بررسی تاثیر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر مشخصات فنی سیمان

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

زیور نیک‌فال
رئیس آزمایشگاه فیزیک و حفاری کارخانه سیمان تهران

مهدی چینی
ستادیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عضو هیات مدیره انجمن علمی بتن

محمد وطنی
کارشناس آزمایشگاه کارخانه سیمان تهران

چکیده

مطابق منابع متعدد، پوزولان‌ها بهبود دهنده خواص سیمان می‌باشند. با توجه به امکانات موجود در اکثر کارخانجات سیمان کشور، سایش همزمان کلینکر و پوزولان مورد استفاده قرار می گیرد. ولی با توجه به تجربیات و تحقیقات انجام شده مبنی بر تاثیر مناسب‌تر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر کیفیت سیمان، در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. به نظر می‌رسد سایش همزمان کلینکر و پوزولان با توجه به ضرایب سایش‌پذیری مختلف کلینکر و پوزولان، موجب ۲فازی شدن سیمان و بروز نقایصی گردد. لیکن میزان این تاثیر و نحوه اثرگذاری چندان روشن نمی باشد. در این مقاله برای بررسی این موضوع یک نمونه کلینکر تهیه گردید. پس از آنالیز شیمی و مطالعه میکروسکوپی، سیمان سازی آزمایشگاهی صورت گرفت. در فاز اول سیمان‌سازی آزمایشگاهی نمونه‌های حاوی ۰درصد، ۵درصد، ۱۰درصد و ۲۷/۵درصد پوزولان تهیه شدند که سایش کلینکر و پوزولان هم‌زمان صورت گرفت. در فاز دوم ۴نمونه سیمان محتوی درصد پوزولان‌های مذکور تهیه شدند، با این تفاوت که سایش کلینکر و پوزولان به طور جداگانه انجام گردید. ۷نمونه سیمان آزمایشگاهی تهیه شده مورد آزمایش‌های تعیین مانده روی الک‌های ۹۰، ۴۵ و ۳۲ میکرون، دانه‌بندی لیزری، نرمی (بلین)، گیرش اولیه و نهائی، مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸روزه ملات استاندارد و مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰روزه بتن قرار گرفتند. مشخصات ظاهری بتن های تازه نیز ثبت و مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر کم پوزولان (۵درصد) سایش جداگانه یا هم زمان کلینکر و پوزولان تاثیر متفاوت و مشخصی در مشخصات فنی سیمان و بتن نداشته‌اند و در واقع وجود پوزولان باعث بهبود کارایی بتن و همچنین افزایش ۲۱-۱۵درصد مقاومت فشاری ۲۸روزه و ۶-۴ درصد مقاومت فشاری ۹۰روزه بتن می شود. از این رو مصرف حدود ۵درصد پوزولان به علت بهبود دانه‌بندی سیمان، کاربرد بتن را بهتر می نماید. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) نیز سایش جداگانه موجب افزایش حدود ۴۰درصد مقاومت فشاری ملات و بتن ۲۸روزه، ۱۵درصد افزایش ذرات بین الک ۳ تا ۳۰ میکرون ۳-۳۰)Δ) سیمان و کاهش کارپذیری بتن نسبت به سایش همزمان می‌گردد. همچنین در کارایی برابر، با افزایش پوزولان نسبت w/c را افزایش می‌یابد.کلمات کلیدی: پوزولان، سایش جداگانه، هم‌زمان، بتن، سیمان.

۱- مقدمه (تاریخچه و هدف پژوهش)

مطابق منابع متعدد، پوزولان‌ها بهبود دهنده خواص سیمان می‌باشند. تجربیات متعدد پروژه‌ها نیز این موضوع را اثبات نموده‌اند. در کشور ایران با توجه به امکانات اکثر کارخانجات سیمان، سایش کلینکر وپوزولان به صورت همزمان می‌باشد ولی تجربیات جهانی و نتایج تحقیقات

انجام شده در جهان حاکی بر تاثیر مطلوب‌تر سایش جداگانه پوزولان و کلینکر بر کیفیت سیمان تولیدی می باشد. لذا در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. به نظر می‌رسد سایش همزمان کلینکر و پوزولان با توجه به ضرایب سایش‌پذیری مختلف کلینکر و پوزولان، دانه‌بندی سیمان ۲بخشی شود. در این تحقیق بررسی فنی-آزمایشگاهی این موضوع در محصولات کارخانه سیمان تهران مدنظر می‌باشد. لذا هدف پروژه بررسی تاثیر سایش جداگانه پوزولان در مشخصات سیمان (پرتلند تیپ۲، پوزولانی و پوزولان ویژه) با استفاده از آسیاب آزمایشگاهی است.

قیاسوند و رمضانیانپور (۲۰۱۵) تأثیر روش سایش را بر روی مصرف انرژی و توزیع اندازه ذرات سیمان‌های آمیخته را مطالعه نمودند. در این تحقیق آنها تأثیر سایش هم‌زمان و جداگانه بر میزان مصرف انرژی، دقت بلین و توزیع اندازه ذرات (PSD) بر روی سیمان‌های آمیخته شامل سیمان پرتلند پوزولانی (PPC) ، سیمان پرتلند آهکی (PLC) و سیمان مرکب پرتلند (PCC) بررسی کردند. در مطالعه مذکور، ۱۸ نوع سیمان شامل دو نوع سیمان پرتلند (PC) ، چهار نوع سیمان پرتلند آهکی (PLC) ، چهار نوع سیمان پرتلند پوزولانی (PPC) و هشت نوع سیمان مرکب پرتلند (PCC) استفاده شد. تحقیقات آنها نشان داد که توزیع اندازه ذرات (PSD) سیمان‌های آمیخته برای هر روش متفاوت است. استفاده صحیح از افزودنی‌ها نه تنها باعث بهبود سایش در سیمان‌های آمیخته می شود، بلکه توزیع اندازه ذرات از این سیمان ها را نیز بهبود می‌بخشد [۲].

ویرت (۲۰۰۷) طی مطالعاتی عنوان نمود که ترجیح سایش جدا یا هم‌زمان به سه معیار زیر بستگی دارد: ۱- از نظر فنی: فرآیند سایش جداگانه از این مزیت برخوردار است که می توان PSD اجزای مختلف را کنترل کرد، می‌توان از یک فن‌آوری مناسب برای هر مؤلفه استفاده کرد و سیمان‌ها را مطابق دلخواه تشکیل داد. فرآیند سایش هم‌زمان از نظر فنی ساده‌تر است و همگن‌سازی به راحتی صورت می‌گیرد. با این حال، PSD از اجزای مختلف عمدتا بسته به تفاوت نسبی آنها در قابلیت خرد شدن است؛ ۲- از نظر انرژی یا مزیت زمانی: بسته به نوع پوزولان، مقدار اضافه شده، مدت زمان سایش هر یک از روش‌های سایش قابل بررسی است؛ ۳- امکان سنجی: این امکان وجود دارد که یک ماده سازنده سیمان چند جزء به دلیل خرد کردن ترجیحی یکی دیگر از اجزای قابلیت خردایش آسانتر نتواند به نرمی مورد نیاز خود برسد. در این حالت به طور مشخص باید از روش سایش جداگانه استفاده شود [۳].

کیاسار و عفیفی (۱۹۷۶) قابلیت خردایش برخی از افزودنی‌های معدنی و اهمیت آن در تولید سیمان آمیخته را مطالعه نمودند. آزمایش‌های آنها بر روی سیمان‌های آمیخته متشکل از ۷۱درصد کلینکر سیمان پرتلند ، ۲۵درصد افزودنی‌های معدنی و ۴درصد گچ انجام شد. در یک سری از آزمایش‌ها، اجزای سیمان مخلوط به طور جداگانه و در یک سری دیگر همزمان سایش شدند. نتایج نشان داد که در حالت سایش همزمان، وقتی افزودنی سخت‌تر از کلینکر (مانند ماسه) با کلینکر سایش می‌شود از مقاومت فشاری اولیه بیشتری نسبت به سیمانی

که در آن افزودنی نرمتر از کلینکر است برخوردار است. برای موادی که نسبت به کلینکر نرم‌تر هستند، سایش مجزا بهتر از سایش هم‌زمان است [۴].

اردوگو و همکاران (۱۹۹۹) مقایسه سایش هم‌زمان و سایش جداگانه برای تولید سیمان‌های آمیخته با پوزولان طبیعی و سرباره را مطالعه نمودند. آنها یک کلینکر سیمان پرتلند، یک پوزولان طبیعی و یک سرباره کوره بلند (GBFS) را برای به دست آوردن سیمان آمیخته حاوی ۲۵درصد مواد افزودنی معدنی استفاده کردند. پوزولان طبیعی نرم‌تر و سرباره کوره بلند سخت‌تر از کلینکر در سایش بود. دو سیمان به صورت هم‌زمان و دو نمونه دیگر جداگانه سایش شدند. تمام سیمان‌های آمیخته و سیمان شاهد (بدون هیچ‌گونه افزودنی) نرمی یکسانی (بلین: ۳۵۰۰ سانتی‌مترمربع برگرم) داشتند. آنها نشان دادند که مصرف انرژی آسیاب، توزیع اندازه ذرات و مقاومت فشاری ملات ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه دو روش اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد [۵].

باربوزا و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر سایش بر فعالیت پوزولانی مواد باقیمانده گرانیتی را بررسی نمودند. این مطالعه به بررسی پتانسیل پسماند گرانیت به عنوان مواد پایه سیمانی مکمل، و راندمان روش‌های سایش در بهبود واکنش‌پذیری پسماند می‌پردازد. لذا پسماند گرانیت ۲۵درصد وزنی جایگزین سیمان پرتلند شد. پسماند به روش‌های تر، خشک و افزودنی خشک سایش گردید. مواد پایه سیمانی توسط پراش اشعه ایکس کمی با استفاده از روش ریتولدز، ترموگراویمتری (وزن‌سنجی حرارتی) و مقاومت فشاری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. آنها راندمان بالاتر روش سایش مرطوب، افزایش نتایج مقاومت فشاری و به همان افزایش زمان سایش را مشاهده نمودند. نتایج آنها نشان داد که در آزمایش مقاومت ملات استاندارد، جایگزینی جزئی پسماند گرانیت با سیمان به علت فعالیت پوزولانی و اثر پرکنندگی تاثیر قابل توجهی ندارد. همچنین از نظر زیست محیطی و اقتصادی این جایگزینی مزایای مناسبی دارد [۶]. لازم به ذکر است که صنایع استخراج و پردازش گرانیت با تولید ۶درصد در هر سال در ۱۰سال اخیر رشد داشته است. پیش‌بینی می‌شود که در نقاط مختلف جهان تولید این سنگ به ۴۰۰میلیون تن در هر سال برسد (Menezes, et al., 2005; MME, 2009).

۲- برنامه آزمایشگاهی و مواد تحقیق

در اولین مرحله، پوزولان مصرفی در این تحقیق بررسی شد (جدول۱).

جدول۱- مشخصات پوزولان مصرفی در این پروژه

نام معدن	مطالعات میکروسکوپی		اکتیویته (TG) ۲۸روزه	آنالیز شیمیائی						
	نام سنگ‌شناسی	کانی‌های اصلی		LOI	K2O	Na2O	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
تراست جاجرود	توف سبز	کوارتز، فلدسپات، زئولیت	۵۸	۱۰/۴	۲/۲۹	۲/۵۷	۱/۰۶	۳/۵	۲/۰۴	۱۲/۹۳	۶۵/۱۸

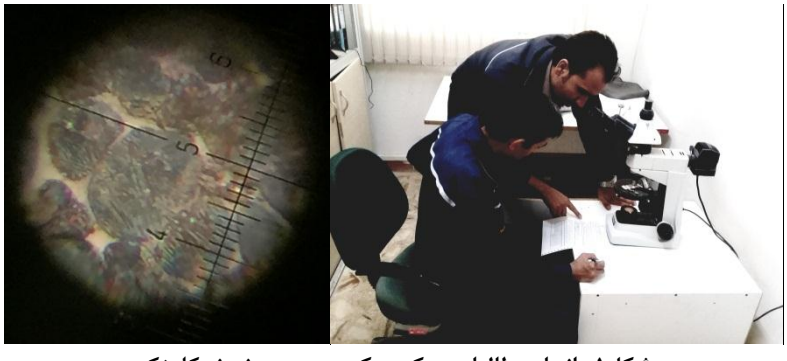
در مرحلــه دوم کلینکــر و گــچ مصــرفی آنــالیز شــیمیائی شــدند (جــدول۲). ســپس کلینکــر تحــت آزمــایش‌هــای میکروسکوپی قرار گرفت (شکل۱ و جدول۳).

جدول۲- آنالیز شیمیائی کلینکر و گچ مصرفی در این مطالعه

نام نمونه	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	CaSO4	آب مولکولی	C3S	C2S	C3A	C4AF
گچ	۱/۳۴	۰/۷۲	۰/۲۲	۳۲/۴۶	۰/۸۴	۴۱/۶۹	۷۰/۹	۱۸/۶۶	*	*	*	*
کلینکر	۲۲/۶۴	۴/۶۸	۳/۹۶	۶۴/۱۶	۳/۳۸	۰/۴۳	*	*	۵۰/۷	۲۶/۷	۵/۷	۱۲/۱

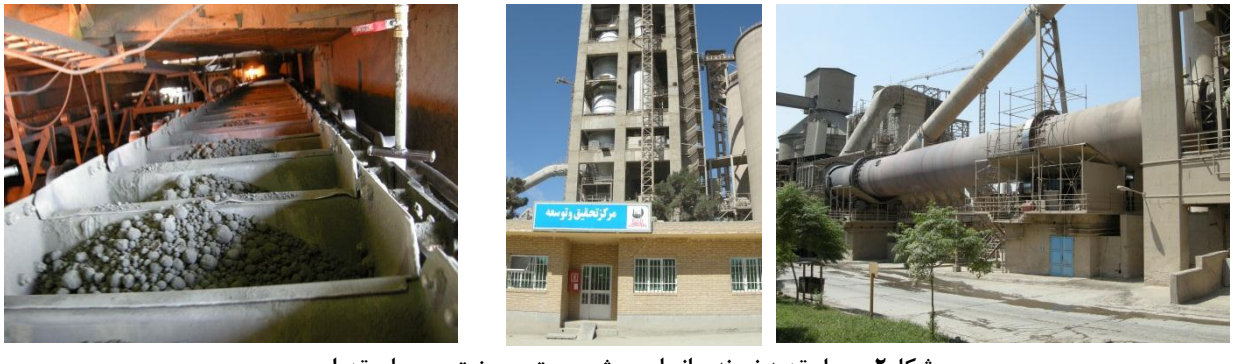
جدول۳- مطالعات میکروسکوپی نمونه کلینکر مصرفی

مقدار فاز آلیت (C_3S) (درصد)	مقدار فاز بلیت (C_2S) (درصد)	مقدار فاز آلومینات (C_3A) (درصد)	مقدار فاز فریت (C_4AF) (درصد)	مقدار آهک آزاد (درصد)	مقدار پری کلاز (درصد)
۵۸	۳۲	۴	۷	۰/۲	۰



شکل۱- انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی نمونه کلینکر

در این مطالعه، کلینکر پرتلند نوع۲ از واحد هشتم کارخانه سیمان تهیه گردید (شکل۳).



شکل۲- محل تهیه نمونه و انجام پروژه- مجتمع صنعتی سیمان تهران

در مرحله سوم اقدام به تهیه سیمان‌های آزمایشگاهی شد. با توجه به اینکه آسیاب آزمایشگاهی تک خانه‌ای است و گلوله‌های مصرفی آن دارای سایز پائین‌تر از ۵۰ میلی‌متر می‌باشند؛ لذا در مشابه‌سازی با خانه اول آسیاب‌های صنعتی، کلینکر، سنگ آهک و گچ تا حداکثر ۴ میلی‌متر با دستگاه کراشر خرد و با نسبت مدنظر (جدول۴) وارد آسیاب شده‌اند (شکل۳).

جدول۴- مشخصات ۷ نمونه سیمان‌سازی آزمایشگاهی

روش سایش		هم‌زمان			جداگانه		
عنوان	سیمان شاهد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد
کلینکر	۹۷درصد	۹۲درصد	۸۷درصد	۶۹/۵درصد	۹۲درصد	۸۷درصد	۶۹/۵درصد
گچ	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد	۳درصد
پوزولان	۰درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد	۵درصد	۱۰درصد	۲۷/۵درصد

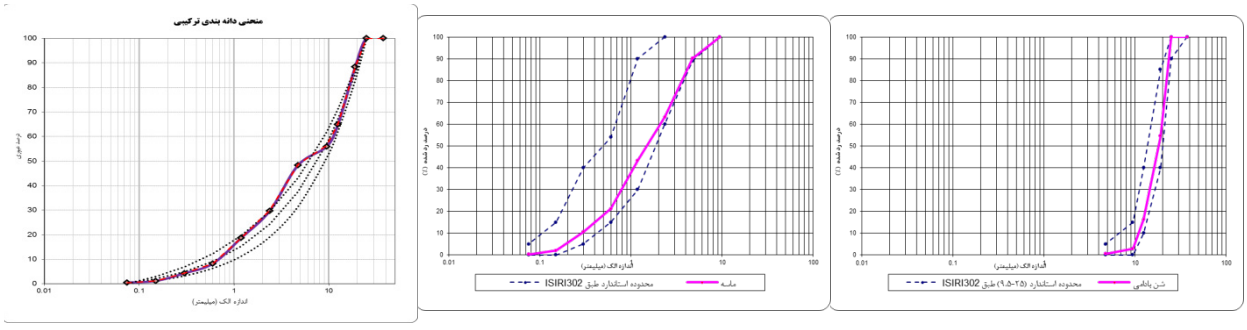
شکل۱- عملیات سیمان‌سازی آزمایشگاهی

آسیاب آزمایشگاهی مورد استفاده با ظرفیت ۸کیلوگرم، ابعاد ۷۵×۷۵ سانتی‌متر و شارژ وزنی ۷۰کیلوگرم بوده است. مبنای سایش مشابه روش صنعتی، دستیابی به نرمی یکنواخت و شاخص بلین ۵۰±۳۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم در نظر گرفته شد.

در گام چهارم تهیه طرح مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی با استفاده از سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی در برنامه کاری قرار گرفت. بطور معمول افزایش حداکثر اندازه سنگدانه (MSA)، منجر به افزایش مقاومت، کاهش هزینه، افزایش چگالی [۷]، کاهش پمپ‌پذیری، کاهش قابلیت بتن‌ریزی در مقاطع نازک یا تراکم آرماتور، افزایش آب‌انداختگی و ... می‌شود. لذا غالبا ساخت بتن صنعتی با سنگدانه MSA:25mm انجام می‌گیرد. مبنای انتخاب مصالح سنگدانه‌ای برای تهیه مخلوط بتن‌های آزمایشی در این تحقیق نیز بر همین منوال (مشابه اجرای بتن در ساختمان‌ها) بوده است. شکل۴ و جدول۵ مشخصات سنگدانه های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. محل تهیه مصالح سنگدانه‌ای از جنوب تهران می‌باشد.

جدول۵- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

نوع سنگدانه	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	چگالی (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن نیمه شکسته (بادامی)	-	۱/۹۸	۲/۵۷	۵۵	۰/۷
ماسه نیمه شکسته	۳/۷	۲/۶۴	۲/۵۶	*	۳/۹



شکل۴- نمودارهای دانه‌بندی شن (سمت راست)، ماسه (وسط) و ترکیب مصالح (سمت چپ) مصرفی در مخلوط‌های بتن

در کلیه مخلوطها، کیفیت مصالح سنگدانه‌ای و آب، مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمونگرها و شرایط عمل‌آوری تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان مصرفی باشد (شکل۲). عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها نیز ۳۵۰ kg/m^3 بود. طراحی مخلوطها به روش ملی انجام شد و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود n:0.35 (میانگین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شد که کاربرد گسترده‌ای (تیر، دال، ستون و مقاطع مختلف با رده روانی خمیری تا روان) دارد [۱]. برای تهیه این مخلوط ۶۰درصد ماسه با ۴۰درصد شن درشت استفاده شد (نمودار شکل۴). در این تحقیق مبنای تهیه مخلوطهای بتن آزمایشگاهی، رسیدن به کارائی مناسب (اسلامپ ۸±۰/۵ سانتی‌متر) بود که w/c= ۰/۵۵±۰/۰۱ به دست آمد. در نهایت مقاومت آزمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شدند و وضعیت ظاهری بتن تازه نیز بطور شهودی ثبت گردید. (شکل۵)

شکل۵- نماهائی از عملیات سیمان سازی آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های فیزیکی-شیمیائی در این تحقیق

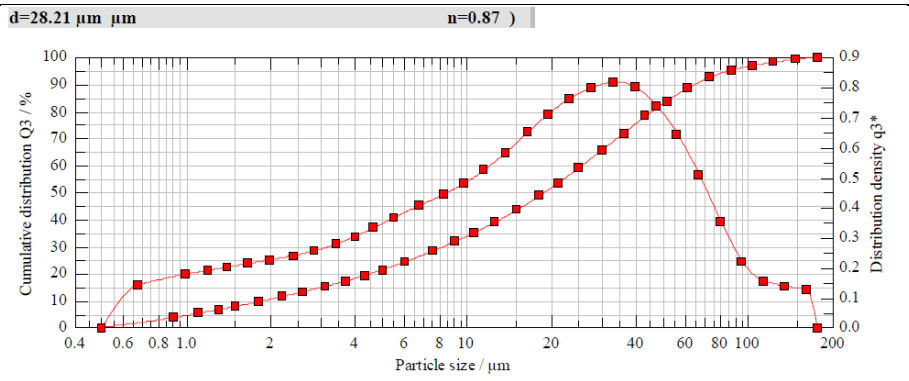
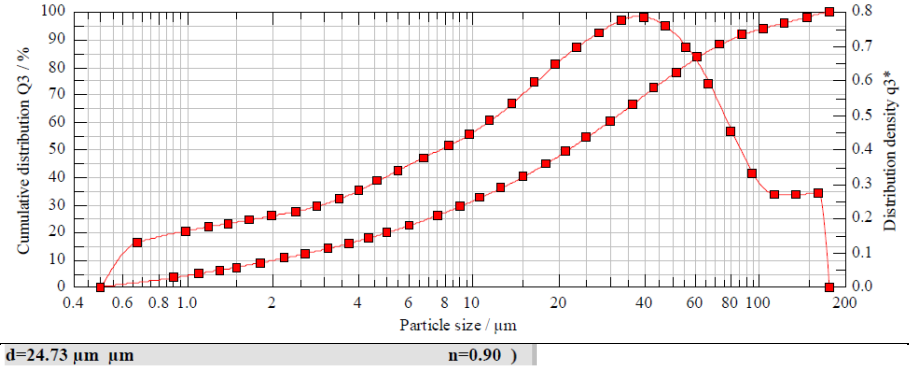
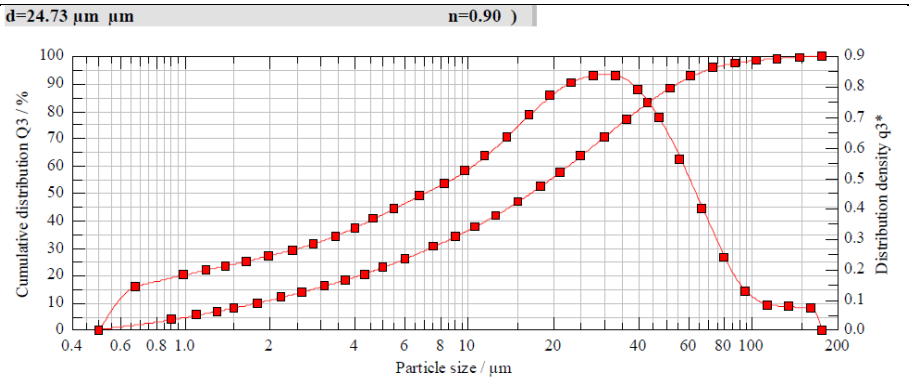
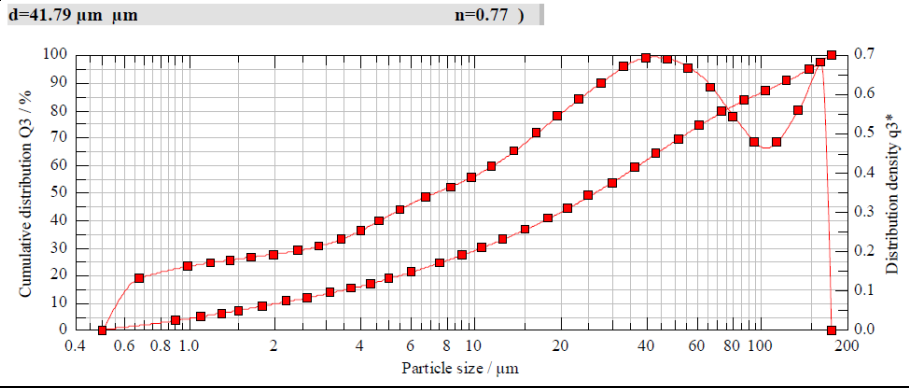
۳- نتایج آزمایشگاهی، بحث و تحلیل

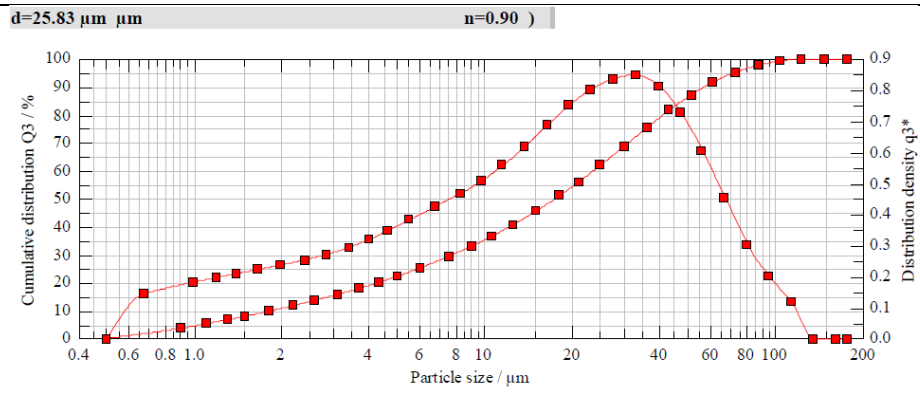
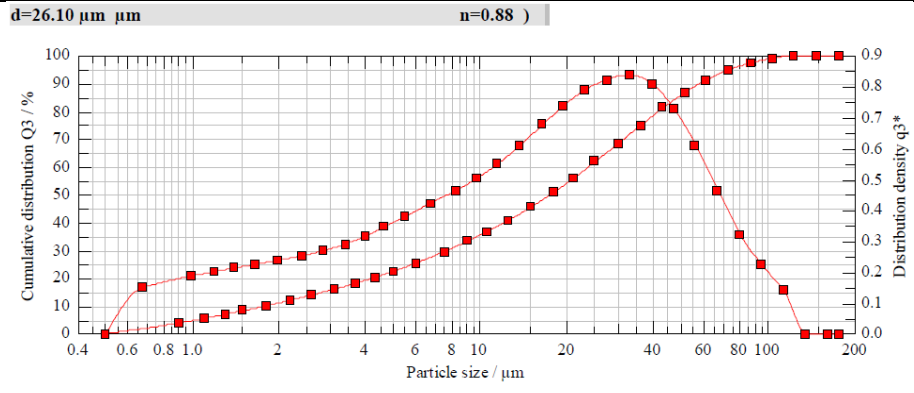
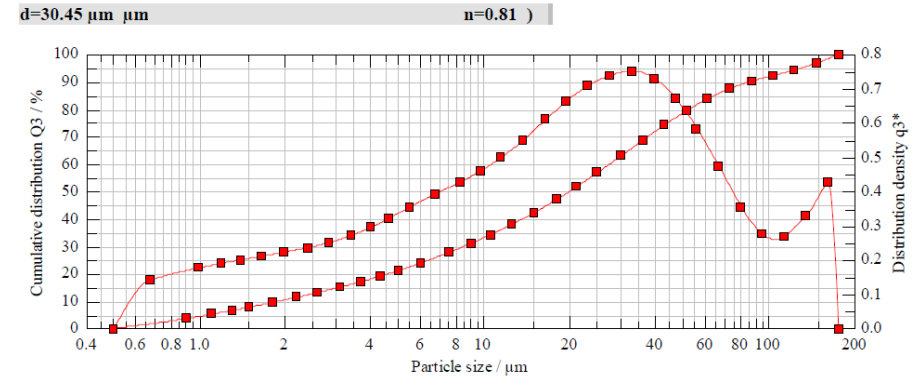
در اولین گام حین ساخت مخلوطهای بتنی، وضعیت ظاهری بتن تازه به صورت شهودی بررسی شدند (جدول۶). در این بررسی شهودی به پارامترهایی همچون قوام، کارپذیری، قابلیت پرداخت‌کاری و غیره امتیاز ۵-۱ داده شد و در نهایت میانگین امتیاز هر مخلوط بررسی شد. در این میان برای پارامترهای نامناسب همچون جداشدگی و غیره واژه "عدم" لحاظ گردید تا بتوان قضاوت راحتی داشت. این بررسی نشان داد که: ۱-در سیمان تهیه شده به روش سایش جداگانه نسبت به نمونه ساخته شده با روش سایش هم‌زمان، مشخصات بتن تازه کمی بهبود می‌یابد؛ ۲- سیمان حاوی پوزولان نسبت به سیمان فاقد پوزولان (نوع۲) مشخصات بتن تازه بهتری دارد؛ ۳- همواره با افزایش پوزولان مشخصات بتن تازه بهبود می‌یابد.

جدول۶- مشخصات شهودی مخلوط بتن‌های تازه

پارامتر		وضعیت مخلوط بتن آزمایشگاهی						
نوع سایش		همزمان				جداگانه		
مقدار پوزولان		۰درصد	۵درصد	۱۰درصد	۵/۲۷درصد	۵درصد	۱۰درصد	۵/۲۷درصد
اسلامپ نهائی (سانتی‌متر)		۶/۵	۶	۵/۵	۴/۵	۶	۵	۵
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)		۲/۲۹	۲/۳۱	۲/۳۱	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۱	۲/۲۵
قوام (اصطلاحا عسلی بودن و لوز داشتن بتن)		۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
کارپذیری (راحتی در جابجائی بتن و غیره)	اولیه (۵دقیقه)	۴	۵	۴	۴	۵	۴	۴
	با تاخیر (۲۰دقیقه)	۲	۳	۴	۴	۳	۴	۴
قابلیت پرداخت‌کاری (و ماله‌کشی یا صاف نمودن سطح بتن)	اولیه (۵دقیقه)	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
	با تاخیر (۲۰دقیقه)	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳
پمپ‌پذیری (بافت ظاهری نرم، کمبود سنگدانه‌های تیزگوشه، درشت و غیره)		۳	۳	۳	۳	۲	۳	۴
قابلیت تراکم (فشردگی با دست و منسجم شدن بتن)		۳	۳	۴	۵	۴	۵	۵
چسبندگی اجزای بتن به هم و انسجام آن	اولیه (۵دقیقه)	۴	۴	۵	۵	۴	۴	۵
	با تاخیر (۲۰دقیقه)	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۵
عدم بافت خشن (فرم‌پذیری بد به علت اصطحکاک سنگدانه‌ها با هم)		۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴
عدم استعداد جداشدگی (تفکیک خودکار شن، ماسه و خمیره بتن)		۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
عدم روند کاهش سریع اسلامپ طی ۱ساعت		۵	۵	۴	۳	۵	۵	۵
عدم زمان گیرش طولانی بتن، عدم صعوبت در پرداخت‌کاری و جابجائی با تاخیر آن		۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
عدم استعداد آب‌انداختگی (جمع شدن آب بر روی سطح بتن)		۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵
میانگین امتیازات		۳/۶	۴/۱	۴/۳	۴/۳	۴/۲	۴/۴	۴/۶

در گام بعدی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی دانه‌بندی به روش لیزری شدند. شکل۶ و جدول۷ نتایج و نمودارهای دانه‌بندی نمونه‌های سیمان را نشان می‌دهد.

نمونه شاهد		
سایش همزمان	۵درصد پوزولان	
	۱۰درصد پوزولان	
	۲۷/۵درصد پوزولان	

سایش جداگانه	۵درصد پوزولان	
	۱۰درصد پوزولان	
	۲۷/۵درصد پوزولان	

شکل۶- دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان

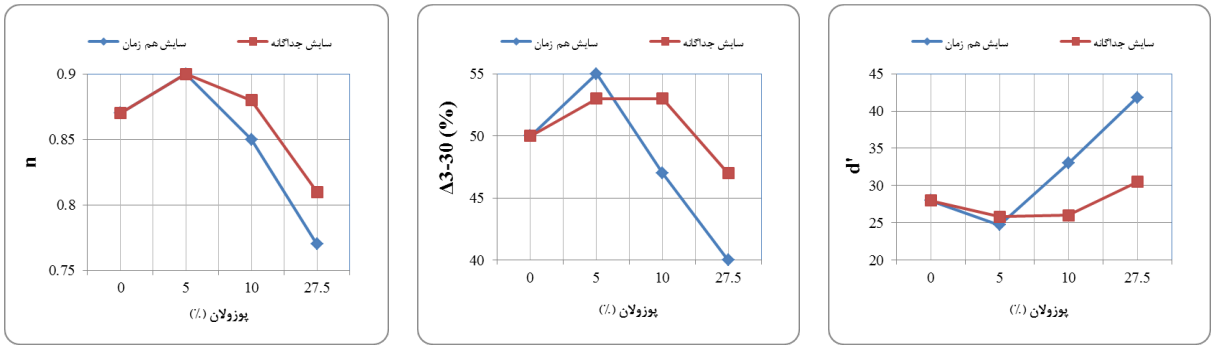
همانگونه که در نمودارهای شکل۶ مشهود است میزان ذرات بین ۳۰-۳ میکرون (Δ3-30) در محدوده ۵۵-۴۰درصد است. طبق مرجع [۸]، میزان Δ3-30 برای سیمان با مقاومت ملات نسبتا زیاد در حدود ۵۵-۴۵درصد است. برخی مراجع دیگر [۹] حداقل مطلوبیت را برای این پارامتر ۵۰درصد ذکر نموده‌اند. این جدول به وضوح اختلاف کیفیت سایش ۲ سری نمونه سیمان مصرفی در این تحقیق را نمایش می‌دهد. نتایج دانه‌بندی لیزری نشان می‌دهد که ۱- با افزایش مقدار پوزولان در سیمان میزان یکنواختی (پارامتر n) کاهش می‌یابد؛ ۲-در سایش جداگانه کلینکر و پوزولان، میزان زبری (پارامتر d') نسبت به روش سایش همزمان کمتر است؛ ۳-با افزایش مقدار پوزولان در سیمان، درصد ذرات ۳۰-۳ میکرون کاهش می‌یابد؛ ۴-دو نمونه حاوی ۲۷/۵درصد پوزولان (سایش همزمان و جداگانه) دارای پارامتر زبری کاملا متفاوتی هستند که نشان از دو فازی شدن در حالت سایش همزمان دارد. علت آن قابلیت

خـــردایش کمتـــر پـــوزولان نســـبت ه کلینکـــر اســـت، یعنـــی اینکـــه پـــوزولان تردتـــر از کلینکـــر مـــی‌باشـــد و در نتیجـــه ذرات نـــرم‌تـــر پـــوزولان و ذرات درشـــت‌تـــر کلینکر می‌باشند.

جدول۷- خلاصه نتایج دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان‌سازی آزمایشگاهی

کد نمونه	روش سایش	مقدار پوزولان	n	d'	مانده روی الک ۴۵ میکرون (درصد)	ذرات بین ۳ تا ۳۰ میکرون (درصد)
۳۲۵۱	*	۰	۰,۸۷	۲۸	۲۱	۵۰
۳۲۵۲	هم زمان	۵	۰,۹۰	۲۵	۱۵	۵۵
۳۲۵۳	هم زمان	۱۰	۰,۸۵	۳۳	۲۵	۴۷
۳۲۵۴	هم زمان	۲۷,۵	۰,۷۷	۴۲	۳۴	۴۰
۳۲۷۴	جداگانه	۵	۰,۹۰	۲۶	۱۶	۵۳
۳۲۷۵	جداگانه	۱۰	۰,۸۸	۲۶	۱۷	۵۳
۳۲۷۶	جداگانه	۲۷,۵	۰,۸۱	۳۱	۲۴	۴۷

نمودارهای شکل ۷ این مقایسه را به نحو مطلوبی نمایش می‌دهد.



مقایسه خلاصه نتایج دانه‌بندی لیزری نمونه‌های سیمان‌سازی آزمایشگاهی

جـــدول۸ و نمـــودار شـــکل۸ مشخصـــات فیزیکـــی ۷نمونـــه ســـیمان آزمایشـــگاهی را بـــه نمـــایش می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهد که:

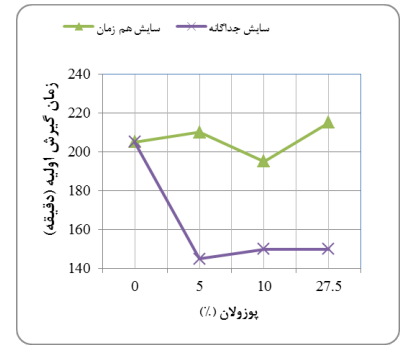
۱- علیـــرغم نرمـــی (بلـــین) مشـــابه، میـــزان مانـــده روی الکهـــا متفـــاوت اســـت و هـــر چـــه محتـــوی پـــوزولان نمونـــه‌هـــا بیشـــتر مـــی‌شـــود، ذرات زبـــره (درشـــت‌تـــر از الـــک‌هـــای ۹۰، ۴۵ و ۳۲ میکـــرون) بیشـــتر مـــی‌شـــوند و همچنـــین در روش ســـایش هـــم‌زمـــان نســـبت بـــه روش ســـایش جداگانـــه، زیـــری ســـیمان بیشـــتر شـــده است.

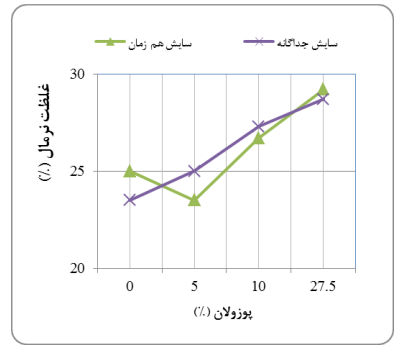
۲- روش ســـایش جداگانـــه باعـــث کـــاهش زمـــان گیرش می‌شود.

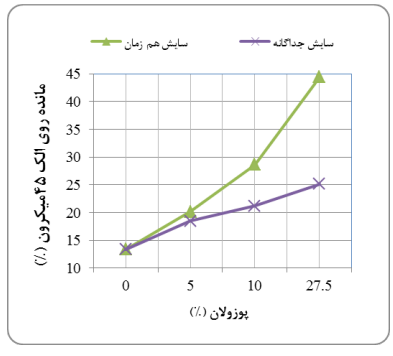
جدول۸- مشخصات فیزیکی نمونه سیمان‌سازی‌های آزمایشگاهی

زمان گیرش (دقیقه)		غلظت	مانده روی الک (درصد)			مقاومت ملات استاندارد (kg/cm2)			بلین	کد	مقدار	روش
نهائی	اولیه	نرمال (درصد)	۳۲میکرون	۴۵میکرون	۹۰میکرون	۲۸روزه	۷روزه	۳روزه	Cm2/gr	نمونه	پوزلان (درصد)	سایش
۳۱۵	۲۰۵	۲۵/۰	۲۳/۶	۱۳/۳	۲/۲	۴۹۰	۳۵۳	۲۳۰	۲۹۸۵	۳۲۵۱	۰	*
۳۱۵	۲۱۰	۲۳/۵	۳۱/۴	۲۰/۱	۱/۶	۵۳۴	۳۸۸	۲۲۷	۳۰۷۶	۳۲۵۲	۵	همزمان
۳۰۰	۱۹۵	۲۶/۷	۳۷/۸	۲۸/۶	۴/۰	۳۹۹	۲۲۹	۱۲۸	۲۸۱۰	۳۲۵۳	۱۰	همزمان
۳۳۰	۲۱۵	۲۹/۲	۵۰/۶	۴۴/۴	۱۳/۸	۲۲۴	۱۱۲	۶۳	۲۹۵۱	۳۲۵۴	۲۷/۵	همزمان
۲۲۵	۱۴۵	۲۵/۰	۲۶/۵	۱۸/۴	۲/۱	۵۴۱	۳۲۹	۱۸۶	۲۹۱۶	۳۲۷۴	۵	جداگانه
۲۳۵	۱۵۰	۲۷/۳	۲۹/۵	۲۱/۲	۲/۸	۵۲۶	۳۲۰	۱۷۰	۲۸۸۱	۳۲۷۵	۱۰	جداگانه
۲۲۰	۱۵۰	۲۸/۷	۳۳/۸	۲۵/۱	۲/۲	۳۳۲	۱۶۹	۹۶	۳۰۵۲	۳۲۷۶	۲۷/۵	جداگانه

جهت تبیین بهتر موضوع شکل۸ نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر زمان گیرش، غلظت نرمال و مانده روی الک ۴۵میکرون مقایسه شده‌اند.







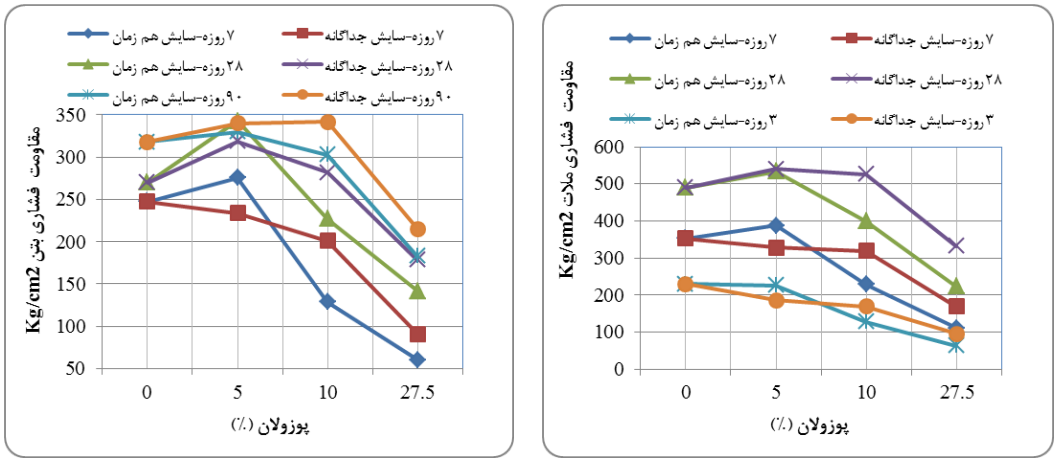
شکل۸- مقایسه مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

جدول۹ خلاصه نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در این مطالعه را نشان می‌دهد. شکل۹ نمودار کلیه آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری در ۷مخلوط بتن آزمایشگاهی (۴۲ آزمونه) را نشان می‌دهد.

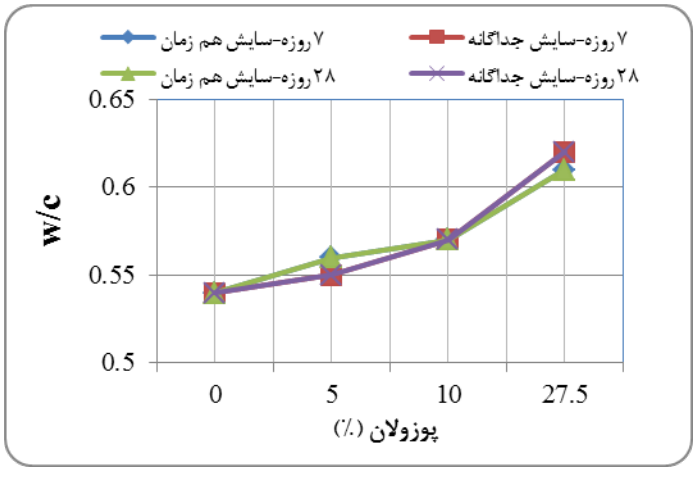
جدول۹- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی عملیات آزمایشگاهی

مقاومت بتن (kg/cm2)			بتن تازه		کد	مقدار	روش
۹۰روزه	۲۸روزه	۷روزه	اسلامپ (cm)	w/c	نمونه	پوزلان (درصد)	سایش
۳۱۸	۲۷۰	۲۴۷	۸	۰/۵۴	۳۲۵۱	۰	*
۳۳۰	۳۴۳	۲۷۵	۸	۰/۵۶	۳۲۵۲	۵	همزمان
۳۰۳	۲۲۷	۱۲۹	۸	۰/۵۷	۳۲۵۳	۱۰	همزمان
۱۸۳	۱۴۲	۶۱	۸	۰/۶۱	۳۲۵۴	۲۷/۵	همزمان
۳۴۰	۳۱۹	۲۳۴	۸	۰/۵۴	۳۲۷۴	۵	جداگانه
۳۴۲	۲۸۲	۲۰۱	۸	۰/۵۵	۳۲۷۵	۱۰	جداگانه
۲۱۵	۱۷۸	۹۱	۸	۰/۵۷	۳۲۷۶	۲۷/۵	جداگانه

بـر اسـاس منـابع قبلـی دور از ذهـن نبـود کـه بـا افـزایش مقـدار پـوزولان، مقاومـت فشـاری کوتـاه و میـان مـدت (۷ و ۲۸ روزه) بـتن کـاهش یابـد. لـیکن در نمونـه‌هـای سـایش جداگانـه، بـا افـزایش پـوزولان، مقاومـت بلندمـدت (۹۰روزه) افـزایش (بـرای سـیمان‌هـای ۵درصـد و ۱۰درصـد بـه ترتیـب ۶درصـد و ۷درصـد) یافـت. البتـه در نمونـه محتـوی ۲۷/۵درصـد پـوزولان بـه علـت افـزایش نسـبتا زیـاد نسـبت w/c مقاومـت ۹۰روزه نیـز نسـبت بـه نمونـه شـاهد کـاهش (۴۸درصـد و ۷۴درصـد) داشـت (شـکل ۱۰). امـا در روش سـایش هـم‌زمـان بـا افـزایش میـزان پـوزولان همـواره مقاومـت بلندمـدت کـاهش دارد کـه نشـان مـی‌دهـد علیـرغم تـاثیر مطلـوب پـوزولان در مقاومـت بلندمـدت (نمونـه‌هـای سـایش جداگانـه)، مقاومـت بلندمـدت نمونـه‌هـای سـایش هـم‌زمـان بـه علـت سـایش نـامطلوب کـاهش دارد. همچنـین مقاومـت فشـاری نمونـه هـای سـایش جداگانـه مقاومـت بیشـتری نسـبت بـه نمونـه هـای هم رده خود در سایش همزمان داشته اند.



شکل۹- نتایج مقاومت فشاری آزمونه‌های ملات استاندارد (سمت راست) و بتن (سمت چپ)



شکل۱۰- نتایج نسبت w/c در مخلوط‌های بتنی مورد آزمایش

۴- نتیجه‌گیری

۱. در مقادیر کم پوزولان (۵درصد) سایش جداگانه یا هم‌زمان کلینکر و پوزولان تاثیر نامناسبی در مشخصات فنی سیمان و بتن نداشته بلکه باعث ۲۱-۱۵درصد بهبود مقاومت ۲۸روزه و ۶-۴درصد بهبود مقاومت ۹۰روزه بتن می‌شود.

۲. این بهبود مقاومت سیمان حاوی ۵درصد پوزولان در مقاومت ملات منجر به بهبود ۹-۸درصد مقاومت ۲۸روزه می‌گردد؛

۳. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان موجب بهبود بیش از ۴۰درصد (افزایش) مقاومت ملات و بتن ۲۸روزه می‌شود؛

۴. در مقادیر زیاد پوزولان (۲۷/۵درصد) سایش جداگانه نسبت به روش سایش هم‌زمان باعث بهبود ۱۵درصد (افزایش) ۳-۳۰Δ دانه‌بندی سیمان و کاهش کارپذیری بتن می‌گردد؛

۵. مصرف حدود ۵درصد پوزولان به علت بهبود دانه‌بندی سیمان، کاربرد بتن را بهتر می‌نماید.

۶. در کارایی برابر، با افزایش پوزولان نسبت w/c را افزایش می‌یابد.

۵- قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیران، کارشناسان، و تکنسین‌های آزمایشگاه و سایر پرسنل زحمتکش مجتمع صنعتی سیمان تهران داریم.

۶- مراجع

[۱] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.

[2]E. GHIASVAND AND A. A. RAMEZANIANPOUR. (2015). "EFFECT OF GRINDING METHOD ON ENERGY CONSUMPTION AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF BLENDED CEMENTS". IJST, Transactions of Civil Engineering, Vol. 39, No. C2+, pp 423-433.

[3]Klaartje De Weerdt. (2007). "Separate grinding versus intergrinding". SINTEF Building and nfrastructure. ISBN 978-82-536-0986-7.

[4]Kaissar M. Hanna & Aly Afify (1976). "Grindability of some additions and its significance in the production of mixed cements". Journal of Applied chemistry and biotechnology banner. 29 May 2007.

[5]K Erdogdua & M Tokyayb & P Türker (). "Comparison of intergrinding and separate grinding for the production of natural pozzolan and GBFS-incorporated blended" Cement and Concrete Research. Volume 29, Issue 5, May 1999, Pages 743-746.

[6]Jairo Mendes Barbosa. & Jose Maria Franco de Carvalho & Keoma Defáveri do Carmo e Silva & Ricardo Andre Fiorotti Peixoto & Guilherme Jorge Silva Brigolin "Influence of grinding on the pozzolanic activity of granite residue" REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 72(3), 395-404, jul. sep. | 2019.

[7]ACI 211-1-91 (Reapproved 2002)" Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete" .

[8]Duda, w. (1976). "Cement data book". Volume 2.

[9]*Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Proprties". Prentice Hall, p22.*

اصلاحیه

در مقاله چاپ شده در شماره ۷۵ فصلنامه انجمن بتن ایران (صفحه ۳۹ تا ۴۴)

با عنوان **"بررسی موردی تاثیر نگهداری سیمان طی ۲ماه بر روند افت مقاومت فشاری بتن و ملات استاندارد"**

نام خانم زیور نیک‌فال به عنوان یکی از نویسندگان محترم مقاله از قلم افتاده بود که بدین وسیله اصلاح می‌گردد.

بررسی اثر الیاف ماکروسنتتیک بر پارامتر انرژی شکست بتن

اویس افضلی ننیز
دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

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

رامبد صفاییان
کارشناس فنی شرکت نانونخ و گرانول سیرجان

چکیده

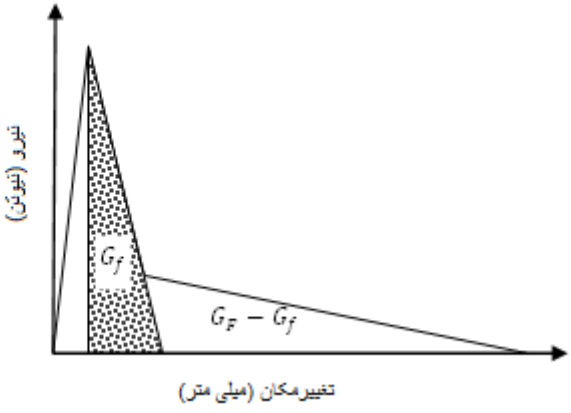
از جمله مهمترین دلایل شکست و انهدام سازه‌های بتنی گسترش ترک و نقص‌های اولیه موجود در آن‌ها است. مکانیک شکست علم بررسی نحوه ایجاد ترک در اجسام، محاسبه پاسخ سازهٔ ترک‌خورده تحت بارهای وارده و پیش‌بینی رفتار سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک‌های اولیه است. این مقاله به بررسی اثر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر یکی از پارامترهای مهم علم مکانیک شکست یعنی انرژی شکست بتن می‌پردازد. بدین منظور چهار طرح مخلوط با افزودن الیاف ماکروسنتتیک به مقدار ۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی در نظر گرفته شد. از دو روش اثر اندازه و روش کار شکست براساس دستورالعمل RILEM به منظور تعیین پارامتر انرژی شکست استفاده شده است. آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای بر روی تیرهای دارای شکاف انجام شد و سپس نتایج با استفاده از روش‌های ذکر شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ماکروسنتتیک سبب افزایش انرژی شکست بتن شده است به گونه‌ای که با افزایش میزان الیاف ماکروسنتتیک از ۰ تا ۰/۳ درصد حجمی، انرژی شکست اولیه از ۳۶/۰۴ به ۶۶/۲۹ و انرژی شکست کل از ۱۰۶/۴۴ به ۴۵۶/۶ ژول بر مترمربع افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف ماکروسنتتیک، انرژی شکست، روش اثر اندازه، روش کار شکست

۱- مقدمه

نقص‌های اولیه موجود و گسترش ترک، یکی از دلایل مهم شکست و انهدام سازه‌هاست. ترک‌ها می‌توانند ناشی از عوامل مختلف از قبیل معایب ساخت، عوامل محیطی و بارهای وارده باشند و در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف در سازه ظاهر می‌شوند و تحت بارهای گوناگون رفتار متفاوتی خواهند داشت. بعضی از این ترک‌ها گسترش پیدا کرده و باعث شکست ناگهانی و فاجعه‌بار سازه‌ها می‌شوند. مکانیک شکست علم بررسی نحوه ایجاد ترک در اجسام، محاسبه پاسخ سازهٔ ترک‌خورده تحت بارهای وارده و پیش‌بینی رفتار سازه در نتیجه رشد و توسعه ترک‌های اولیه است [۱]. کاپلان نخستین فردی بود که در مطالعات خود از ایده مکانیک شکست خطی در مواد با پایه سیمانی استفاده نمود [۲]. مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی در طی

۴۰ سال گذشته گسترش یافته و با درجه اطمینان بالایی برای سازه‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن یک ماده ناهمگن با رفتار غیر خطی است که با توجه به احتمال وجود عیوب متعدد در آن، ممکن است در هنگام بروز تنش گسترش ترک نیز در آن صورت بگیرد. وجود ترک در سازه‌های بتنی امری اجتناب ناپذیر است و در نظر نگرفتن اثرات این ترک‌ها سبب کاهش قابل توجه عمر مفید سازه و در نتیجه به خطر افتادن ایمنی آن می‌شود. شکست بتن همراه با گسترش ترک‌های متعدد در آن است و به طور معمول قبل از رسیدن یک سازه به حداکثر بار خود در آن ترک‌های بزرگی ایجاد می‌گردد. بنابراین مطالعه و شناخت رفتار شکست بتن برای مقابله با گسترش ترک در آن امری ضروری است[۳]. در تحقیقات گذشته محققین بسیاری اثر فاکتورهای مختلف از قبیل افزایش سن بتن، حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی، نسبت آب به سیمان، حجم درشت‌دانه مصرفی، حجم پودر سنگ، مواد مضاف مانند میکروسیلیس، خاکستربادی و نانوسیلیس را بر پارامترهای شکست بتن بررسی نموده‌اند [۴-۶]. برای تحلیل دقیق رفتار بتن در بسیاری از روش‌های المان محدود، منحنی نرم شوندگی بتن یا همان مدل دو خطی مورد نیاز است (شکل ۱). برای تعیین این منحنی، نیاز به در اختیار داشتن سه ویژگی مهم بتن یعنی مقاومت کششی (f_t)، انرژی شکست اولیه (G_f) و انرژی شکست کل (G_F) آن است. لازم به ذکر است که انرژی شکست کل و اولیه دو ویژگی کاملا متفاوت بتن بوده که هر یک از آن‌ها از روش آزمایش خاصی بدست آمده و مطابق مطالعات محققین، این مقادیر با نسبت‌های خاصی به یکدیگر مرتبط هستند [۳].



شکل۱- منحنی نرم شوندگی دو خطی بتن [۳].

بتن الیافی نوعی کامپوزیت است که با بکارگیری الیاف تقویت کننده داخل مخلوط بتن منجر به بهبود محسوسی از خواص مقاومتی بتن می‌گردد. استفاده از الیاف مختلف به عنوان یک راهکار مناسب در جهت کنترل ریز ترک‌ها، ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود. از گذشته تاکنون انواع مختلفی از الیاف به منظور بهبود خواص مواد با پایه سیمانی استفاده شده است. بسیاری از الیاف از جمله فولادی، سنتتیک یا طبیعی بطور گسترده در بتن استفاده می‌شود[۷]. این الیاف به‌طور قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی، هندسه، اثرگذاری روی خواص بتن و هزینه باهم تفاوت دارند. الیاف سنتتیک یکی از گزینه‌هایی است که استفاده از آن در بتن درسال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالت کلی الیاف سنتتیک بسته به طول و قطر الیاف به دو دسته کلی ماکروسنتتیک و میکروسنتتیک تقسیم می‌شوند. قطر الیاف میکرو از ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر بوده و این در حالی است که الیاف ماکرو قطری بالای ۰/۳ میلیمتر دارند[۸]. استفاده از الیاف سنتتیک (میکرو و ماکرو) در مواد سیمانی مصالحی تولید می‌کند که از نظر مقاومت، شکل پذیری، سختی و دوام بهبود یافته‌اند. به‌منظور اصلاح رفتار بتن، با پیدایش نخستین ترک‌ها، الیاف با پل زدن بین ترک‌ها به شکل‌پذیری بعد از ترک‌خوردگی کمک می‌کنند. مدول

الاستیسیته و مقاومت کششی از جمله ویژگی‌های دیگر مهم الیاف است که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد و رفتار الیاف در بتن دارد.

همان طور که اشاره شد عمده تحقیقات انجام گرفته در حوزه مکانیک شکست مربوط به بتن معمولی بوده است. تغییر هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده بتن سبب تغییر در ریزساختار و درنتیجه رفتار بتن می‌گردد. به عبارت دیگر، استفاده از مواد افزودنی همچون الیاف در بتن باعث ایجاد تغییرات در ساختار و رفتار آن نسبت به بتن‌های معمولی گردیده است. از آنجایی که ریزساختار بتن الیافی دارای تفاوت‌های زیادی نسبت به بتن معمولی است، تحقیقات در زمینه پارامترهای شکست بتن خودتراکم الیافی ضروری به نظر می‌رسد. هدف این مقاله بررسی تاثیر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر مهمترین پارامتر شکست بتن یعنی انرژی شکست با دو روش کار شکست و اثر اندازه می باشد. در علم مکانیک شکست انرژی شکست بدست آمده از روش اثر اندازه با نام انرژی شکست اولیه (G_f) و انرژی شکست بدست آمده از روش کار شکست با نام انرژی شکست کل (G_F) شناخته می‌شود. همچنین همان طور که اشاره شد پیدا کردن نسبت بین این دو پارامتر از اهمیت خاصی در رسم منحنی دوپارامتری نرم شوندگی بتن برخوردار است.

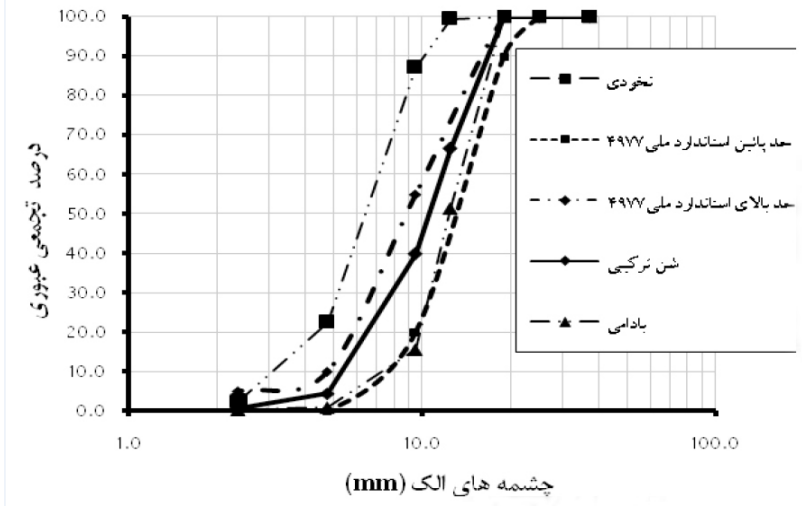
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

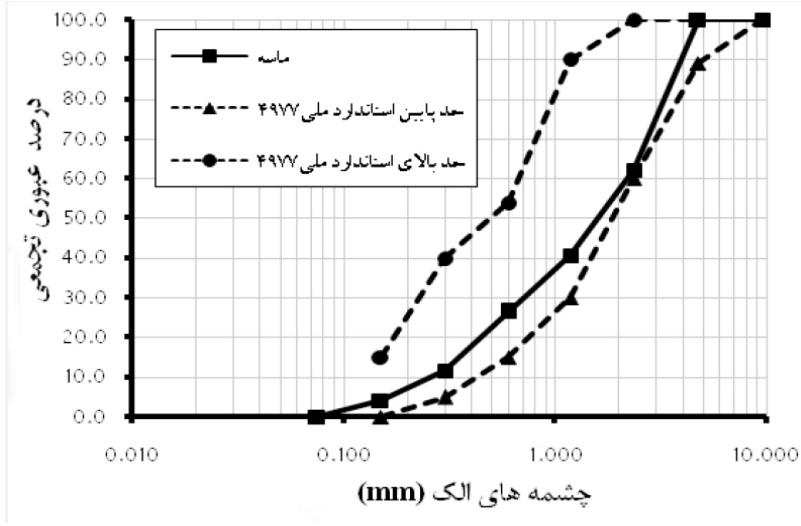
مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان، شن، ماسه، آب، افزودنی فوق روان‌کننده و الیاف می‌باشد که در ادامه جزئیات آن آورده شده است. سیمان مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها، سیمان نوع۲ تهران می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان در جدول شماره۱ آمده است. مصالح سنگی مورد استفاده از معدنی در غرب تهران تهیه شده است. فوق روان کننده مورد استفاده با پایه پلی کربوکسیلات می‌باشد. آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها آب شرب شهری است. دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نسبت‌های دو نوع شن به‌گونه‌ای انتخاب شد که دانه‌بندی ترکیب آن دو نوع شن در محدوده استاندارد ملی ۴۹۷۷ قرار گیرد. همان‌طور که در شکل۲ مشخص است دانه‌بندی شن ترکیبی در محدوده استاندارد قرار دارد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده.

مشخصه شیمیایی	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
درصد	۲۱/۴۲	۶۳/۲۵	٤/٥١	٤/٣٨	١/٤	٣/١٧	٠/٩	٠/٢



شکل۲- منحنی دانه‌بندی شن مصرفی در این تحقیق.



شکل۳- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در این تحقیق.

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر الیاف ماکروسنتتیک بر پارامتر انرژی شکست بتن از الیاف سنتتیک سینوسی استفاده شده است. این الیاف از شرکت نانونخ و گرانول سیرجان تهیه شده است. مشخصات ظاهری و خواص مقاومتی این الیاف در جدول۲ آورده شده است.

جدول۲- مشخصات الیاف ماکروسنتتیک مورد استفاده.

ردیف	نوع الیاف	شکل	طول (mm)	چگالی (gr/cm^3)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	الیاف سینوسی مدول و مقاومت بالا بر پایه پلی الفین اصلاح شده		۴۰	۰/۹۱	۵۸۰	۵/۷

۲-۲- طرح مخلوط‌ها

طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول۳ آورده شده است.

جدول۳- طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق

کد طرح	w/c	سیمان (Kg/m^3)	شن نخودی وضعیت SSD* (Kg/m^3)	شن بادامی وضعیت SSD* (Kg/m^3)	ماسه وضعیت SSD* (Kg/m^3)	الیاف ماکرو سینوسی (Vol %)
Control	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰
S0.1	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۱
S0.2	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۲
S0.3	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۳

۲-۳- روش محاسبه پارامترهای شکست

به منظور تعیین پارامترهای شکست بتن روش‌های مختلفی در استانداردهای بین المللی پیشنهاد شده است. در میان روش‌های پیشنهاد شده سه روش اثراندازه، کارشکست و دو پارامتری از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای شکست بتن محسوب می‌شوند. در این مقاله به‌منظور تعیین انرژی شکست اولیه (G_f) از روش اثر اندازه مطابق RILEM TC-89 [۹] و برای تعیین انرژی شکست کل (G_F) از روش کارشکست مطابق دستورالعمل RILEM TC-50 [۱۰] استفاده شده است. در روش کار شکست آزمایش بر روی ۳ تیر شکاف‌دار تحت خمش سه نقطه‌ای انجام شد. این تیرها دارای ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۸۴۰ میلی‌متری بوده و شکاف اولیه در آن‌ها با قرار دادن یک ورق با ضخامت ۳ میلی‌متر در وسط سطح کششی تیر ایجاد شد. در روش اثر اندازه همه تیرها دارای ضخامت یکسان بوده و از نظر هندسی در دو بعد دیگر مشابه بودند. برای انجام آزمایش برای هر ارتفاع مطرح شده، سه نمونه تیر ساخته شد و در مجموع برای هر طرح اختلاط ۱۲ تیر شکاف‌دار ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات تیرها در روش اثر اندازه در جدول۴ آورده شده است. به منظور تعیین انرژی شکست هر یک از طرح‌های مخلوط، علاوه بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های روش کارشکست و روش اثر اندازه، به مقادیر مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن نیز نیاز بود. بنابراین در هر طرح، سه نمونه استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتی‌متری برای تعیین مدول الاستیسیته و سه نمونه استوانه‌ای ۲۰×۱۰ سانتی متری مقاومت کششی بتن و نیز سه نمونه مکعبی ۱۰ سانتی‌متری برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شد. کلیه آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی انجام شده است. شکل ۴ تصویری از نمونه در حال انجام آزمایش و نیز سطح شکست نمونه حاوی الیاف را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ابعاد نمونه‌های ساخته شده برای تعیین پارامترهای شکست در روش اثر اندازه

اندازه اسمی درشت‌دانه (mm)	ارتفاع (mm)	ضخامت (mm)	طول شکاف (mm)	طول دهانه (mm)	طول نمونه (mm)
۱۲/۵	۳۸/۱	۳۸/۱	۷/۶	۹۵/۲	۱۰۲
	۷۶/۲		۱۵/۲	۱۹۰/۵	۲۰۳
	۱۵۲/۴		۳۰/۵	۳۸۱	۴۰۷
	۳۰۴/۸		۶۱	۷۶۲	۸۱۴

شکل۴- تصویری از یک نمونه در حال آزمایش (سمت چپ) و سطح شکست بتن پس از آزمایش (سمت راست).

۲-۳-۱- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی اثر اندازه

برای محاسبه پارمترهای شکست بر مبنای روش مذکور، مراحل زیر بایستی انجام شود. ابتدا حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیرها در هر طرح مخلوط باید مشخص گردد. در ادامه برای تعیین ضرایب زیر از رگرسیون خطی مختصات Yj در مقابل Xj استفاده می‌شود.

$$Y = AX + C \quad (۱)$$

$$Y_j = \left(\frac{bh_j}{P_j^0}\right)^2 \quad . \quad X_j = h_j \quad (۲)$$

مقادیر A و C شیب و عرض از مبدأ رابطه (۱) هستند. همچنین در رابطه (۲) مقادیر P_j^0، b و hj به ترتیب بار حداکثر اصلاح شده مطابق دستورالعمل RILEM TC-89، عرض و ارتفاع تیر هستند. مقادیر انرژی شکست اولیه (G_f) و نرخ رهاسازی انرژی $g(\alpha)$ بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$G_f = \frac{g(\alpha)}{E_c A} \quad (۳)$$

$$g(\alpha) = 2.25\left(\frac{s}{h}\right)^2 \pi\alpha[F(\alpha)]^2 \quad (۴)$$

در رابطه بالا پارامترهای E_c ، α، s و h به ترتیب مدول الاستیسیته بتن، طول ترک اولیه نسبی، طول دهانه و ارتفاع تیرهای مورد آزمایش هستند. همچنین پارامتر F(α) نیز تابعی کمکی است که برای برون‌یابی نتایج به نمونه‌های بسیار بزرگ مورد استفاده قرارگرفته و بر اساس RILEM TC-89 تعیین می‌شود. سایر پارامترهای شکست نیز می‌توانند براساس روابط ارائه شده در دستورالعمل RILEM TC-89 محاسبه شوند.

۲-۳-۲- محاسبه پارامترهای شکست با روش آزمایشگاهی کار شکست

مقدار انرژی شکست حاصل از این روش که به انرژی شکست کل نیز معروف است به‌صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد ترک با سطح واحد تعریف شده و با استفاده از رابطه زیر از تقسیم سطح زیر نمودار بار-جابجایی بر مساحت سطح شکست بتن محاسبه می‌شود[۱۱]:

$$G_F = \frac{W_F}{b(h - a_0)} \quad (۵)$$

در رابطه بالا W_F انرژی کل لازم برای دو نیم شدن تیر بوده و معادل سطح زیر منحنی بار- جابجایی است، b عرض تیر، h ارتفاع تیر و a_0 طول شکاف اولیه تیر است.

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- خواص مکانیکی

مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نمونه های ساخته شده در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش مقدار الیاف ماکروسنتتیک تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نداشته است.

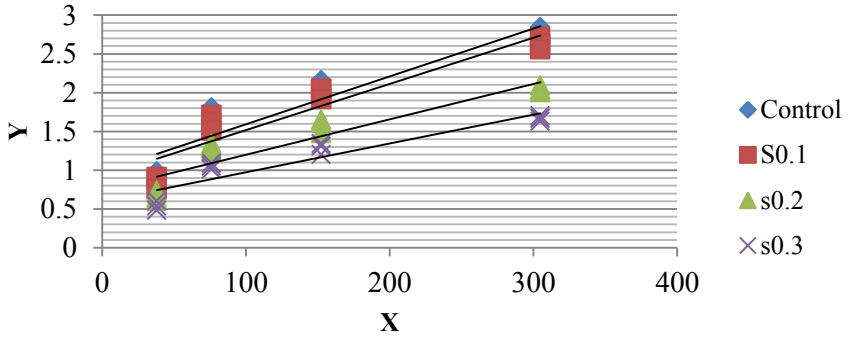
۳-۲- انرژی شکست برمبنای روش اثر اندازه

برای تعیین پارامترهای شکست بر مبنای روش اثر اندازه، بایستی ابتدا با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۲ تیر با ابعاد معین حداکثر بار تحمل شده توسط تیرها تعیین گردد. سپس بر طبق توصیه‌نامه‌ی RILEM TC-89، اثرات مرتبط با وزن نمونه بایستی در محاسبات لحاظ شود و بدین منظور مقدار بار بیشینه‌ی اصلاح شده محاسبه گردد. سپس با برون‌یابی نمونه‌هایی با ابعاد معین به نمونه‌ای با ابعاد بسیار بزرگ، می‌توان مدل مکانیک شکست الاستیک خطی را شبیه‌سازی نموده و از روابط آن استفاده نمود. جدول ۵ مقدار بار حداکثر اصلاح شده متناسب با اندازه نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول۵- خواص مکانیکی و بارهای حداکثر اصلاح شده

کد طرح	مقامت فشاری (MPa)	مقامت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	عمق (mm)	بار حداکثر اصلاح شده (N)		
					تیر۱	تیر۲	تیر۳
Control	۴۳/۱	۳/۱	۳۱/۲	۳۸/۱	۱۴۶۵	۱۵۳۳	۱۵۹۰
				۷۶/۲	۲۱۶۰	۲۲۸۰	۲۲۴۳
				۱۵۲/۴	۳۹۵۴	۴۰۲۰	۴۱۵۵
				۳۰۴/۸	۶۸۹۰	۷۰۱۰	۷۰۹۰
S0.1	۴۴	۳/۲۵	۳۰/۵	۳۸/۱	۱۵۲۰	۱۵۵۶	۱۶۷۰
				۷۶/۲	۲۲۲۰	۲۲۸۰	۲۳۶۴
				۱۵۲/۴	۴۰۷۵	۴۰۵۴	۴۱۹۵
				۳۰۴/۸	۷۰۵۰	۷۱۷۰	۷۲۶۰
S0.2	۴۴/۵	۳/۴۹	۳۰/۱	۱۷۰۱	۱۸۰۳	۱۸۶۸	۱۷۰۱
				۲۵۰۷	۲۵۵۳	۲۶۰۱	۲۵۰۷
				۴۵۲۱	۴۵۷۹	۴۷۸۱	۴۵۲۱
				۸۱۲۵	۸۰۲۸	۸۲۰۱	۸۱۲۵
S0.3	۴۴/۵	۳/۴۹	۳۰/۱	۱۸۷۲	۱۹۸۴	۲۰۹۳	۱۸۷۲
				۲۷۸۳	۲۸۳۴	۲۸۸۷	۲۷۸۳
				۵۰۱۹	۵۰۸۳	۵۳۰۶	۵۰۱۹
				۸۹۹۶	۸۹۱۲	۹۱۰۴	۸۹۹۶

برای هر کدام از طرح مخلوطهای تحقیق بایستی فرایند برون‌یابی و برازش به‌صورت جداگانه انجام شود و مقادیر A و C نیز بطور مجزا محاسبه شوند (شکل ۵). جدول ۶ کلیه‌ی این مقادیر را برای طرح مخلوطهای این تحقیق نشان می‌دهد. به عنوان مثال همان‌طور که مشاهده می‌شود با تحلیل رگرسیون خطی برای طرح اختلاط control مقادیر ضرایب شیب (A) و عرض از مبدأ (C) به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۶۲ ($mm^{-1}\ MPa^{-2}$) و ۰/۹۷۴ (MPa^{-2}) به دست آمدند. پارامتر شکست اصلی شامل انرژی شکست اولیه G_f و چقرمگی شکست (K_{IC}) مرتبط با روش اثر اندازه مطابق دستورالعمل RILEM TC-89 به‌دست آمده و در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل۵- برون‌یابی خطی و برازش خط بر داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۶- مقادیر آماری و پارامترهای شکست با روش اثر اندازه در طرح مخلوط‌های این تحقیق.

کد طرح	$(mm^{-1}\ MPa^{-2})$A	(MPa^{-2})C	(N/m) G_f	K_{IC} (MPa mm0.5)
Control	۰/۰۰۶۲	۰/۹۷۴	۳۶/۰۴	۳۴/۲۷
S0.1	۰/۰۰۶	۰/۹۲	۳۹/۸	۳۴/۸۴
S0.2	۰/۰۰۴۶	۰/۷۴	۵۲/۶	۳۹/۸
S0.3	۰/۰۰۳۷	۰/۶۰۲	۶۶/۲۹	۴۴/۳۷

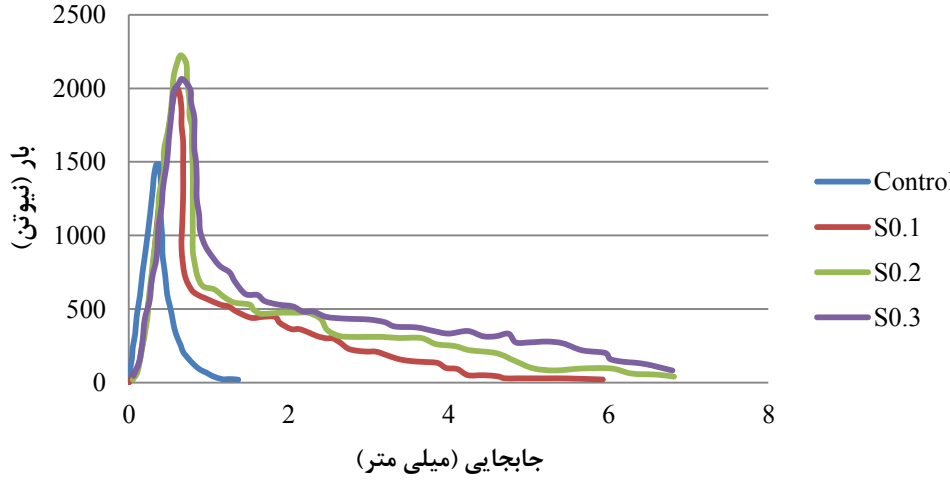
یکی ازمباحث مهم مورد بررسی در این تحقیق بررسی تاثیر استفاده از الیاف ماکروسنتتیک بر پارامترهای شکست بتن است. همان‌طور که درجدول ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف سبب افزایش انرژی شکست اولیه (G_f) شده به‌طوری که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۴ ٪، ۴۵/۹ ٪ و۸۳/۸ ٪ انرژی شکست اولیه شده است. این افزایش در مقدار انرژی شکست اولیه می‌تواند ناشی از این مورد باشد که حضور الیاف سبب به تاخیر افتادن شروع و گسترش میکروترک‌ها در بتن شده، بنابراین ظرفیت تحمل بار تیر افزایش پیدا کرده و متعاقبا سبب افزایش انرژی شکست شده است [۱۲]. براساس داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از این تحقیق رابطه خطی بین انرژی شکست اولیه (G_f) و الیاف مصرف

$$G_f = 103.55\,Vf + 33.15 \qquad (R^2 = 0.95) \qquad (۶)$$

ی (V_f) به شرح زیر بدست آمد:

در این روش مقدار انرژی شکست از تقسیم سطح زیر نمودار بار-جابجایی بدست آمده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای (شکل۶) بر مساحت سطح شکست بتن محاسبه می‌گردد و به انرژی شکست کل معروف می‌باشد. مقادیر انرژی شکست کل حاصل از این پژوهش در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده برای انرژی شکست کل (G_F) نیز به درصد جایگزینی الیاف وابسته بوده است به طوری که به‌طوری که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۲۳ ٪، ۲۴۵٪ و ۳۵۰ ٪ انرژی شکست کل (G_F) شده است. این افزایش به علت طول بلند و نیز شکل سینوسی شکل الیاف است که سبب درگیری بهتر با بتن در محل شروع ترک شده و پس از ترک‌خوردگی‌های بزرگ بر روی ترک‌ها پل زده و مانع از گسترش ترک‌ها و درنتیجه سبب افزایش سطح زیر نمودار بار-جابجایی می‌شود.

۳-۳- پارامترهای شکست بر مبنای روش کارشکست



شکل۶- منحنی نیرو-تغییرمکان برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک

جدول۷- مقادیر GF بدست آمده از آزمایش WFM

کد طرح	انرژی شکست کل (N/m)
Control	۱۰۶/۴
S0.1	۲۲۹/۶
S0.2	۳۵۱/۸
S0.3	۴۵۶/۵

۳-۴- نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه

از آنجایی که برای تعیین مقدار انرژی شکست اولیه (G_f) تنها به بیشینه بار قابل تحمل توسط تیرها تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای نیاز است از این رو محاسبه G_f از G_F آسان‌تر بوده و نتایج حاصل از آن نیز دقیق‌تر خواهد بود. در رابطه با بتن‌های معمولی و نیز بتن خودتراکم محققین مختلفی به تعیین نسبت G_F به G_f پرداخته اند. بیگی و همکاران [۵] در مطالعاتشان به تعیین این نسبت در بتن خودتراکم پرداختند و مقادیر در محدوده ۲/۷ تا ۳/۱۱ برای نسبت انرژی شکست کل (G_F) به انرژی شکست اولیه (G_f) ذکر کردند. نیک بین و همکاران [۱۳] در مطالعاتشان به بررسی اثر بکارگیری مقادیر مختلف ریزدانه معدنی بر رفتار شکست بتن خودتراکم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد نسبت انرژی شکست کل(G_F) به انرژی شکست اولیه (G_f) در محدوده عدد ۳ تغییر خواهد کرد. این نسبت برای بتن‌های پرمقاومت برابر با ۲/۸۸ تخمین زده شده است [۱۴]. در این تحقیق نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه در نمونه بدون الیاف برابر با ۲/۹۵ و برای بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک در حدود ۵/۶۷ تا ۶/۸۸ بدست آمده است.

جدول۸- نسبت انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه در هر طرح مخلوط.

کد طرح	G_f (N/m)	G_F (N/m)	G_F/G_f
Control	۳۶/۰۴	۱۰۶/۴	۲/۹۵
S0.1	۳۹/۸	۲۲۹/۶	۵/۷۶
S0.2	۵۲/۶	۳۵۱/۸	۶/۶۸
S0.3	۶۶/۲۹	۴۵۶/۵	۶/۸۸

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر روی پارامترهای شکست در بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک را می‌توان به‌طور خلاصه بصورت زیر بیان نمود:

۱- حضور الیاف ماکروسنتتیک در طرح مخلوط تاثیر چندانی بر خواص مکانیکی نداشته است.

۲- مقدار انرژی شکست در هر دو روش اثر اندازه و کارشکست به شدت به مقدار الیاف مصرفی وابسته است.

۳- استفاده ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۴ ٪، ۴۵/۹ ٪ و۸۳/۸ ٪ انرژی شکست اولیه (G_f) است.

۴- با افزایش درصد جایگزینی الیاف سطح زیر منحنی بار جابجایی افزایش پیدا کرده است به گونه ای که استفاده از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد حجمی الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب سبب افزایش ۱۲۳ ٪، ۲۴۵ ٪ و ۳۵۰ ٪ انرژی شکست کل (G_F) شده است.

۵- نسبت انرژی شکست کل به اولیه (GF/Gf) برای بتن معمولی برابر ۲/۹۵ و برای بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک در حدود ۵/۶۷ تا ۶/۸۸ بدست آمده است.

۵- مراجع

[1] *Broujerdian, V., Karimpour, H., & Alavikia, S. (2018). "Predicting the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Non-linear Fracture Mechanics". International Journal of Civil Engineering, Vol. 17 (5), pp 1-9.*

[2] *Kaplan, M. F. (1961). "Crack propagation and the fracture of concrete". In Journal Proceedings, Vol. 58(11), pp 591-610.*

[۳] صالحی، ح.، مظلوم، م. (۱۳۹۷). " مطالعه های آزمایشگاهی و عددی گسترش ترک در بتن خودتراکم سبک". مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۶.

[4] *Karamloo, M., Mazloom, M., & Payganeh, G. (2016). "Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete". Engineering Fracture Mechanics, Vol. 168, pp 227-241.*

[5] *Beygi, M. H., Kazemi, M. T., Amiri, J. V., Nikbin, I. M., Rabbanifar, S., & Rahmani, E. (2014). "Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self-compacting concrete". Construction and Building Materials, Vol. 55, pp 202-211.*

[6] *Afzali-Naniz, O., & Mazloom, M. (2019). "Fracture behavior of self-compacting semi-lightweight concrete containing nano-silica". Advances in Structural Engineering, Vol. 22(10), pp 2264-2277.*

[7] *Bentur, A., & Mindess, S. (2006). Fibre reinforced cementitious composites. Crc Press.*

[8] *Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. Construction and building materials, Vol. 132, pp 170-187.*

[9] *RILEM FMT-89, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, Materials and Structures, Vol. 23 (6), pp 461–465, 1990.*

[10] *RILEM FMC-50. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beames, Materials and Structures, Vol.18, (4), pp 287-290, 1985.*

[11] *M. Elices, G. Guinea, J. Planas, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3—Influence of cutting the P-δ tail, Materials and Structures, Vol.25 (6), pp 327-334, 1992.*

[12] *Kazemi, M. T., Golsorkhtabar, H., Beygi, M. H. A., & Gholamitabar, M. (2017). Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods. Construction and Building Materials, Vol. (142), pp 482-489.*

[13] *Nikbin, I. M., Davoodi, M. R., Fallahnejad, H., Rahimi, S., & Farahbod, F. (2015). Influence of mineral powder content on the fracture behaviors and ductility of self-compacting concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28(3), pp 04015147.*

[14] *Einsfeld, R. A., & Velasco, M. S. L. (2006). Measurement of the ratio GF/Gf for numerical analysis of concrete structures. Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 3(4), 361-376.*

مروری بر طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه به روش عملکردی

سید سعید طباطبائی
کارشناس ارشد سازه‌های دریایی
دانشگاه علم و صنعت ایران
عضو انجمن بتن

سید حمید معافی مدنی
کارشناس ارشد سازه– دانشگاه
آزاد اسلامی کرمان

چکیده

امروزه اقتصاد بسیاری از کشورها از جمله کشور ایران به حمل‌ونقل‌های دریایی وابسته شده بطوری که شاهد افزایش ساخت سازه‌های ساحلی به عنوان محل پهلوگیری شناورهای تجاری و نظامی و نیز به عنوان سازه‌های نگهدارنده تأسیسات حمل بار هستیم. لذا در سال‌های أخیر مطالعات بسیاری در زمینه طراحی اسکله‌ها توسط پژوهشگران مختلف انجام گرفته که در نهایت روش "طراحی براساس عملکرد" به عنوان روشی با قابلیت اطمینان بسیار بالا جهت طراحی این سازه‌ها توسعه داده شده است. با توجه به اینکه کشور ایران نیز از نظر لرزه‌خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد و به گواهی اطلاعات مستند علمی و مشاهدات قرن بیستم از خطرپذیرترین مناطق جهان در اثر زمین لرزه‌های پرقدرت محسوب می‌شود، به همین دلیل روش طراحی براساس عملکرد در سال‌های أخیر در کشورمان توسط بسیاری از پژوهشگران جهت افزایش قابلیت اطمینان طرح سازه‌های ساختمانی در مقابل بارهای لرزه‌ای توسعه داده شده و جای خالی استفاده از این روش در طراحی سازه‌های حجیم و گران‌قیمتی مانند اسکله‌های شمع و عرشه دیده می‌شود. اهمیت این موضوع از این جهت است که هزینه‌های ساخت و نگهداری اسکله‌های شمع و عرشه به عنوان قسمت اصلی بنادر بسیار بالا بوده و وقوع آسیب‌های کنترل نشده در این سازه‌ها در هنگام زلزله می‌تواند منجر به صرف هزینه‌های بسیار زیادی شود. لذا در این مطالعه به معرفی و بررسی کلی دستورالعمل ASCE61 جهت طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه به همراه تمرکز بر روش طراحی براساس عملکرد پرداخته شده است. همچنین به برخی از آخرین دست‌آوردهای پژوهشی در زمینه طراحی عملکردی اسکله‌های شمع و عرشه اشاره شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روند طراحی با استفاده از این دستورالعمل دارای انسجام بسیارمناسبی بوده ولی در رابطه با طراحی برخی از انواع اتصالات سرشمع باید اصلاحاتی در آن صورت بگیرد.

کلمات کلیدی: اسکله شمع و عرشه ، طراحی براساس عملکرد ، قابلیت اطمینان ، آسیب

۱- مقدمه

ازآنجایی‌که ساخت و نگهداری سازه‌های دریایی در مقایسه با اغلب سازه‌های خشکی بسیار پرهزینه‌تر است، فروپاشی و آسیب‌های کنترل نشده در این‌گونه از سازه‌ها در هنگام بارهای طرح منجر به خسارات اغلب جبران‌ناپذیر جانی و مالی خواهد شد. به همین دلیل است که اغلب در هنگام طراحی چنین سازه‌هایی از ضرایب اطمینان بزرگ‌تری استفاده می‌شود. همچنین طبیعت بارهای اعمالی در سازه‌های دریایی به مراتب پیچیده‌تر بوده، به‌طوری که مطالعات بسیاری در رابطه با تعیین مقادیر و نحوه اعمال

آن‌ها همچنان در حال انجام است[۱]. برای طراحی سازه‌های متعارف به روش‌های معمول (ضریب زلزله) و عملکردی، آئین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بسیاری در جهان منتشر شده است که از معتبرترین آن‌ها که در کشور ایران نیز بسیار رایج است می‌توان به دستورالعمل‌های بارگذاری (ASCE7[۲]) و ارزیابی لرزه‌ای و بهسازی ساختمان‌های موجود (ACSE41[۳]) اشاره نمود. ازآنجایی‌که آخرین ویرایش مقررات ملی ساختمان مباحث ۹ و ۱۰ [۴ و ۵] (که مرجع اصلی طراحی سازه‌های متعارف بتنی و فولادی در کشورمان هستند) بر طبق آئین‌نامه‌های کشور آمریکا و انجمن مهندسین عمران آمریکا تدوین شده‌اند، به نظر می‌رسد که جهت هماهنگی میان بخش‌های مختلف طراحی و انسجام میان آئین‌نامه‌های مورد کاربرد در کشورمان بهتر است که برای طراحی سازه‌های خاص مانند اسکله‌های شمع و عرشه نیز از دستورالعمل‌های منتشر شده توسط این مرجع استفاده نمود. تا به امروز در کشورمان جهت طراحی اسکله‌ها و بخصوص اسکله‌های شمع و عرشه، از آئین‌نامه OCDI [۶] کشور ژاپن نسخه سال ۲۰۰۲ میلادی و آئین‌نامه ۲۸۰۰ [۷] استفاده شده است و این در حالی است که عملکرد نامطلوب سازه‌های ساحلی در کشور ژاپن تحت زلزله‌های اخیر، باعث شد تا استفاده از آن در این کشور متوقف شده است و از نسخه سال ۲۰۰۹ میلادی آن [۸] استفاده شود. همچنین باید یادآور شد که طراحی اسکله‌ها در کشور ژاپن با استفاده از روش عملکردی به یک الزام تبدیل شده است. بسیاری از طراحان سازه‌های ساحلی در کشورمان بر این نظر هستند که ترجمه این آئین‌نامه در نسخه ۲۰۰۹ به زبان انگلیسی بسیار ضعیف و بسیاری از بندهای آن مبهم می‌باشد و جای خالی یک آئین‌نامه و یا استاندارد جدید و معتبر در زمینه طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه احساس می‌شود. همچنین جهت تعیین میزان بارهای وارد بر اسکله‌ها در کشورمان اغلب از دستورالعمل BS انگلستان [۹] و PIANC[1] [۱۰] به همراه اعمال قضاوت‌های مهندسی استفاده می‌شود، درحالی‌که جهت طراحی قسمت سازه‌ای از آئین‌نامه‌های ACI318 [۱۱] و AISC [۱۲] استفاده می‌گردد. در نتیجه با توجه به مطالب یاد شده در این قسمت، می‌توان مشاهده نمود که انسجام مناسبی در روند طراحی اسکله‌های شمع و عرشه (تعیین بارهای وارد، ترکیب بار و طراحی لرزه‌ای) در کشورمان وجود ندارد. لذا این مطالعه به معرفی و بررسی کلی دستورالعمل طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه که توسط انجمن مهندسین آمریکا[2] به چاپ رسیده (ASCE61[۱۳]) پرداخته شده است.

۲- تاریخچه

با توجه به هزینه‌های بسیار بالای ساخت‌وسازهای دریایی، نیاز به ارائه الزاماتی دقیق‌تر جهت رسیدن به طراح‌های با قابلیت اطمینان بیشتر در میان جامعه مهندسین آمریکا احساس شده است. در همین رابطه، برخی از بنادر ایالات غربی کشور آمریکا مانند بندر لس‌آنجلس[3] در سال ۲۰۰۴ میلادی و بندر لانگ بیچ[4] در سال ۲۰۰۷ میلادی شروع به انتشار الزاماتی جهت طرح لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه مخصوص به خود کردند[۱۴ و ۱۵]. معروف‌ترین و پرکاربردترین استاندارد منتشر شده جهت طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه توسط ایالت کالیفرنیا آمریکا در سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ میلادی تحت عنوان MOTEMS[5] [۱۶] بوده تا اینکه در همین راستا در سال ۲۰۰۵، کمیته

---

1 Permanent International Association of Navigation Congress
2 American Society of Civil Engineering
3 Port of Los Angeles, 2004
4 Port of Long Beach, 2007
5 Marine Oil Terminal Engineering and Maintenance Standards, 1999-2003

استانداردها و آئین‌نامه‌های انجمن مهندسین آمریکا[6] با همکاری موسسه سواحل-اقیانوس‌ها-بنادر و رودخانه‌ها[7] با تشکیل کمیته‌ای متشکل از مهندسین سازه و ژئوتکنیک، کارفرمایان و پژوهشگران شروع به تدوین دستورالعملی جهت طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه نمودند. در ادامه نیز با توجه به گستردگی پروژه، چندین کمیته فرعی جهت قسمت‌های مختلف استاندارد تشکیل شدند. به عنوان مثال کمیته کار[8] شماره ۷ به عنوان مسئول تدوین قسمت الزامات ژئوتکنیکی و مباحث اندرکنش خاک-سازه و کمیته کار شماره ۲ به عنوان مسئول تدوین قسمت سطوح عملکرد ایجاد گردیدند. همچنین در دهه اخیر تلاش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بازبینی ضوابط و معیارهای حاکم بر طرح لرزه‌ای سازه‌های بندری انجام گرفته است که تأکید اغلب آن‌ها عمدتاً بر کنترل رفتار و عملکرد این سازه‌ها در هنگام زلزله می‌باشد. این تلاش‌ها منجر به ارائه فلسفه جدیدی در طراحی لرزه‌ای به نام «طراحی لرزه‌ای براساس عملکرد» شد که به عنوان مثال می‌توان به دستورالعمل بین‌المللی طراحی لرزه‌ای PIANC [۱۷] اشاره نمود که روش طراحی براساس عملکرد اسکله‌ها را در سال ۲۰۰۱ ارائه نموده ولی به علت ابهامات اساسی موجود در آن، مورد توجه بسیاری از مهندسین قرار نگرفته است. از جمله این ابهامات می‌توان به چگونگی تعریف و انتخاب زمین‌لرزه، سطوح عملکردی، ارزیابی عملکردی و مدیریت عدم قطعیت‌های موجود اشاره نمود[۱۸]، ولی یکی از نقاط قوت دستورالعمل ASCE61 این است که جهت ارائه مطالب بیشتر و برطرف شدن ابهامات فنی به آئین‌نامه‌های ASCE7، ACI318 و AISC ارجاع داده است که از این جهت انسجام بسیار خوبی میان مطالب این دستورالعمل برقرار شده است و این موضوع را می‌توان یکی از مزیت‌های اصلی این دستورالعمل عنوان نمود. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک اسکله شمع و عرشه مشاهده می‌شود که شمع‌های فولادی با استفاده از تیرهای سرشمع بتنی به عرشه متصل شده‌اند.

شکل(۱) : نمونه‌ای از یک اسکله شمع و عرشه

۳- تحلیل و طراحی

۳-۱- رده طرح

اسکله‌هایی که با استفاده از این دستورالعمل طراحی می‌شوند، باید توسط طراح در یکی از رده‌های طرح آرام، متوسط و شدید قرار گرفته و به تأیید کارفرما برسد. اساس رده‌بندی طرح[9] در این بخش، اهمیت سازه از نظر اقتصاد منطقه‌ای و ارائه خدمات پس از حوادث بحرانی[10] می‌باشد، به‌طوری‌که به عنوان مثال اسکله‌های سینکرولیفت در رده طرح شدید و اسکله‌های تفریحی در رده طرح آرام تا متوسط جای خواهند گرفت.

6 ASCE's Codes and Standards Committee (CSC)
7 Coastal, Oceans, Ports and Rivers Institute (COPRI)
8 Task Committee 7 (TC7)

9 Design classification determination
10 Post-event recovery

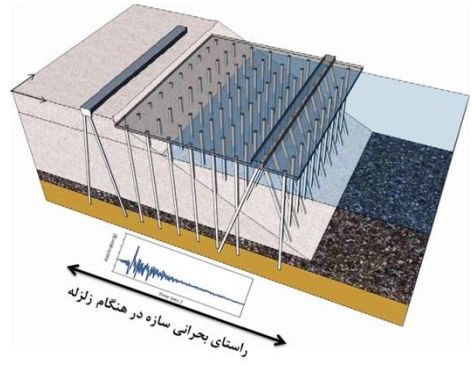
۳-۲- سطوح عملکرد

در این مرحله باید براساس رده طرح و سطح خطر[11] لرزه‌ای، سطوح عملکرد[12] متناظر را طبق جدول ۱ تعیین نمود. همانطور که مشاهده می‌شود، زلزله سطح حداکثر ممکن باید بر طبق دستورالعمل ASCE7 تعیین شده و تمام سازه‌ها در تمام رده‌ها باید در این سطح زلزله بتوانند سطح عملکرد امنیت جانی را ارضاء نمایند. بعلاوه، سطح زلزله طراحی برای رده‌های طرح متوسط و شدید متفاوت می‌باشد؛ به‌طوری‌که دوره بازگشت زلزله طراحی برای اسکله‌ای با رده طرح متوسط برابر با ۲۲۴ سال بوده ولی برای اسکله‌ای با رده طرح شدید برابر با ۴۷۵ سال می‌باشد. ولی هر دو باید در هنگام این سطح از زلزله، بتوانند سطح عملکرد خسارت کنترل شده را اقناع نمایند. همچنین فقط سازه‌هایی که در رده طرح شدید جای می‌گیرند باید بتوانند در هنگام زلزله بهره‌برداری، سطح عملکرد آسیب حداقل را اضاء نمایند. لذا در این بخش باید توجه نمود که جهت تعیین شتاب طرح سطوح مورد نظر خطر لرزه‌ای باید آنالیز جامع احتمالاتی خطر لرزه‌ای PSHA[13] انجام بشود و به عنوان مثال نباید از شتاب‌های مبنای طرح ارائه شده در آئین‌نامه ۲۸۰۰ استفاده نمود.

جدول ۱- سطوح خطر لرزه‌ای و عملکرد متناظر با رده طرح [۱۳]

رده طرح	سطح زلزله بهره‌برداری		سطح زلزله طراحی		سطح زلزله حداکثر ممکن	
	احتمال فراگذشت	سطح عملکرد	احتمال فراگذشت	سطح عملکرد	احتمال فراگذشت	سطح عملکرد
شدید	٪۵۰ در ۵۰ سال / دوره بازگشت ۷۲ سال	آسیب حداقل	٪۱۰ در ۵۰ سال / دوره بازگشت ۴۷۵ سال	آسیب کنترل شده و قابل تعمیر	۲۴۷۵ سال	سطح حفاظت جانی
متوسط	-	-	٪۲۰ در ۵۰ سال / دوره بازگشت ۲۲۴ سال	آسیب کنترل شده و قابل تعمیر	۲۴۷۵ سال	سطح حفاظت جانی
آرام	-	-	N/A	N/A	۲۴۷۵ سال	سطح حفاظت جانی

در شکل ۲ ساختار کلی یک اسکله شمع و عرشه نشان داده شده است. با توجه به تعداد دهانه‌های شمع گذاری در دو راستای اصلی و نیز راستای شمع‌های مایل می‌توان دریافت که جهت بحرانی سازه در هنگام زلزله، راستای عرضی آن می‌باشد.



شکل(۲) : ساختار سه بعدی یک اسکله شمع و عرشه شامل شمع‌های قائم، مایل و فونداسیون محور حرکت جرثقیل

11 Hazard level
12 Performance level
13 Probabilistic Seismic Hazard Analysis

۳-۳- روش تحلیل و طراحی

براساس ضوابطی که در زیر بیان شده است، هر دو روش نیرویی و عملکردی را می‌توان برای طراحی اسکله‌های شمع و عرشه به کار برد.

الف) استفاده از روش عملکردی برای تمام رده‌های طراحی قابل استفاده است.

ب) روش نیرویی تنها برای سازه‌هایی که در رده آرام طراحی قرار دارند، قابل استفاده است.

ج) روش طراحی نیرویی زمانی که Sds<0.33 باشد، قابل استفاده برای تمام سطوح طراحی خواهد بود. Sds در این بند، شتاب طیف پاسخ طراحی در پریودهای کوتاه‌مدت طبق دستورالعمل ASCE7 می‌باشد.

د) روش طراحی نیروئی برای طراحی سازه‌های نگه‌دارنده خطوط لوله و سایر تأسیسات روی اسکله قابل استفاده است.

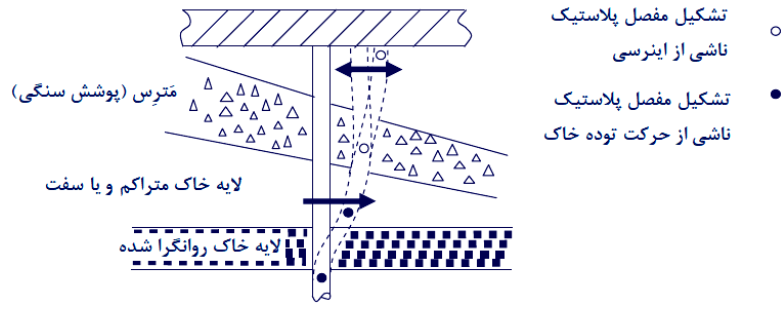
الزامات طراحی به روش‌های نیرویی و عملکردی به ترتیب در فصول ۵ و ۶ این دستورالعمل به تفسیر بیان شده است. باید توجه نمود که مطابق با این دستورالعمل، جهت طراحی اسکله‌ای که دارای شمع مایل[۱۴] باشد، طراح ناچار به استفاده از روش طراحی[۱۵] عملکردی خواهد بود تا بتواند از ارضاء سطوح عملکرد این‌گونه از شمع‌ها به دلیل رفتار پیچیده آن‌ها در هنگام زلزله اطمینان حاصل نماید.

۳-۴- مدل‌سازی اندرکنش شمع- خاک- سازه

بحث اندرکنش شمع-خاک-سازه در سال‌های اخیراً مورد توجه بسیاری از پژوهشگران سازه‌های دریایی واقع شده است. بسیاری به این نتیجه رسیده‌اند که اهمیت این بحث به دلیل تأثیر زیاد عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ژئوتکنیکی بوده و مدل‌سازی آن هم می‌تواند باعث تشدید و هم باعث تعدیل در تنش‌ها به وجود آمده در اعضای سازه بشود[۱۳]. لذا باید این وجه از مدل‌سازی حتماً مورد توجه طراح قرار بگیرد. از همین جهت، دستورالعمل ASCE61 برای به دست آوردن نیازهای لرزه‌ای، فنرهای غیرخطی p-y [۱۹] را جهت مدل‌سازی اندرکنش شمع-خاک-سازه پیشنهاد کرده است. همچنین جهت درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های یاد شده، باید هم کران بالا و هم پایین مقاومت این فنرها در آنالیز لرزه‌ای درنظر گرفته بشود. در روش طراحی نیرویی، زمانی استفاده از روش طول گیرداری مجاز است که هدف طراح تنها محاسبه تغییر شکل‌های سازه باشد؛ همچنین در روش طراحی عملکردی زمانی استفاده از روش طول گیرداری مجاز است که یک لایه سنگی سخت در اعماق بسیار کم وجود داشته و یا اثبات شود که تغییرشکل‌های خاک اطراف شمع‌ها نمی‌تواند بر پاسخ سازه تأثیری داشته باشد و در غیر این صورت باید از فنرهای غیرخطی p-y جهت مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه با شرایط یاد شده استفاده نمود. لازم به ذکر است که یکی از مهم‌ترین دلایلی که باعث شده این دستورالعمل به طور مفصلی به مسئله اندرکنش شمع-خاک-سازه بپردازد این است که طبق مشاهدات میدانی که توسط پژوهشگران انجام شده، ناپایداری شالوده این سازه‌ها در اثر وقوع روانگرایی یکی از دلایل اصلی فروپاشی و یا وقوع آسیب‌های شدید در هنگام زلزله می‌باشد[۲۰].

---

14 Batter Piles
15 Design method



شکل(۳) : تشکیل مفاصل پلاستیک در اثر اندرکنش‌های اینرسی و کینماتیک اسکله و شالوده در اثر وقوع زلزله

در واقع حداقل‌هایی که توسط طراح باید جهت کاهش عدم قطعیت‌های ژئوتکنیکی مورد بررسی قرار گیرد عبارتند از :

الف) روانگرایی[۱۶] در خاک

ب) زوال مقاومت خاک به دلیل بارگذاری چرخه‌ای زلزله[۱۷]

ج) پایداری و تغییرشکل‌های شیروانی‌ها[۱۸]

د) تأثیرات گسلش در بستر[۱۹]

ه) اثرات کینماتیک و اینرسی خاک[۲۰]

و) ظرفیت باربری شمع‌ها

ی) بار ناشی از تغییر شکل احجام خاکی در هنگام زلزله[۲۱]

لازم به ذکر است که دستورالعمل در قسمت پیوست، تفسیر موارد ذکر شده را ارائه کرده است.

۳-۵- الزامات مدل‌سازی عددی

مدل عددی سازه جهت انجام آنالیزهای لرزه‌ای در مقابل بار زلزله باید شامل تمام اجزای اصلی تأثیرگذار بر روی میزان ظرفیت سازه و رفتار آن در هنگام زلزله باشند. همچنین توزیع مقاومت و جرم در سازه باید به‌درستی انجام گیرد. به‌عنوان یک حداقل، مدل عددی سازه باید دارای سه قسمت عرشه، ناحیه اتصال سرشمع[۲۲] و شمع‌ها باشد. همچنین موارد زیر نیز باید به درستی درنظر گرفته بشوند:

الف) عدم قطعیت‌های موجود در مقاومت خاک اطراف شمع‌ها

ب) پیچش ناشی از فاصله میان مرکز جرم و مرکز سختی سازه

ج) جرم اعضای فرعی سازه مطابق با فصل ۸ دستورالعمل

یکی از مهم‌ترین نکاتی که این دستورالعمل به آن اشاره کرده است، "امنیت ظرفیتی" اعضای[۲۳] عرشه است، به این معنی که تمام اعضای تشکیل‌دهنده عرشه اسکله به‌غیراز ناحیه اتصال سرشمع، باید در زمان زلزله در منطقه رفتار خطی مصالح قرار داشته و ظرفیت این اعضاء به صورتی باشد که هیچ تغییر شکل ناکشسانی در آن‌ها در هنگام تحریکات زمین‌لرزه رخ ندهد. این امر به دلیل اهمیت تأسیسات قرار داده شده بر روی اسکله‌ها می‌باشد به‌طوری که اگر آسیبی در این تأسیسات رخ دهد، خسارات جانی و مالی زیادی به وجود خواهد آمد.

۳-۶- جزئیات اتصالات

---

16 Liquefaction
17 Soil cyclic degradation potential
18 Slope stability and lateral ground deformations
19 Ground surface rupture
20 Inertial and Kinematic loading
21 Seismic earth pressures

22 Pilecap connection
23 Capacity-protected

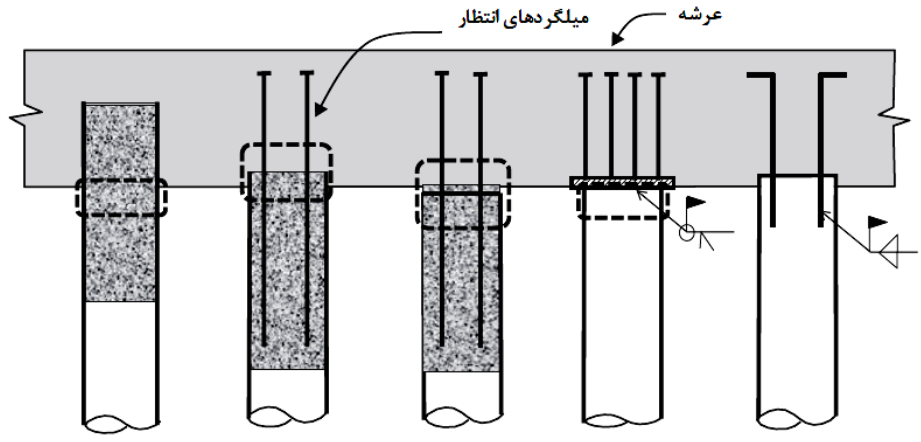
در سال‌های اخیر با توجه به مشاهدات میدانی پس از وقوع زمین‌لرزه‌ها در اسکله‌های شمع و عرشه، مشخص شده است که بیشترین آسیب کنترل نشده در ناحیه اتصال سرشمع‌ها رخ خواهد داد[۱۹]. سرشمع درواقع ناحیه‌ای است که در آن نیروها از طریق عرشه به شمع‌ها منتقل می‌شوند. لذا عملکرد مناسب آن در هنگام زلزله نقش بسیار مهمی در پایداری سازه و تأسیسات روی اسکله خواهد داشت. همچنین طراح در صورت نیاز باید جهت ارضاء معیارهای پذیرش از چندین نوع اتصال سرشمع در طراحی استفاده نماید. انواع اتصالات سرشمع مجاز از نظر دستورالعمل در شکل‌های زیر آورده شده است ولی بااین‌حال اگر رفتار مطلوب یک نوع اتصال سرشمع ویژه با استفاده از آزمایش و یا مدل‌سازی اجزاء محدود در محدود رفتارهای غیرخطی اثبات بگردد، این دستورالعمل استفاده از آن نوع اتصال را نیز مجاز می‌داند. از مسائل بسیار مهمی که این دستورالعمل در این بخش به آن‌ها توجه داشته است، می‌توان به مواردی همچون ترک‌خوردگی اتصال در هنگام زلزله، جدایش میان آرماتورها و بتن در هنگام زلزله، جزئیات صحیح اتصالات کاملاً گیردار و نیز نیمه گیردار، مقایسه عملکرد غیرخطی انواع اتصالات با یکدیگر، هندسه مقاطع بحرانی برش در پیرامون اتصال و نحوه درنظر گرفتن معیارهای پذیرش انواع اتصالات اشاره نمود که حاصل سال‌ها کار آزمایشگاهی پژوهشگران مختلف می‌باشد. یکی از نکات بسیار مثبت این بخش از دستورالعمل این است که از اعمال قضاوت‌های مهندسی نادرست در هنگام طراحی اتصالات به عنوان مهم‌ترین بخش سازه جلوگیری خواهد کرد. همچنین یکی دیگر از نکات مهم این بخش از دستورالعمل این است که، الزامات طراحی اتصالات سرشمع شمع‌های مایل را در یک بخش کاملاً مجزا عنوان کرده است.

الف) شمع‌های لوله‌ای فولادی

انواع اتصالات شمع‌های فولادی در شکل ۴ نشان داده شده است. از نکاتی که در طراحی لرزه‌ای اتصالات سرشمع شمع‌های فولادی در این دستورالعمل به آن‌ها اشاره شده است می‌توان به میزان گیرداری هر اتصال، مزایا و معایب عملکردی هر اتصال در هنگام زلزله و نکات مدل‌سازی در نرم‌افزار اشاره نمود. ولی با این‌حال انتظار می‌رود که در نسخه بعدی این دستورالعمل اصلاحاتی در رابطه با برخی از اتصالات شمع‌های فولادی درنظر گرفته بشود. به‌عنوان‌مثال، فالمر و همکاران[۲۴] [۲۱] در سال ۲۰۱۳ میلادی با انجام چندین آزمایش دریافتند که اتصالی که در آن از سخت‌کننده‌ها و جوش میان پوسته شمع و ورق پایه زیر عرشه استفاده بشود (شکل۴، دومین اتصال از سمت راست)، در هنگام بار زلزله به دلیل رخداد کمانش‌های موضعی عملکرد بسیار نامناسبی خواهد داشت و در مناطق با لرزه‌خیزی بالا نباید مورداستفاده قرار گیرد؛ ولی به هر حال این دستورالعمل استفاده از آن را محدود نکرده است. توجه شود که قسمت خط چین نشان داده شده در شکل ۴ و ۶، محدوده محل وقوع مفصل پلاستیک را نشان می‌دهد. نسبت قطر به ضخامت شمع‌های فولادی نیز می‌تواند شدیداً بر روی عملکرد آن‌ها در هنگام بار زلزله تأثیرگذار باشد که در رابطه با این مورد نیز در دستورالعمل الزامی آورده نشده است و بهتر است طراح به این نکته توجه نماید[۲۳].

---

24 Fulmer et al. 2013



شکل (۴)- جزئیات کلی اتصالات شمع‌های فولادی به عرشه[۱۳]

دستورالعمل در رابطه با شمع‌های فولادی، اتصال ویژه‌ای به نام پوسته مستقل[۲۵] را معرفی کرده است که دارای ظرفیت تغییرشکلی غیرکشسان بسیار مناسبی می‌باشد و پیشنهاد می‌شود جهت اطلاعات بیشتر در این رابطه به مطالعه انجام شده توسط مانتجو و همکاران[۲۶] [۲۴] مراجعه شود.

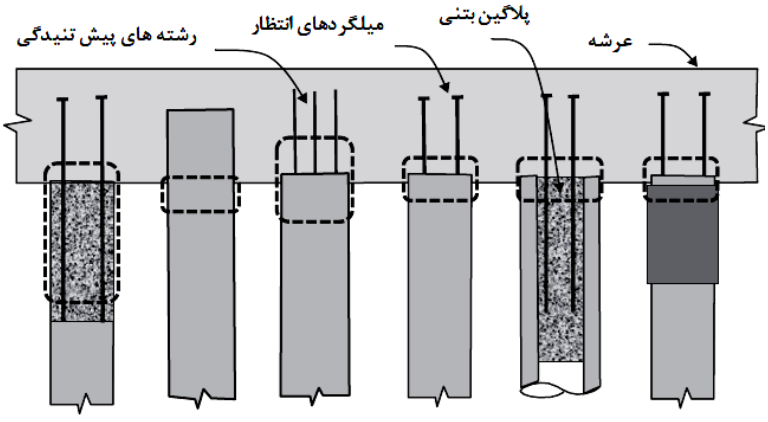
شکل(۵) :تخریب کامل اتصالات سرشمع در اسکله شمع و عرشه (شمع‌های فولادی) در اثر زلزله [۲۲]

ب) شمع‌های بتنی پیش‌تنیده

به دلیل اینکه در ایالت کالیفرنیا[۲۷] کشور آمریکا اغلب از شمع‌های بتنی پیش‌تنیده جهت شالوده اسکله‌ها استفاده می‌شود و تمرکز بسیاری از پژوهش‌های آزمایشگاهی بر روی برآورد رفتار اتصالات سرشمع این‌گونه از شمع‌ها بوده، لذا دستورالعمل در این بخش، بیشتر به جزئیات اتصالات شمع‌های پیش‌تنیده پرداخته است. انواع اتصالات شمع‌های بتنی پیش‌تنیده به عرشه در شکل ۶ آورده شده است.

---

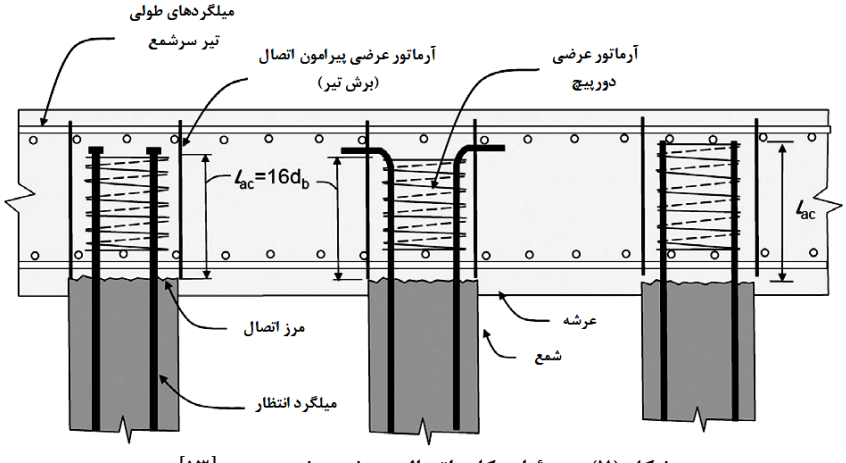
25 Isolated shell
26 Montejo et al. 2012
27 California State



شکل (۶)- جزئیات کلی اتصال شمع‌های پیش‌تنیده به عرشه [۱۳]

ج) شمع‌های بتنی

در این دستورالعمل همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، آرماتور عرضی دورپیچ[۲۸] به عنوان تنها گزینه جهت مهار آرماتورهای طولی شمع‌های بتنی ارائه شده است؛ که از دلایل این أمر می‌توان به مهار بسیار خوب آرماتورهای طولی، محصورشدگی بسیار مناسب بتن هسته و اتلاف بیشتر انرژی زلزله نسبت به آرماتور عرضی تنگ بسته[۲۹] اشاره نمود[۲۷].



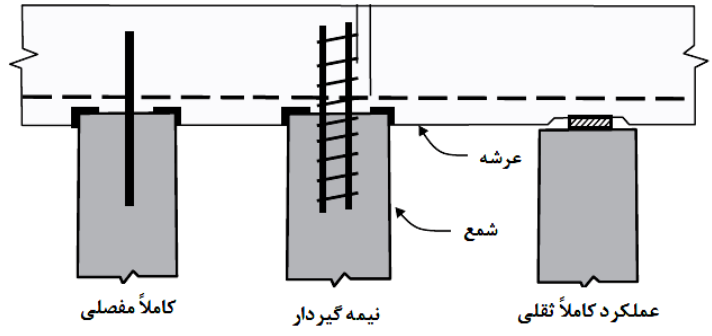
شکل (۷)- جزئیات کلی اتصال سرشمع شمع بتنی [۱۳]

شکل(۸) : تخریب کامل (سمت راست) و تخریب قابل تعمیر (سمت چپ) اتصال سرشمع (شمع‌های بتنی) در اثر وقوع زلزله[۲۲]

---

28 Spiral transverse reinforcement
29 Tied transverse reinforcement

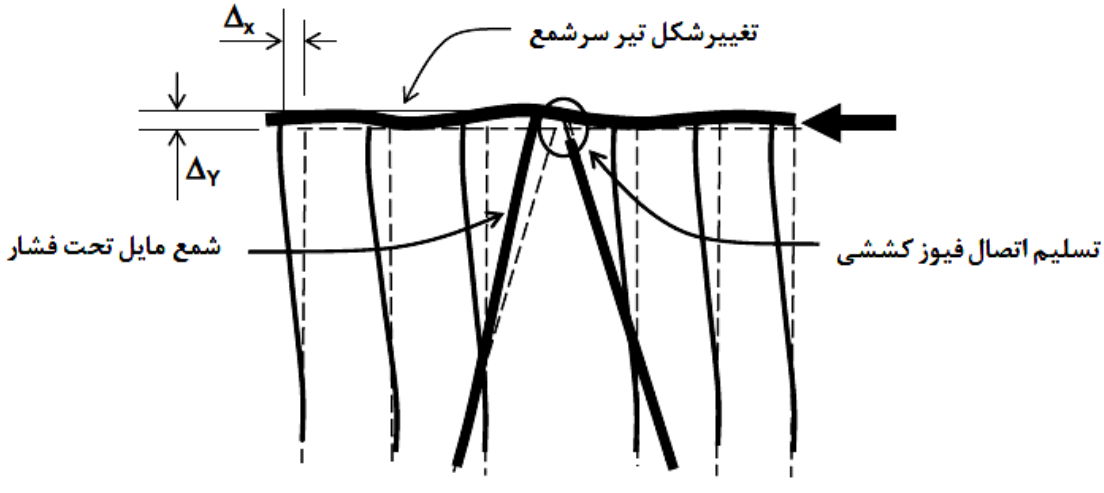
در برخی از موارد ممکن است تنها عملکرد مطلوب و موردنیاز طراحی از شمع، عملکرد ثقلی و یا نیمه‌گیردار از آن باشد که در این حالت می‌توان از اتصالات مفصلی[30] سرشمع بهره برد. در شکل ۹ ، انواع اتصال مفصلی مجاز طبق دستورالعمل آورده شده است.



شکل (۹)- انواع اتصالات غیر گیردار سرشمع [۱۳]

ج) شمع‌های مایل

می‌توان گفت که بررسی رفتار شمع‌های مایل در اسکله‌های شمع و عرشه یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی این سازه‌ها می‌باشد. جهت محدود کردن تغییر شکل‌های جانبی اسکله‌ها تحت اثر بارهای زلزله و نیز پهلوگیری شناورها، طراحان اغلب از این نوع شمع بهره می‌گیرند که این أمر در کل باعث اقتصادی شدن طرح نیز خواهد شد. ولی با توجه به اینکه مشاهدات میدانی حاکی از عملکرد ضعیف این شمع‌ها در هنگام زلزله بوده، این مسئله باعث شده تا این دستورالعمل استفاده از روش طراحی براساس عملکرد را جهت طراحی این شمع‌ها ملزم نماید و استفاده از اتصال نوع فیوز کششی[31] به عنوان بهترین راه جهت کنترل رفتار لرزه‌ای این شمع‌ها الزام کند.



شکل (۱۰)- عملکرد اتصال فیوز کششی در شمع مایل هنگام وقوع زلزله [۱۳]

---

30 Pinned-connection
31 Yielding of tension connection

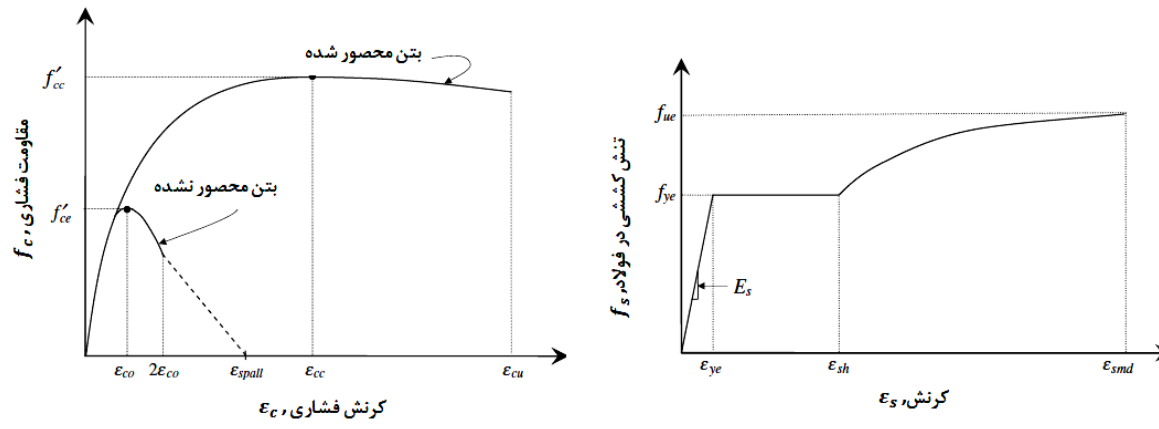
شکل(۱۱) : استفاده از اتصال فیوز کششی در شمع‌های مایل (پیش‌تنیده بتنی)[۲۵]

۳-۷- ظرفیت و نیازهای لرزه‌ای سازه

با توجه به اینکه تمرکز اصلی این مطالعه بر روی روش طراحی براساس عملکرد می‌باشد، مراحل محاسبه نیازها و ظرفیت‌های سازه‌ای تنها مطابق با این روش طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای رفتار مصالح بتنی محصور شده و محصور نشده و همچنین رفتار کششی فولاد در این دستورالعمل مطابق با شکل‌های زیر ارائه شده است. نکته قابل‌توجه در اینجا این است که رفتار فشاری آرماتورهای فشاری، رفتار فشاری پوسته شمع‌های فولادی و نیز رفتار مقاطع بتنی پیش‌تنیده در این دستورالعمل ارائه نشده و طراح باید به این مسئله در هنگام استفاده از اجزاء الیافی[۳۲] در نرم‌افزار توجه داشته باشد. جهت طراحی عملکردی اسکله‌های شمع و عرشه، این دستورالعمل استفاده از دو روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون[۳۳]) دو بعدی و نیز دینامیکی تاریخچه زمانی[۳۴] را مناسب دانسته. طراح براساس قضاوت خود می‌تواند از روش بار افزون سه بعدی نیز استفاده نماید ولی باید اثر صد - سی را در محاسبه نیازهای لرزه‌ای سازه در نظر بگیرد که مسئله‌ای چالش‌برانگیز در آنالیز بار افزون بوده و طراح باید در این زمینه اطلاعات کافی از نحوه انجام این آنالیز داشته باشد؛ همچنین باید در هنگام استفاده از روش استاتیکی غیرخطی، به فاصله میان مرکز جرم و سختی سازه توجه داشته و در صورت نیاز جهت در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر سازه، علاوه بر انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی از روش ترکیب مربع کامل[۳۵] جهت ترکیب مودها (آنالیز دینامیکی طیفی) استفاده نماید. در اینجا باید ذکر شود که تنها آنالیزی که میزان جابجایی واقعی سازه در هنگام زلزله را می‌تواند محاسبه نماید، آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، این دستورالعمل جهت مدل‌سازی رفتار بتن محصور شده و محصور نشده، مدل مندر [۲۶] را پیشنهاد کرده است.

---

32 Fiber element
33 Push-over analysis
34 Nonlinear time history analysis
35 Complete quadratic combination (CQC)



شکل (۱۲)- نمودار تنش-کرنش فولاد در کشش (سمت راست)-رفتار فشاری بتنی محصورشده و بتن محصورنشده (سمت چپ) [۱۳]

این دستورالعمل جهت محاسبه معیارهای پذیرش طراحی در هر سطح از زلزله (حداکثر کرنش در مصالح) و براساس نوع مقطع شمع، حدود کرنش‌های بتن (شمع بتنی - هسته اتصالات سرشمع) و حدود کرنش‌های فولاد (شمع‌های فولادی- آرماتورها – تاندون‌های شمع‌های پیش‌تنیده بتنی) را جهت تعیین معیارهای پذیرش ارائه کرده است. در نهایت نیز الزاماتی جهت طراحی لرزه‌ای اعضای فرعی[۳۶] اسکله‌ها ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روند کلی طراحی اسکله‌های شمع و عرشه با استفاده از دستورالعمل ASCE 61 ارائه گردید. بعد از بررسی الزامات ارائه شده در این دستورالعمل جهت محاسبه پارامترهای مختلف تحلیل و طراحی این سازه‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که از مزایای اصلی این دستورالعمل می‌توان به شرح کامل روش طراحی براساس عملکرد جهت طراحی دقیق‌تر و با قابلیت اطمینان بیشتر اسکله‌های شمع و عرشه اشاره نمود، این در حالی است که روش طراحی نیرویی را نیز در مواردی مجاز دانسته. همچنین از مزایای دیگر آن برطرف نمودن ابهامات موجود در هر بخش طراحی با استفاده از ارجاع به آئین‌نامه‌های بارگذاری، طراحی سازه‌های بتنی و فولادی کشور آمریکا می‌باشد. طراحی شمع‌های مایل، مسائل ژئوتکنیکی و طراحی ناحیه اتصال سرشمع نیز در این دستورالعمل بسیار مورد توجه قرار گرفته تا از قضاوت‌های مهندسی نادرست در هنگام طراحی جلوگیری به عمل آید.

۵- مراجع

[1] Thoresen, C. A. (2019). "Port Designers Handbook", 4th Ed., ICE Publishing, London.

[2] ASCE. (2016). "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE/SEI 7-16, Reston, VA.

[3] ASCE/SEI 41-17, 2017. Seismic rehabilitation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

[۴] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه، ویرایش چهارم ۱۳۹۲، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، دفتر مقررات ملی

36 Ancillary components

[۵] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، ویرایش چهارم ۱۳۹۲، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، دفتر مقررات ملی ساختمان

[6] OCDI. (2002), "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan", The Overseas Coastal Development Institute of Japan.

[۷] آئین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندار ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

[8] OCADI. (2009). "Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan." Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Tokyo.

[9] BSI (British Standards Institute). (2010). "British standard: Maritime works: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins." BS-6349-2 2010, London.

[10] PIANC. (2012a). "Criteria for the (un)loading of container vessels." MarCom, Rep. No. 115, Brussels, Belgium.

[11] ACI (American Concrete Institute). (2014a). "Building code requirements for structural concrete." ACI 318-14, Farmington Hills, MI.

[12] AISC (American Institute of Steel Construction). (2016). "Specification for structural steel buildings." ANSI/AISC 360-16, Chicago.

[13] ASCE. (2014). "Seismic design of piers and wharves." ASCE/COPRI 61-14, Reston, VA.

[14] POLA (Port of Los Angeles). (2010). "The Port of Los Angeles code for seismic design, upgrade and repair of container wharves", City of LA Harbor Dept., Los Angeles.

[15] POLB (Port of Long Beach). (2012). "The Port of Long Beach wharf design criteria", Long Beach, CA.

[16] MOTEMS. (2011). "Marine oil terminals engineering and maintenance standards." California Building Code 2010, Long Beach, CA.

[17] PIANC. (2001). "Seismic design guidelines for port structures." Rep. WG 34, MarCom, International Navigation Association, Brussels, Belgium.

[۱۸] امیرآبادی، ر ، برگی، خ. و دولتشاهی، م.، ۱۳۸۸، "کاربرد مفهوم طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد برای سازه‌های بندری"، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیر ساختها، تهران، دانشگاه تهران

[19] API. (2014). "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", Working stress design." 22nd Ed. RP-2A-WSD, Washington, DC.

[20] Shafieezadeh, A., DesRoches, R., Rix, G. J., & Werner, S. D. (2012). Seismic performance of pile-supported wharf structures considering soil-structure interaction in liquefied soil. Earthquake Spectra, 28(2), 729-757.

[21] Fulmer S.J., Kowalsky M.J, and Nau J.M, (2013) "Seismic Performance of Steel Pipe Pile to Cap Beam Moment Resisting Connections". North Carolina State University Raliegh, North Carolina. Prepared for Alaska Department of Transportation.

[22] Eberhard, M. O., Baldridge, S., Marshall, J., Mooney, W., & Rix, G. J. (2010). The Mw 7.0 Haiti earthquake of January 12, 2010: USGS/EERI advance reconnaissance team report: Open-File Report 2010-1048. US Department of the Interior.

[23] Brown, N.K, Kowalsky, M.J., Nau J.M., (2004), "Strain Limits for Concrete Filled Steel Tubes in AASHTO Seismic Provisions", North Carolina State University Raleigh, North Carolina, Prepared for Alaska Department of Transportation.

[24] Montejo, L.A., Gonzalez-Roman, L.A., Kowalsky, M.J., (2013), "Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete-Filled Steel Tube Pile/Column Bridge Bents", Department of Engineering Science and Materials, University of Puerto Rico.

[25] Harn, R. E. (2004, August). "Displacement design of marine structures on batter piles". In 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada (No. 543).

[26] Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R., (1998). Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering, 114(8), pp.1804-1826.

[27] Moehle, J. (2014). "Seismic design of reinforced concrete buildings". McGraw Hill Professional.