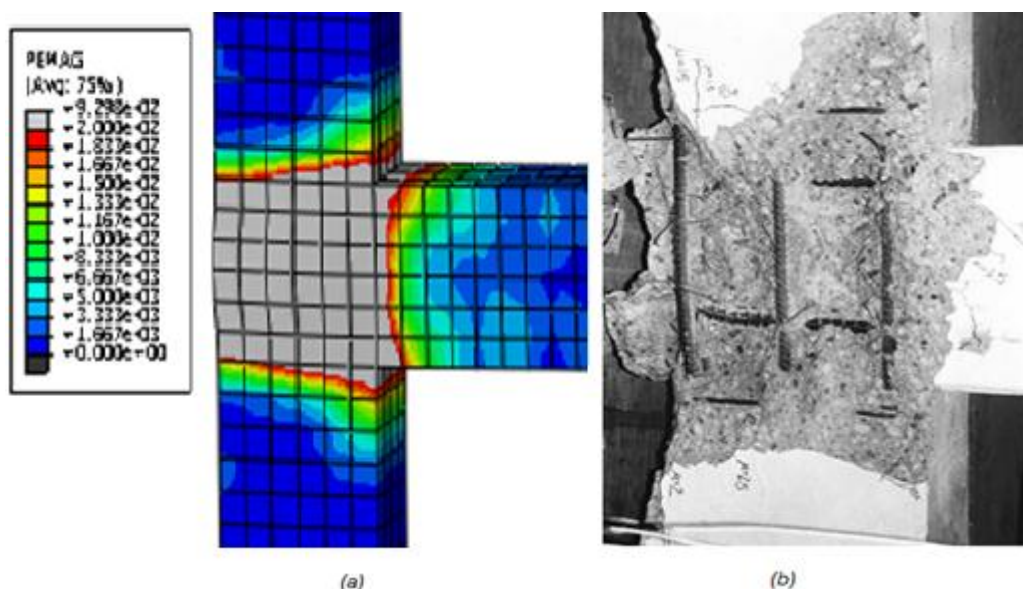


در شکل ۹ کانتور تنش فون میزز در آخرین سیکل بارگذاری اتصال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به جز در تکیه‌گاه‌ها که در آنها به منظور جلوگیری از خردشدگی بتن از قطعات نسبتاً صلب استفاده شده است، محل تلاقی تیر و هسته اتصال نیز تنش‌های زیادی را تحمل می‌کنند.

شکل ۹: کانتور تنش فون میزز برای بتن در آخرین سیکل بارگذاری

می‌شود که مدل اجزای محدود به خوبی توانسته است که رفتار اتصال را پیش‌بینی کند.

همچنین در شکل ۱۰ کانتور کرنش‌های پلاستیک که نشان دهنده وقوع ترک و گسیختگی در سطح بتن است در مقایسه با مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. ملاحظه



شکل ۱۰: (a) کانتور کرنش‌های پلاستیک در مدل عددی (b) گسیختگی در مدل آزمایشگاهی [۳]

۸- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایجی که از تحقیق حاضر می‌توان گرفت به شرح زیر است:

- *مقاومت و شکل‌پذیری در اتصالات ساخته شده قبل از اتخاذ ضوابط لرزه‌ای (Pre-1970) بسیار کمتر از اتصالات طراحی شده با آیین‌نامه‌های حال حاضر یا اتصالات بهسازی شده است.
- *کاهش سیکل‌های بارگذاری در مدل‌های عددی تأثیر فاحشی در نتایج ندارد و آنچه که بیشتر از تعداد دفعات تکرار یک سیکل تأثیرگذار است، میزان بار یا جابجایی آن است.
- *مدل رفتاری انتخابی برای بتن علیرغم نقایصی که در شبیه‌سازی رفتار بتن دارد، مدل کارآمدی برای مدلسازی بتن تحت اثر بارهای چرخه‌ای به شمار می‌آید.
- *در سیکل‌های اولیه بارگذاری تطابق و نزدیکی نسبتاً خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی دیده می‌شود. برای مثال نسبت بیشینه نیروی انتهایی تیر در مدل عددی به آزمایشگاهی در سیکل‌های اولیه بارگذاری کمتر از ۱۳٪ است، اما در آخرین سیکل بارگذاری این نسبت تا ۵۰٪ افزایش می‌یابد. این اختلاف در آخرین سیکل را می‌توان به ماهیت مدل رفتاری انتخابی در به تأخیر انداختن زوال بتن و ضعف روش المان مدفون در مهار میلگردها نسبت داد.
- *با توجه به مرز تعیین شده از سوی آیین‌نامه ACI 352R-02 برای گسیختگی برشی، نتیجه می‌شود که گسیختگی اتصال از نوع گسیختگی برشی است.

- 1- Sezen, H., Elwood, K., Whittaker, A., Mosalam, K., Wallace, J., and Stanton, J., "Structural engineering reconnaissance of the August 17, 1999, Kocaeli(Izmit), Turkey, earthquake," PEER Report 2000/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Cited on page(s) 1, 2, December 2000.
- 2- Engindeniz, M., "Repair and Strengthening of Pre-1970 Reinforced Concrete Corner Beam-Column Joints Using CFRP Composites". PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Cited on page(s) 225, 228, 229, August 2008.
- 3- Pantelides, C., Clyde, C., and Reaveled, L., "Performance-based evaluation of reinforced concrete building exterior joints for seismic excitation," *Earthquake Spectra*, vol. 18, pp. 449–480, Cited on page(s) viii, 139, 145, 147, 157, 158, 225, 229, Aug 2002.
- 4-ACI, ACI 318-63, 1963: *Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, Michigan. Cited on page(s) 145, 197.
- 5- ACI, ACI 352R-02: *Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures*. ACI-ASCE Committee 352, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Cited on page(s) 6, 11, 2002.
- 6- ABAQUS/CAE user's manual, version 6.13, Hibit Karlson & Sorensen Inc 2013.
- 7- Hognestad, E., "Inelastic behavior in tests of eccentrically loaded short reinforced concrete columns," *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 124, pp. 177–139, Cited on page(s) 77, Oct 1952.

بررسی اثر مقدار الیاف ماکروسینتتیک بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام و پس از گسیختگی با در نظر گرفتن اثر مقاومت پس از ترک خوردگی



محمد رضا حاجی زاده

کارشناس، گروه مهندسی عمران

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)



سید جواد وزیری کنگ علیانی

کارشناس ارشد، گروه راه و ترابری،

دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

روسازی های بتنی با دوام و عملکرد بالا، می توانند در طول عمر طراحی خود، بدون نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری و یا با عملیات تعمیر نگهداری به صورت اندک، خدمت دهی کنند. یکی از خصوصیات مهم روسازی های بتنی، مقاومت خمشی دال روسازی بوده چرا که بار های وارد شده از طرف ترافیک، عمدتاً تنش های خمشی به وجود می آورد. همچنین مقاومت بعد از ترک خوردگی نیز جهت کنترل گسترش ترک خوردگی های به وجود آمده، از اهمیت بالایی در روسازی های بتنی برخوردار است. استفاده از الیاف ماکرو، عملکرد خمشی روسازی های بتنی را می تواند بهبود ببخشد. در این تحقیق، اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک با جنس پلی اولفین/پلی پروپیلن در مقادیر مختلف بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی با در نظر گرفتن اثر نسبت مقاومت خمشی معادل، بررسی گردید. بدین منظور پس از تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱، الیاف ماکروسینتتیک فوراً در مقادیر مصرف ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب به طرح مخلوط بتن شاهد اضافه شده و پس از بررسی و مقایسه ی میزان اسلامپ و مقاومت فشاری طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی با مقادیر مجاز مخلوط بتن روسازی، آزمایش های مقاومت و عملکرد طاقت خمشی مخلوط های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C78 و ASTM C1609 انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فوراً باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی در هنگام گسیختگی تا میزان ۳۸ درصد و افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل تا میزان ۳۹ درصد می گردد. دیده شد که میزان تاثیر الیاف بر افزایش مدول گسیختگی بتن الیافی نسبت به بتن شاهد، در مقادیر مصرف ۱ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر می باشد. همچنین میزان افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل بتن های الیافی در مصرف الیاف از ۱ به ۲ کیلوگرم بر متر مکعب از ۲ به ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر بود. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تاثیر الیاف ماکروسینتتیک بر افزایش مقاومت بعد از ترک خوردگی بتن به مقدار جزئی، بیشتر از اثر این الیاف بر افزایش مدول گسیختگی بتن می باشد. بنابراین نیاز است تا اثر افزودن این الیاف بر هر دو عملکرد خمشی، در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی، مورد نظر قرار گیرد. همچنین، مشاهده شد که استفاده از الیاف ماکروسینتتیک فوراً در روسازی های بتنی، اثر چشمگیر زیادی بر عملکرد خمشی این روسازی ها داشته و می تواند دوام و مقاومت روسازی های بتنی را به طور چشمگیری افزایش دهد.

کلمات کلیدی: روسازی بتنی، الیاف ماکروسینتتیک فوراً، عملکرد خمشی، مقاومت پس از ترک خوردگی، نسبت مقاومت خمشی معادل

روسازی های بتنی ساخته شده جهت خدمت دهی در کاربری های مختلف مانند بزرگراه ها، سطوح پروازی و کف پارکینگ ها، دارای عملکرد بالا بوده و یک انتخاب موثر از نظر اقتصادی و طراحی می باشد [1]. این روسازی های از یک دال بتنی به صورت مسلح یا غیر مسلح تشکیل شده و می تواند به طور مستقیم بر روی سطح بستر خاک قرار گرفته و یا بر روی سطح اساس دانه ای یا تثبیتی، ساخته شود [2]. عملکرد نسبی بهتر این روسازی ها نسبت به روسازی های آسفالتی، باعث توجه بیشتر محققان و متولیان امور راهسازی کشور شده است. به دلیل بالاتر بودن مدول الاستیسیته ی بتن نسبت به آسفالت، روسازی های بتنی، بار های وارد شده را در سطح بزرگتری نسبت به روسازی های انعطاف پذیر پخش می کنند. همچنین بیشتر بودن مدول برشی بتن نسبت به آسفالت، باعث کاهش تنش های وارده به روسازی، مانند تنش های برشی ناشی از ترمز وسایل نقلیه در مناطق ترمز گیری (مانند سر چهار راه ها) می شود. حساسیت روسازی های بتنی به خرابی هایی مانند شیار شدگی و چاله، که در روسازی های آسفالتی معمول می باشد، کمتر است. همچنین روسازی های بتنی با دوام تر بوده و نیاز کمتری به عملیات نگهداری دارد [3,4]. این موضوع در روسازی های مورد استفاده در بزرگراه ها با بار ترافیکی سنگین (مانند بار کامیون) و تردد زیاد، و همچنین در سطوح پروازی در فرودگاه هایی که میزبان هواپیماهای پهن پیکر و عبور و مرور زیاد می باشند، از اهمیت بالاتری برخوردار بوده چرا که توقف خدمت دهی این روسازی ها و انجام عملیات تعمیر، با مشکلات اجرایی و خسارت اقتصادی همراه است. در سال های اخیر، به دلیل افزایش قیمت قیر و تولید مازاد سیمان در کشور، استفاده از روسازی های بتنی مورد توجه بیشتری در ایران قرار گرفته است [5]. در صورت طراحی، ساخت با مصالح با دوام و اجرای مناسب، این روسازی های

می توانند در طول عمر طراحی خود بدون نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری و یا با تعمیر و نگهداری جزئی، خدمت دهی کنند [6].

بار های ترافیکی باعث به وجود آمدن تنش های فشاری و خمشی در بتن شده، اما مقدار تنش های فشاری به وجود آمده در برابر تنش های خمشی بسیار کوچک می باشد به طوری که نسبت تنش های خمشی به مقاومت خمشی دال روسازی، اغلب بالاتر از ۰.۵ می باشد [4]. این موضوع باعث اهمیت بیشتر مقاومت خمشی در بین دیگر خصوصیات مکانیکی بتن مورد استفاده در روسازی می گردد. مدول گسیختگی و الاستیسیته ی بتن به عنوان دو پارامتر اصلی تاثیر گذار بر طراحی ضخامت دال روسازی بتنی گزارش شده است [7]. در روش های طراحی دال روسازی ارائه شده توسط آشتو، مدول گسیختگی و الاستیسیته ی بتن، رابطه ی معکوس با ضخامت طراحی دال روسازی دارد. در روش طراحی ضخامت دال روسازی بر اساس انجمن سیمان پرتلند (PCA) که یک روش طراحی مکانیکی- تجربی است، مقاومت خمشی بتن به عنوان یکی از اصلی ترین متغیر های طراحی ضخامت روسازی می باشد [6]. با توجه به کاهش ضخامت دال روسازی با افزایش مقاومت خمشی بتن، مقدار مصرف مصالح و بتن در ساخت روسازی کمتر شده که در نتیجه باعث کاهش جمع شدگی در سنین اولیه، صرفه ی اقتصادی در ساخت جاده و سازگار تر با محیط زیست (ناشی از مصرف کمتر منابع طبیعی) می گردد. بنابراین عملکرد و مقاومت خمشی در روسازی های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در دهه های اخیر، محققان بسیاری به بررسی عملکرد مکانیکی بتن های یافی در روسازی های بتنی، پرداختند [8-14]. الیاف مورد استفاده در روسازی های بتنی از نظر مشخصات ظاهری و فیزیکی به دو دسته ی الیاف میکرو و ماکرو تقسیم می گردد [15]. الیاف میکرو اغلب در مقادیر مصرف پایین (۰.۱٪) جهت کنترل ترک

خوردگی های ناشی از جمع شدگی در سنن اولیه پس از ساخت دال استفاده می شود [16]. الیاف ماکرو اغلب در مقادیر مصرف بالاتر نسبت به الیاف میکرو جهت افزایش خصوصیات مکانیکی و جذب انرژی روسازی های بتنی استفاده می گردد. افزودن این الیاف باعث می تواند باعث افزایش ظرفیت سازه ای روسازی های بتنی شود که این موضوع منجر به کاهش ضخامت طراحی دال روسازی می گردد [17-20]. همچنین خصوصیات پس از ترک خوردگی و قابلیت جذب انرژی روسازی با افزودن الیاف افزایش می یابد. عملکرد اصلی الیاف در بتن، بر اساس عمل پل زدن¹ بوده که گسترش ترک خوردگی را کنترل کرده و منجر به مقاومت بیشتر بتن بعد از ترک خوردگی می گردد [21]. خصوصیات استاتیکی و دینامیکی بتن نیز با افزودن الیاف که باعث گیر افتادن ترک ها در بتن شده، می تواند بهبود یابد [22]. یکی از انواع الیاف مورد استفاده در مخلوط های بتن الیافی، الیاف مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن بوده که به دلیل قیمت کم و طیف وسیع خصوصیات الیاف، که بیشتر شامل مقاومت، مدول و سطح الیاف می باشد، مورد توجه محققان بوده است. الیاف سازه ای ماکرو به دلیل سادگی در ساخت (با تغییر شکل مصالح پلی پروپیلن) می تواند باعث بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس سیمان شده و خصوصیات خمشی و طراحی روسازی های بتنی را بهبود ببخشد [23].

تحقیقاتی جهت بررسی اثر افزودن الیاف بر خصوصیات مکانیکی روسازی های بتنی انجام شده است. ژو و همکاران، عملکرد مکانیکی روکش بتنی اصلاح شده با ترکیب الیاف پلی استر و بوتادین استایرن رابر (SBR) را بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد که الیاف پلی استر و SBR یک اثر ترکیبی بر خصوصیات مکانیکی روکش بتنی داشته و همچنین SBR باعث ایجاد یک ارتباط قوی

بین الیاف پلی استر و خمیر سیمان می گردد [24]. روح الامینی و همکاران اثر الیاف ماکرو مصنوعی را بر عملکرد مکانیکی روسازی های بتنی غلتکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و انرژی شکست را بررسی کرده و مشاهده کردند که افزودن الیاف ماکرو، مقاومت فشاری را به طور چشمگیری تحت تاثیر قرار نداده اما بر روی مقاومت خمشی و انرژی شکست تاثیر دارد. آنان همچنین بیان کردند که تاثیر الیاف بر انرژی شکست بیشتر از تاثیر آن بر مقاومت خمشی است [17]. این موضوع تاثیر بیشتر الیاف در مقاومت پس از ترک خوردگی بتن را نشان می دهد. همچنین جهت بررسی اثر الیاف بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام شکست و پس از آن، و در نظر گرفتن اثر سخت کنندگی الیاف در طراحی ضخامت دال روسازی، تلاش هایی انجام شده و روشی برای طراحی روسازی بتنی با در نظر گرفتن مقاومت بعد از ترک خوردگی الیاف در بتن، ارائه شده است. التوبات و همکاران با استفاده از نسبت مقاومت خمشی معادل ($R_{e,3}$) در دال های بتنی حاوی الیاف فولادی و ماکرو مصنوعی، روش مقاومت خمشی موثر² را جهت در نظر گرفتن اثر سخت کنندگی الیاف در طراحی ضخامت دال روسازی بتنی ارائه دادند. در این روش با استفاده از نسبت مقاومت خمشی معادل، ظرفیت خمشی بتن الیافی افزایش یافته و سپس از این مقاومت خمشی افزایش یافته، جهت طراحی دال روسازی استفاده شد که باعث کاهش ضخامت طراحی دال روسازی گردید. از نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده در مقیاس بزرگ تر، جهت اعتبارسنجی این روش استفاده گردید [19]. نسبت مقاومت خمشی معادل جهت بررسی مقاومت بعد از ترک خوردگی روسازی بتنی حاوی الیاف و همچنین در نظر گرفتن اثر این مقاومت در طراحی ضخامت دال روسازی، از اهمیت بالایی برخوردار

² Effective flexural strength approach

¹ Bridging

۲. مصالح و روش

در این تحقیق، بررسی اثر مقدار افزودن الیاف ماکروسینتتیک از جنس پلی اولفین/پلی پروپیلن در مقادیر مختلف بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی با در نظر گرفتن اثر مقاومت پس از ترک خوردگی می باشد. بدین منظور، پس از تعیین نسبت های اختلاط طرح مخلوط بتنی مورد استفاده در راه ها مطابق با الزامات دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی های بتنی راه ها، ضابطه ی ۷۳۱، الیاف ماکرو سینتتیک در سه مقدار مصرف مختلف شامل ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب مخلوط بتنی استفاده گردید. بدین ترتیب یک طرح مخلوط شاهد و سه طرح مخلوط بتن الیافی مورد بررسی قرار می گیرد. ابتدا، آزمایش های تعیین اسلامپ و مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد های ASTM C143 و ASTM C39 جهت بررسی مطابقت میزان اسلامپ و مقاومت فشاری طرح های مخلوط مورد بررسی با الزامات بتن روسازی بتنی انجام می شود. سپس، آزمایش های تعیین مقاومت خمشی و بررسی عملکرد خمشی طرح های مخلوط مورد نظر جهت تعیین مدول گسیختگی (MR) و نسبت مقاومت خمشی معادل ($R_{e,3}$)، مطابق با استاندارد های ASTM C78 و ASTM C1609 صورت می گیرد. این مقادیر جهت بررسی عملکرد خمشی طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی خمشی و بعد از ترک خوردگی، مورد بررسی واقع می شوند. شکل ۱، مراحل انجام شده در این تحقیق را نشان می دهد.

است. در این تحقیق نیز از این نسبت جهت بررسی اثر الیاف در عملکرد خمشی روسازی بتنی استفاده می گردد. خان و همکاران اثر مقدار دوده ی سیلیسی بر خصوصیات مکانیکی، شامل خصوصیات جذب انرژی و نشانه ی سختی را در بتن های حاوی الیاف طبیعی حاصل از نارگیل جهت استفاده در روسازی را بررسی کرده و مقدار ضخامت طراحی دال روسازی در مخلوط هایی بتنی مورد بررسی را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج کار آنان نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش خصوصیات مکانیکی بتن شده و همچنین ضخامت طراحی دال روسازی را به میزان ۱۲ میلیمتر کاهش داد [3].

با توجه به بررسی پیشینه ی تحقیق، دیده شده که خصوصیات خمشی بتن در روسازی های بتنی از اهمیت نسبی بیشتری برخوردار است. همچنین جهت بررسی بهتر اثر افزودن الیاف بر عملکرد خمشی بتن، در نظر گرفتن مقاومت خمشی در لحظه ی گسیختگی کافی نبوده و با توجه به بهبود رفتار بتن پس از ترک خوردگی ناشی از افزودن الیاف، نیاز به بررسی مشخصه های دیگر مقاومت خمشی می باشد. مشخصه ی خمشی مناسب جهت بررسی این موضوع، نسبت مقاومت خمشی معادل بوده که نتایج خوبی از استفاده ی آن در تحقیقات انجام شده، دیده شد. از طرفی استفاده از الیاف پلی پروپیلن در روسازی های بتنی با توجه به خصوصیات دوامی و مقاومتی مناسب آن، می تواند اثر موثری در بهبود عملکرد خمشی روسازی های بتنی داشته باشد، که این موضوع باعث دوام بیشتر و مقاومت روسازی می گردد. دیده می شود بررسی اثر مقدار افزودن این الیاف در مقادیر مختلف بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی با در نظر گرفتن اثر نسبت مقاومت خمشی معادل در بتن، کمتر مورد توجه واقع شده است. از این جهت، تحقیق حاضر به بررسی این موضوع می پردازد.

تمامی آزمایش های انجام شده در این تحقیق، در آزمایش بتن دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام گرفته است.

۱.۲. مصالح و طرح اختلاط

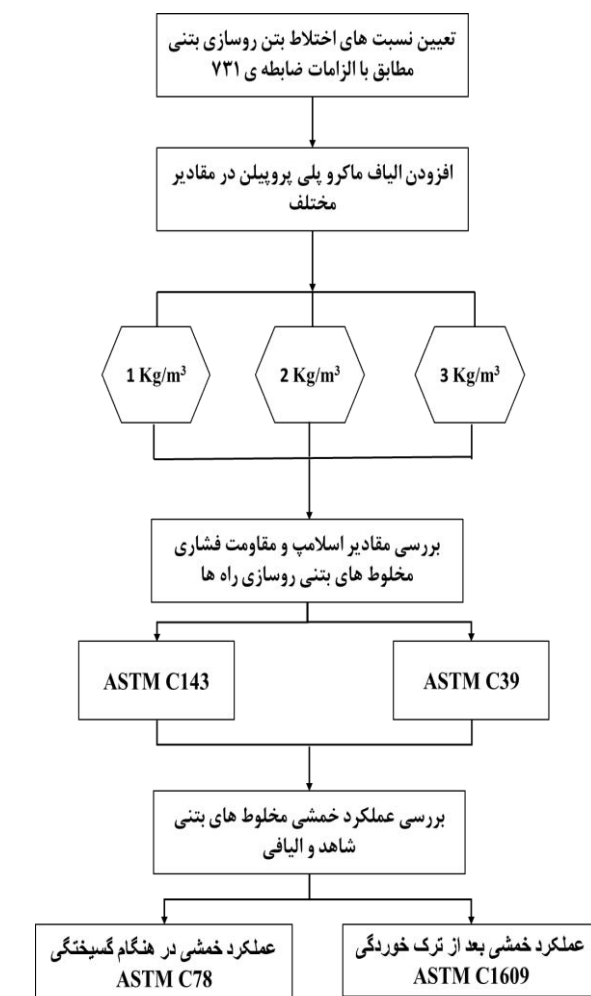
مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق مصالح سنگی رودخانه ای بوده که شامل مصالح سنگی ریز دانه با اندازه ی ۵-۰ میلی متر، مصالح سنگی درشت دانه در دو گروه ابعادی شامل مصالح سنگی با اندازه ی ۱۲-۵ میلی متر و مصالح سنگی با اندازه ی ۱۹-۱۲ میلی متر مطابق با استاندارد ASTM C33 می باشد. مدول نرمی، چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی ریز دانه مطابق با استاندارد های ASTM C33 و ASTM C128 به ترتیب به میزان ۲٫۶، ۲٫۹ و ۲٫۶٪ می باشد. چگالی نسبی و جذب آب مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۵ میلی متر به ترتیب به میزان ۲٫۵ و ۲٫۵٪ و مصالح سنگی درشت دانه ۱۹-۱۲ میلی متر به ترتیب به میزان ۲٫۶ و ۲٫۰٪ مطابق با استاندارد ASTM C127 می باشد.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ تهران با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. مشخصات شیمیایی این سیمان ارائه شده توسط آزمایشگاه کارخانه سیمان به همراه الزامات استاندارد ایران به شماره ی ۳۸۹، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق

اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
سیمان (٪)	۲۱٫۸۴	۴٫۵۶	۳٫۵۲	۶۳٫۰۱	۳٫۶	۱٫۷۵	۰٫۱۸	۰٫۵۳
الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)	>۲۰	>۶	>۶	-	>۵	>۳	-	-

که توسط شرکت واردکننده ی آن (دانش رویان یکتا ماندگار)^۱ ارائه گردیده، در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱- مراحل بررسی اثر الیاف ماکروسینتتیک بر عملکرد خمشی و ضخامت طراحی روسازی های بتنی در این تحقیق

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف ماکرو پایه ی پلی اولفین/پلی پروپیلن به صورت در هم تابیده/شبکه ای تولید شرکت FORTA مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM C7508 می باشد. شکل ظاهری این الیاف در شکل ۲ دیده می شود. مشخصات فنی این نوع الیاف آزمایش شده در دانشکده نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۱ www.drimco.com



شکل ۲- الیاف ماکروسینتتیک مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۲- مشخصات فنی الیاف مورد استفاده در این تحقیق

جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	در هم تابیده / شبکه ای
طول (mm)	۵۴
قطر (mm)	۰,۴
مقاومت در محیط اسید/قلیا	عالی
مقاومت کششی (Mpa)	۶۹۳
مدول الاستیسیته (Gpa)	۶,۴
جذب آب (%)	ندارد
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۰,۹۱

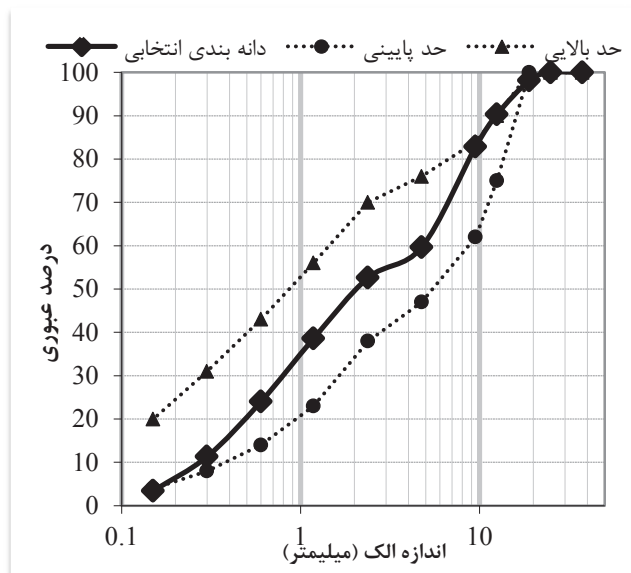
آب مورد استفاده جهت ساخت طرح های مخلوط بتنی، آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه است. از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر در ساخت نمونه ها استفاده گردید.

نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس الزامات ذکر شده در ضابطه ی ۷۳۱،

جدول ۳- معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱

معیار	مقدار	روش انجام آزمایش
مقاومت فشاری (نمونه استوانه ای)	حداقل ۳۰ مگاپاسکال	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه)	حداقل ۴ مگاپاسکال	ASTM C78
اسلامپ	۷۰-۱۰ میلیمتر	ASTM C143
عیار سیمان	حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب	-
نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)	حداکثر ۰,۵۳	-

مشخص اسلامپ در طرح های اختلاط مورد بررسی به مقدار ۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شد این مورد، با ساخت مخلوط بتن شاهد و افزودن ماده ی فوق روان کننده به صورت آزمون و خطا و اندازه گیری اسلامپ مخلوط های بتن شاهد و الیافی، انجام گرفته و میزان مصرف ماده ی افزودنی جهت رسیدن به میزان اسلامپ در نظر گرفته شده تعیین گردید.



شکل ۳- حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی

بدین ترتیب یک طرح اختلاط بتن شاهد و سه طرح اختلاط بتن الیافی در روند تحقیق، بررسی گردید. در جدول ۴، نسبت های وزنی اختلاط طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی جهت ساخت یک متر مکعب بتن در حالت اشباع با سطح خشک مصالح سنگی، آورده شده است.

با توجه به معیار های جدول ۳، نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد استفاده در این تحقیق، تعیین گردید. مقدار نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۰٫۵، انتخاب شد. انتخاب این مقدار، باعث اختلاط بهتر الیاف در مخلوط شده و ساخت نمونه ها راحت تر انجام می شود. همچنین با توجه به کاهش خصوصیات مکانیکی بتن در سنن کمتر، نسبت به مقادیر نسبت آب به سیمان پایین تر، اثر الیاف در کنترل ترک خوردگی بهتر مشخص می شود. با این وجود، ممکن است این مقدار نسبت آب به سیمان، با مقادیر انتخاب شده در اجرا، فاصله داشته باشد. اما با توجه به علت ذکر شده این انتخاب صورت گرفته است. همچنین این مقدار، از حداکثر مقدار نسبت آب به سیمان مجاز بتن روسازی بتنی (مندرج در جدول ۲)، کمتر می باشد. با توجه به مقدار اسلامپ هدف و حداقل عیار سیمان بتن روسازی بتنی، مقدار عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. مقادیر سهم مصالح سنگی طوری صورت گرفت که دانه بندی مصالح سنگی در حدود بالا و پایین دانه بندی مصالح سنگی در بتن روسازی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱، قرار گیرد. شکل ۳، حدود دانه بندی مجاز و انتخابی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

مقدار مصرف الیاف در طرح های اختلاط بتن الیافی به میزان ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم در متر مکعب بتن انتخاب شده تا تاثیر الیاف بر عملکرد خمشی بتن روسازی در مقادیر مصرف مختلف، مورد بررسی قرار گیرد. این مقادیر الیاف به طرح اختلاط بتن شاهد افزوده شد. با توجه به این که افزودن الیاف باعث کاهش میزان روانی طرح مخلوط شاهد می شود، مقدار روان کننده طوری انتخاب گردید که به یک مقدار مشخص اسلامپ (با حدود رواداری ± 20 میلیمتر) در طرح اختلاط های بتن شاهد و الیافی رسیده و همچنین در حدود ذکر شده در آیین نامه قرار گیرد. میزان

جدول ۴- نسبت های وزنی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد بررسی در این تحقیق

نام طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	آب (Kg/m^3)	سیمان (Kg/m^3)	سگندانه ریز (Kg/m^3)	سگندانه درشت (Kg/m^3)	سگندانه درشت (Kg/m^3)	فوق روان کننده (Kg/m^3)	الیاف ماکرو (Kg/m^3)
شاهد	R	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰٫۴۷	۰
الیافی	FR1	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰٫۵۰	۱
الیافی	FR2	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰٫۵۳	۲
الیافی	FR3	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰٫۵۵	۳

۲.۲. آزمایش تعیین اسلامپ و مقاومت فشاری بتن

میزان اسلامپ و مقاومت فشاری طرح های مخلوط بتن روسازی باید مطابق با الزامات بتن روسازی بتنی براساس ضابطه ی ۷۳۱ بوده و این الزامات را برآورده کند تا بتوان عملکرد خمشی این طرح های اختلاط را مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب آزمایش های تعیین اسلامپ و مقاومت فشاری بر روی طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی، انجام شد.



شکل ۴- اندازه گیری میزان اسلامپ بتن مطابق با استاندارد ASTM C143

آزمایش تعیین مقاومت فشاری مخلوط های بتنی، مطابق با استاندارد ASTM C39 و بر روی نمونه های استوانه ای ۲۰۰*۱۰۰ میلیمتری انجام گرفت. از نتایج این آزمایش جهت ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط های بتنی و بررسی این مقادیر با معیار مقاومت فشاری بتن روسازی بتنی (مندرج در جدول ۳) استفاده گردید. نمونه های استوانه ای پس از ساخت، تا سن آزمایش در حوضچه های مخصوص، نگهداری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. تعداد ۳ نمونه از هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه، آزمایش شدند.

میزان مقاومت فشاری طرح های R، FR1، FR2 و FR3 به ترتیب به میزان ۳۰،۴، ۳۱،۱، ۳۰،۵ و ۳۰،۳ مگاپاسکال به دست آمد. با توجه به این مقادیر و حداقل مقدار مقاومت فشاری بتن روسازی بتنی مطابق با الزامات ضابطه ی ۷۳۱ (مندرج در جدول ۳)، دیده می شود که معیار مقاومت فشاری بتن روسازی بتنی، برآورده شده است.

بدین ترتیب، طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی در نظر گرفته، الزامات طرح اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با معیار های ذکر شده در ضابطه ی ۷۳۱ (جدول ۳) را برآورده کرده و می توان، آزمایش های تعیین مقاومت و عملکرد خمشی این طرح های اختلاط را (که در ادامه توضیح داده می شود)، انجام داد.

میزان اسلامپ مخلوط های بتنی شاهد و بتن الیافی بر اساس روش استاندارد ASTM C143 تعیین گردید. همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد، با افزودن ماده ی فوق روان کننده به طرح های مخلوط بتن شاهد و الیافی به صورت آزمون و خطا و اندازه گیری اسلامپ طرح های مخلوط بتنی، سعی بر رسیدن به یک مقدار مشخص اسلامپ (که در این تحقیق به میزان ۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شد) با حدود رواداری $\pm 2,0$ میلیمتر در طرح مخلوط های بتن شاهد و الیافی بود. شکل ۴، اندازه گیری اسلامپ بتن، جهت تعیین میزان مصرف ماده ی فوق روان کننده را نشان می دهد. میزان اسلامپ به دست آمده با مصرف ماده ی فوق روان کننده به میزان ذکر شده در جدول ۴، میزان اسلامپ طرح های اختلاط R، FR1، FR2 و FR3 به ترتیب به میزان ۶۵، ۶۰، ۵۵ و ۵۰ میلیمتر به دست آمد. این مقادیر اسلامپ با حدود رواداری ذکر شده، تقریباً به یک میزان بوده و همچنین در حدود مجاز ضابطه ی ۷۳۱ (مندرج در جدول ۳) قرار دارد. بنابراین طرح های اختلاط مورد بررسی، معیار اسلامپ بتن روسازی بتنی را رعایت می کنند.

۳.۲. آزمایش تعیین مقاومت و عملکرد خمشی بتن

میلیمتر ساخته شده و تا سن ۲۸ روزه در حوضچه های نگهداری، مطابق با استاندارد، نگهداری شدند. تعداد ۳ تیر از هر طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵، تصویر تیر های بتنی پس از اتمام آزمایش را نشان می دهد.

جهت تعیین مقاومت خمشی طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی خمشی، از روش استاندارد ASTM C 78 استفاده گردید. تیر های بتنی با ابعاد ۱۵۰*۱۵۰*۵۰۰ میلیمتر و با دهانه ی موثر (L) ۴۵۰



شکل ۵- تعیین مقاومت خمشی تیر های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C78

تغییر مکان خالص نمونه به میزان ۱/۱۵۰ دهانه (۳) میلیمتر) ادامه می یابد. شکل ۶ نمودار نیرو- تغییر مکان خالص که از نتایج این آزمایش به دست می آید را نشان می دهد.

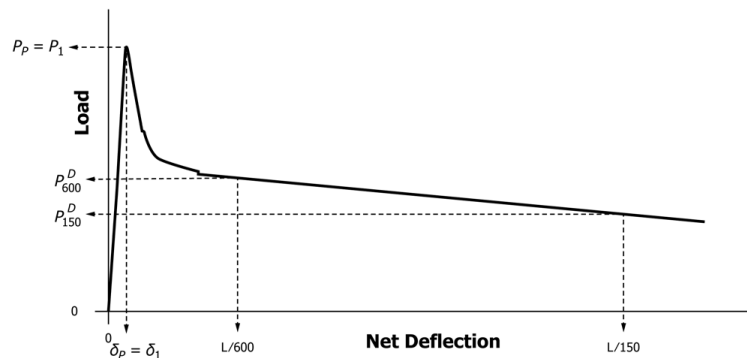
مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل ($R_{e,3}$) از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$R_{e,3} = \frac{150 * T_{150}^d}{f_1 * b * d^2} \quad (1)$$

که در آن $R_{e,3}$ نسبت مقاومت خمشی معادل بر حسب درصد، T_{150}^d مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان خالص از مقدار ۰ تا مقدار ۱/۱۵۰ دهانه (L/150) بر حسب نیوتن در میلیمتر، f_1 مقاومت نقطه ی اوج اول بر حسب مگاپاسکال، b متوسط عرض نمونه در صفحه ی شکست بر حسب میلیمتر و d متوسط عمق نمونه در صفحه ی شکست بر حسب میلیمتر می باشد. در شکل ۷، نمونه های بتنی در حال آزمایش تعیین عملکرد خمشی را نشان می دهد.

با استفاده از نتایج این آزمایش، مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی (MR) طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی خمشی، تعیین گردید.

جهت بررسی عملکرد خمشی مخلوط های بتنی پس از ترک خوردگی و تعیین نسبت مقاومت خمشی معادل، از روش استاندارد ASTM C1609 استفاده شد. ابعاد تیر بتنی مورد استفاده در این آزمایش، مانند تیر های بتنی در تعیین مقاومت خمشی در قسمت قبل می باشد. تعداد سه تیر بتنی برای هر طرح اختلاط بتن ساخته شده و تا سن ۲۸ روزه، در حوضچه های نگهداری، مطابق با استاندارد، نگهداری شدند. در این آزمایش، تیر بتنی به روش بارگذاری در یک سوم دهانه بارگذاری شده و میزان تغییر شکل متناظر با بار وارد شده، توسط سیستم بارگذاری اندازه گیری می شود. پس از رسیدن به مقدار اولین بار حداکثر و ثبت تغییر مکان خالص متناظر با این مقدار، مقادیر بار متناظر با تغییر مکان های خالص ۰،۵، ۰،۷۵، ۱ و ۱،۲۵ میلیمتر ثبت شده و بارگذاری تیر بتنی تا رسیدن



شکل ۶- نمودار نیرو- تغییر مکان خالص تیر بتنی آزمایش شده مطابق با روش ASTM C1609



شکل ۷- تعیین عملکرد خمشی تیر های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C1609

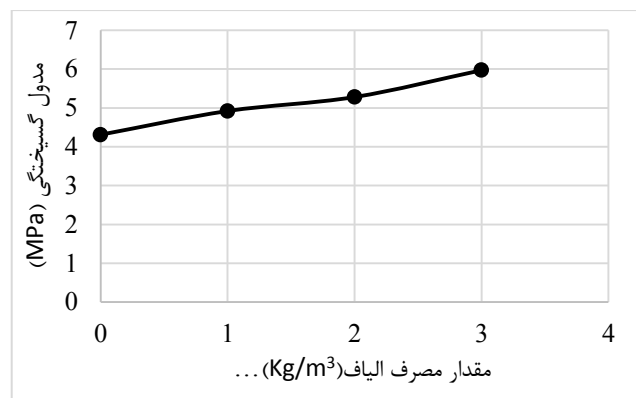
گسیختگی مخلوط بتنی شاهد، افزایش می یابد. افزودن الیاف FORTA به مقدار ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم در متر مکعب بتن، باعث افزایش مدول گسیختگی طرح اختلاط بتن شاهد به ترتیب به میزان ۱۴، ۲۳ و ۳۸ درصد می گردد. این موضوع به دلیل افزایش ظرفیت باربری نمونه ها، قبل از گسیختگی خمشی آن است. الیاف باعث گیر افتادن ترک ها در بتن شده که این موضوع منجر به تحمل بیشتر بار خمشی قبل از شکست، نسبت به نمونه ی شاهد می شود. با توجه به این نتایج مشاهده می گردد که با افزایش مقدار مصرف الیاف، میزان افزایش مدول گسیختگی مقطع نیز افزایش می یابد. علت این موضوع افزایش تعداد الیاف در بتن بوده که باعث می شود تا ظرفیت باربری مقطع در هنگام بارگذاری خمشی افزایش یابد. از طرفی، با توجه به تعداد بیشتر الیاف، احتمال قرار گیری آنان در محل های

۳. نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک فورتا در مقادیر مختلف بر عملکرد خمشی مخلوط های بتنی شاهد و الیافی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی پرداخته می شود. در شکل ۸، نمودار تغییرات مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) نسبت به مقدار مصرف الیاف در طرح های اختلاط مورد بررسی را نشان می دهد. دیده می شود که مقدار مدول گسیختگی تمامی طرح های اختلاط مورد بررسی، از حداقل مدول گسیختگی مجاز بتن روسازی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱ (به میزان ۴ مگاپاسکال) بیشتر بوده که این موضوع نشان دهنده ی رعایت معیار مقاومت خمشی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی مورد بررسی در این تحقیق می باشد. با توجه به نمودار، دیده می شود که با افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مدول

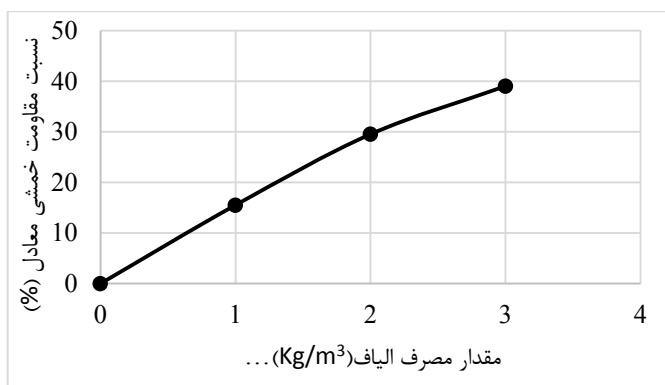
مستعد ترک خوردگی بیشتر شده، در نتیجه الیاف بیشتری عمل پل زدن را در محل های مستعد ترک خوردگی، انجام می دهند.

افزایش مدول گسیختگی نمونه ها با افزودن الیاف از مقدار ۰ به ۱، از ۱ به ۲ و از ۲ به ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب به میزان ۱۴، ۷ و ۱۳ درصد می باشد. دیده می شود که با افزودن الیاف به بتن شاهد به میزان ۱ کیلو گرم بر متر مکعب، مدول گسیختگی به میزان زیادی افزایش یافته، اما با افزودن الیاف به میزان ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار افزایش مدول گسیختگی، کمتر می شود. با توجه به نزدیک بودن این اعداد به یکدیگر، امکان نتیجه گیری مناسب وجود نداشته و بررسی بیشتر این موضوع، نیازمند انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه می باشد تا تاثیر مقدار الیاف بر میزان افزایش مدول گسیختگی، بهتر مشخص شود.



شکل ۸- نمودار تغییرات مدول گسیختگی بتن در مقادیر مختلف مصرف الیاف فورتا

الیاف، این نسبت، به میزان چشمگیری افزایش می یابد. با افزودن الیاف FORTA به میزان ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت مقاومت خمشی معادل بتن شاهد به ترتیب به میزان ۱۵، ۵، ۲۹، ۵ و ۳۹، ۰ درصد افزایش می یابد. الیاف ماکرو سینتتیک، قابلیت جذب انرژی و تحمل بارگذاری خمشی در تغییر مکان های مختلف نمونه را افزایش می دهد. میزان افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل نمونه ها با افزودن الیاف از ۱ به ۲ کیلوگرم بر متر مکعب، از میزان افزایش این نسبت با افزودن الیاف از ۲ به ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر می باشد. البته این مقادیر اختلاف به هم نزدیک بوده و جهت نتیجه گیری مناسب تر و بررسی علت دقیق تر این موضوع، نیازمند تحقیقات بیشتر در این زمینه می باشد.



شکل ۹- نمودار تغییرات نسبت مقاومت خمشی معادل بتن در مقادیر مختلف مصرف الیاف فورتا

با توجه به این نتایج و نتایج مدول گسیختگی که در قسمت قبل توضیح داده شد، دیده می شود که میزان تاثیر الیاف ماکروسینتتیک فورتا بر افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل، از میزان تاثیر این الیاف بر مدول گسیختگی نمونه ها، به مقدار جزئی بیشتر می باشد. این موضوع بیان می کند که الیاف ماکرو، تاثیر بیشتری بر مقاومت بعد از ترک خوردگی نسبت به مقاومت قبل از گسیختگی بتن، دارد. همچنین، دیده می شود که جهت بررسی عملکرد خمشی روسازی های بتنی الیافی، بررسی مقاومت خمشی در هنگام گسیختگی، کافی نبوده چرا که

شکل ۹، نمودار تغییرات نسبت مقاومت خمشی معادل $(R_{e,3})$ را نسبت به مقدار مصرف الیاف در طرح های اختلاط را نشان می دهد. با توجه به این نمودار، دیده می شود که مقدار نسبت مقاومت خمشی معادل طرح اختلاط شاهد، تقریباً به میزان صفر می باشد. علت این موضوع این است که قابلیت جذب انرژی طرح اختلاط شاهد بسیار کم بوده و پس از گسیختگی خمشی، قادر به تحمل نیروی بیشتر در تغییر مکان های مختلف نمی باشد. با افزودن

سهم الیاف در افزایش مقاومت بعد از ترک خوردگی نسبت به سهم آن در افزایش مقاومت خمشی در هنگام گسیختگی در بتن های الیافی، بیشتر می باشد. بنابراین میزان اهمیت بررسی عملکرد خمشی بتن های الیافی بعد از ترک خوردگی با بررسی مقاومت خمشی در هنگام گسیختگی، برابر و حتی بیشتر می باشد. این موضوع در روسازی های بتنی الیافی بسیار با اهمیت بوده و باید مد نظر قرار گیرد. همچنین دیده می شود که استفاده از الیاف ماکروسینتتیک FORTA در مقادیر مختلف، تاثیر مثبت زیادی بر بهبود عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی خمشی و بعد از ترک خوردگی دارد.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر افزودن الیاف ماکروسینتتیک فورتا در مقادیر مختلف بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی، مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق، به شرح زیر می باشد:

- استفاده از الیاف ماکروسینتتیک باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی بتن های الیافی در هنگام گسیختگی نسبت به بتن های شاهد گردید. این موضوع به دلیل افزایش ظرفیت باربری بتن شاهد با افزودن الیاف و کنترل ترک خوردگی قبل از گسیختگی می باشد.

- میزان افزایش مدول گسیختگی بتن با افزودن الیاف ماکروسینتتیک در مقادیر ۱ و ۳ کیلوگرم بیشتر از میزان افزایش این مدول با افزودن الیاف در مقدار ۲ کیلوگرم بود.

- میزان نسبت مقاومت خمشی معادل بتن شاهد با افزودن الیاف ماکروسینتتیک فورتا، به میزان چشمگیری رشد کرده و افزایش یافت. علت این امر، افزایش قابلیت جذب

انرژی و مقاومت بعد از ترک خوردگی بتن های الیافی می باشد.

- میزان افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل بتن های الیافی با افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن از ۱ به ۲ کیلوگرم، بیشتر از افزودن این الیاف از ۲ به ۳ کیلوگرم می باشد.

- میزان تاثیر الیاف ماکرو در افزایش نسبت مقاومت خمشی معادل از تاثیر این الیاف در افزایش مدول گسیختگی بتن شاهد، به صورت جزئی بیشتر می باشد. این موضوع بیان می کند که میزان اهمیت بررسی اثر افزودن الیاف ماکرو بر مقاومت بعد از ترک خوردگی بتن برابر و حتی بیشتر از اثر آن بر مقاومت خمشی در هنگام گسیختگی می باشد.

- جهت بررسی بهتر اثر افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی، نیاز است تا هر دو عملکرد خمشی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج این تحقیق حاکی از عملکرد خوب الیاف ماکروسینتتیک فورتا بر عملکرد خمشی روسازی های بتنی در هنگام گسیختگی و بعد از ترک خوردگی دارد، استفاده از این الیاف می تواند باعث افزایش دوام و مقاومت روسازی های بتنی شده، که این موضوع می تواند منجر به کاهش خرابی های به وجود آمده و هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری روسازی گردد. همچنین، در صورت به وجود آمدن ترک خوردگی، وجود این الیاف، از گسترش این ترک ها جلوگیری کرده و مانع از شکست کامل دال روسازی گردد. با این وجود جهت استفاده از ظرفیت ایجاد شده توسط این الیاف در طراحی روسازی های بتنی، نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات دوام این روسازی ها می باشد.

- [1] A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino, *Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement*, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 888–895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077>.
- [2] Y.H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, Second Edition, 2004.
- [3] M. Khan, A. Rehman, M. Ali, *Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road*, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>.
- [4] M. Khan, M. Ali, *Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads*, *Constr. Build. Mater.* 166 (2018) 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.167>.
- [5] وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، (۱۳۹۶). "دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها، ضابطه ی شماره ۷۳۱". معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی
- [6] N.J. Delatte, *Concrete pavement design, construction, and performance*, Crc Press, 2014.
- [7] D.K. Merritt, *Feasibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 2000.
- [8] O. Smirnova, A. Kharitonov, Y. Belentsov, *Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete*, *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.* 6 (2019) 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.12.004>.
- [9] P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, P. Jamsawang, S. Horpibulsuk, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, *Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand*, *Case Stud. Constr. Mater.* 11 (2019) e00271. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271>.
- [10] W. Kim, J.C. Jeon, B.H. An, J.H. Lee, H. Do Kim, C.G. Park, *Effects of Reinforcing Fiber and Microsilica on the Mechanical and Chloride Ion Penetration Properties of Latex-Modified Fiber-Reinforced Rapid-Set Cement Concrete for Pavement Repair*, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018 (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/6839350>.
- [11] M.O. Kim, A.C. Bordelon, *Age-dependent properties of fiber-reinforced concrete for thin concrete overlays*, *Constr. Build. Mater.* 137 (2017) 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.097>.
- [12] D.H. Chen, W. Zhou, L. Kun, *Fiber reinforced polymer patching binder for concrete pavement rehabilitation and repair*, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.075>.
- [13] N. Salemi, K. Behfarnia, *Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement*, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.037>.
- [14] J. Zhang, Z. Wang, X. Ju, *Application of ductile fiber reinforced cementitious composite in jointless concrete pavements*, *Compos. Part B Eng.* 50 (2013) 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.007>.
- [15] ASTM D7508 / D7508M-20, *Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- [16] M. Kayondo, R. Combrinck, W.P. Boshoff, *State-of-the-art review on plastic cracking of concrete*, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 886–899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197>.
- [17] H. Rooholamini, A. Hassani, M.R.M. Aliha, *Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology*, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002>.
- [18] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhanian, *Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers*, *Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212>.

- [19] S.A. Altoubat, J.R. Roesler, D.A. Lange, K.A. Rieder, Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.008>.
- [20] S. Wtaife, A. Alsabbagh, Analysis of Flexural Capacity of Fiber Reinforced Concrete Pavements, *Int. J. Technol. Eng. Stud.* 4 (2018) 203–210. <https://doi.org/10.20469/ijtes.4.10001-6>.
- [21] E.R. Silva, J.F.J. Coelho, J.C. Bordado, Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 473–480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.017>.
- [22] V.D. Shirish, Parametric study of glass fiber reinforced concrete, *Adv. Struct. Eng.* 20 (2014) 1909–1916.
- [23] I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Constr. Build. Mater.* 230 (2020) 116769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>.
- [24] F. Xu, M. Zhou, J. Chen, S. Ruan, Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material, *Constr. Build. Mater.* 63 (2014) 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.054>.