



## ارزیابی اثر رده مقاومتی سیمان های ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال بر مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان

حمید اسکندری نداف<sup>۱\*</sup>، سید علی حسینی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

## خلاصه

ملات سیمان یکی از مهمترین مصالح پایه سیمانی است و خصوصیات مکانیکی آن نقش مهمی در استحکام سازه ها دارد. تأثیر پارامترهای مختلف طرح اختلاط ملات سیمان بر مقاومت فشاری و خمشی آن از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. این تحقیق به بررسی تأثیر همزمان رده مقاومت سیمان و نسبت آب به سیمان (W/C) بر نمونه های ملات حاوی سیمان با رده مقاومتی ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال می پردازد. برای این منظور، یک برنامه آزمایشگاهی با ۶ طرح اختلاط مختلف شامل ۱۸ نمونه منشوری با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی متر مکعب و ۳۶ نمونه مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی متر مکعبی به منظور آزمایش خمشی و فشاری انجام گرفته است. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی و فشاری نمونه ها با افزایش سن نمونه ها افزایش یافته و تحت تأثیر رده مقاومتی سیمان و W/C است. طرح مطلوب از نظر خواص مقاومتی با نسبت ماسه سیمان (S/C) برابر ۲/۷۵، نسبت آب به سیمان (W/C) برابر ۰/۳ و سیمان با رده مقاومتی (CSC) ۵۲/۵ مگاپاسکال است.

**کلمات کلیدی:** رده مقاومتی سیمان، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، ملات سیمان، نسبت آب به سیمان

## ۱. مقدمه

ارزیابی سازه های بتنی از جنبه های مختلف آزمایشگاهی، بهینه سازی و مدل سازی توجه محققان را به خود جلب کرده است [۱]. ملات سیمان وظیفه توزیع تنش یکنواخت و تغییر شکل حرارتی را بر عهده دارد و نقش مهمی در خصوصیات مقاومت سازه دارد. از این رو ملات سیمان ماده کامپوزیت ناهمگنی است که در ساخت و ساز مورد استفاده قرار می گیرد [۲-۴]. متغیرهای مهم موثر بر رفتار ملات تازه و سخت شده شامل نسبت آب به سیمان (W/C) و رده مقاومت سیمان است. در این بررسی نقش W/C و نوع سیمان در خواص مختلف مواد سیمانی مانند بتن و ملات سیمانی به طور گسترده مشاهده می شود [۵-۷]. به عنوان مثال، تأثیر تغییرات آب و دما در تغییر شکل خمیرهای سیمانی و بتنی [۸]، میزان سیمان و نسبت W/C بر فرآیند هیدراتاسیون اولیه [۹] و نوع سیمان و افزودنی ها بر خواص مواد سیمانی [۱۰]، [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی دیگری، Body و Mindess [۱۲] یک مطالعه تجربی در مورد تأثیر دو نسبت آب به سیمان (۰/۴۵ و ۰/۶۵) و دو نوع سیمان (معمولی و مقاوم در برابر سولفات) بر استحکام و مقاومت در برابر سولفات بتن در سنین مختلف انجام شده است. نتایج نشان داد که W/C تأثیر بیشتری در مقاومت در برابر حمله سولفات نسبت به نوع سیمان دارد و آزمایش مقاومت فشاری نسبت به آزمایش مقاومت کششی در تشخیص خسارات داخلی به خصوص در سنین پایین حساس تر است.

\* Corresponding author: Hamid Eskandari-Naddaf  
Email: h.eskandari@hsu.ac.ir



همچنین، Kim et al. [۱۳] دریافتند که افزایش W/C از ۰/۴۵ به ۰/۶ باعث افزایش تخلخل ملات سیمان به میزان ۱۵۰٪ و مقاومت فشاری آن ۷۵/۶٪ کاهش می‌یابد. به طور معمول، نسبت آب به سیمان مهمترین پارامتر طرح اختلاط برای ملات سیمانی است. مطالعات انجام شده در مورد بتن نشان داده‌اند که مقاومت فشاری رابطه عکسی با W/C دارد. مطالعات اندکی در مورد تأثیر عوامل طرح اختلاط مانند W/C و S/C بر روی خصوصیات ملات سیمان صورت گرفته‌است. یکی از مطالعات انجام شده بر تأثیر مواد متفاوت و طرح‌های اختلاط بر خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتنی گزارش شده است که قانون آبرام در مورد طرح اختلاط‌های ملات سیمان با نسبت W/C بالاتر از ۰/۴ است [۱۴]. محققان همچنین قانونی مشابه قانون آبرام را از تأثیر نسبت W/C بر مقاومت فشاری ملات سیمان مطرح کرده‌اند. مشخص شد که با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری در این قانون می‌توان از این قانون برای ملات سیمان استفاده کرد [۱۵]. تحقیقات نشان داده‌اند که سنگدانه‌ها تأثیر بارزی در رئولوژی و خصوصیات مکانیکی ملات سیمانی دارند [۱۶]. بنابراین تأثیر دانه بندی و نوع شن و ماسه بر خواص ملات سیمان مورد بررسی بسیاری از مطالعات بوده‌است [۱۷، ۱۸]. Shutter و Poppe [۱۹] نشان داده‌اند که نوع شن و ماسه تأثیر چشم‌گیری در خاصیت ملات سیمانی دارد، زیرا پارامترهای هندسی مبتنی بر دانه بندی سنگدانه مانند مدول نرمی با تقاضای آب سنگدانه و تراکم ملات همراه است. مطالعه انجام شده توسط Lourenço و HaachVasconcelos [۲۰] در مورد تأثیر سنگدانه و نسبت آب به سیمان W/C بر کارایی و مقاومت فشاری ملات سیمان، نشان می‌دهد که افزایش نسبت آب به سیمان W/C خواص مکانیکی را تضعیف کرده و کارایی ملات سیمان را بهبود می‌بخشد. Gupta و Reddy [۲۱] در آزمایشی تأثیر دانه بندی ماسه را بر مقاومت کششی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مقاومت کششی با تغییر مدول نرمی ماسه از ۳/۲۱ به ۱/۷۲ کاهش می‌یابد. آنها همچنین گزارش داده‌اند که برای دستیابی به یک ثبات در نمونه‌ها با ماسه ریز، ۲۵ تا ۳۰ درصد آب بیشتری به طرح اختلاط اضافه شده‌است. در مورد اثرات ترکیبی رده مقاومت سیمان و نسبت W/C و اثر متقابل آنها بر روی خصوصیات مکانیکی ملات سیمان، مطالعات اندکی صورت گرفته‌است. در یکی از این بررسی‌ها توسط Kazemi و Eskandari-Naddaf [۲۲] اثر رده‌های مختلف سیمان با روش شبکه عصبی بررسی شده‌است. نتایج نشان داد که نوع سیمان یکی از مهمترین پارامترها در پیش‌بینی مقاومت فشاری ملات سیمان است.

هدف از این تحقیق بررسی اثر دو نوع سیمان با رده‌های مقاومتی ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال به منظور دستیابی به خواص مکانیکی مناسب در ملات سیمان است. برای دستیابی به این هدف، تأثیر همزمان فاکتورهای طرح اختلاط مانند نوع رده مقاومتی سیمان و W/C از طریق یک برنامه آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته‌است. طرح اختلاط‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی منشوری ساخته شده با ۶ طرح اختلاط ملات سیمانی متشکل از سه مدل مختلف W/C و دو نوع مختلف سیمان با رده مقاومت (۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال) انجام شده‌است. آزمون مقاومت خمشی و فشاری برای تعیین اثر ترکیبی از فاکتورها انجام شده و طرح‌های ترکیبی با بهترین خواص مکانیکی تعیین شده‌است.

## ۲. مطالعه آزمایشگاهی

در این مطالعه با استفاده از دو نوع سیمان پرتلند (محصول کارخانه سیمان بجنورد) با رده مقاومتی ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال انجام شد. اطلاعات مربوط به ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان‌های پرتلند مورد استفاده در جدول شماره ۱ ارائه شده‌است. مصالح ریز دانه با حداکثر قطر ۴/۷۵ میلی‌متر، تراکم ۲/۶ کیلوگرم در سانتی‌متر مکعب، مدول نرمی ۲/۴۸ تهیه شده‌است. دانه بندی آن مطابق استاندارد ASTM C33 [۲۳] می‌باشد. بعلاوه فوق‌روان‌کننده پایه پلی‌کربکسیلیک به منظور بالا بردن کارایی و افزایش مقاومت نهایی ملات سیمان استفاده شده‌است [۲۵].



جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان‌های مصرفی

ردده مقاومتی سیمان (MPa)	آنالیز شیمیایی (%)											آنالیز فیزیکی		
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	F.CaO	C <sub>3</sub> A	C <sub>3</sub> S	وزن مخصوص (ton/m <sup>3</sup> )	پاکمانده روی الکی (% ۹۰)
۳۲/۵	۲۰/۴	۴/۵	۳/۶	۶۴/۱۲	۱/۹۳	۲/۳	۰/۳۲	۰/۷	۲/۲	۱/۳	۶۳/۹۶	۳/۱۳	۰/۹	۳۰۰۰
۵۲/۵	۲۱	۴/۷	۳/۵۲	۶۴/۱۸	۱/۹۳	۲/۵۳	۰/۳۲	۰/۵۵	۱/۲	۱/۲	۵۷/۸۵	۳/۱۵	۰/۱	۳۶۰۰

بررسی اثر رده‌های مقاومتی سیمان و نسبت آب به سیمان و تاثیر توام این پارامترها بر طرح اختلاط ملات سیمان در ۶ طرح اختلاط ملات سیمان در نظر گرفته شده‌است. طرح اختلاط‌ها شامل دو نوع سیمان با رده‌های مقاومتی مختلف ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال به همراه نسبت ماسه به سیمان ۲/۷۵ و سه نسبت آب به سیمان ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ می‌باشند. مقدار فوق روان‌کننده مصرفی با استفاده از میز سیلان و جریان  $5 \pm 110$  با ۲۵ ضربه مشخص شده‌است [۲۶]. مقادیر طرح اختلاط هر طرح بصورت مجزا در جدول ۲ قرار گرفته شده‌است.

جدول ۲ نسبت‌های طرح اختلاط برای ملات سیمان

شماره طرح اختلاط	رده مقاومتی سیمان (مگاپاسکال)	سیمان (کیلوگرم)	سیمان/آب	سیمان/ماسه	فوق روان‌کننده (میلی‌لیتر)
۱	۳۲/۵	۲/۶۷	۰/۲۵	۲/۷۵	۹۰
۲	۵۲/۵	۲/۶۷	۰/۲۵	۲/۷۵	۹۰
۳	۳۲/۵	۲/۶۷	۰/۳۵	۲/۷۵	۲۲
۴	۵۲/۵	۲/۶۷	۰/۳۵	۲/۷۵	۱۷
۵	۳۲/۵	۲/۶۷	۰/۴۵	۲/۷۵	۳
۶	۵۲/۵	۲/۶۷	۰/۴۵	۲/۷۵	۳

نمونه‌های منشوری با ابعاد  $40 \times 40 \times 160$  و مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی‌متری جهت آزمایش مقاومت خمشی و فشاری مطابق استاندارد ASTM C348 و ASTM C349 ساخته شده‌است. برای ساخت ملات سیمان، مطابق آیین‌نامه ASTM C305 [۲۷] ابتدا با اضافه کردن سیمان به آب، مخلوط‌کن به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت آهسته (۱۴۰ دور در دقیقه) مخلوط کرده سپس در مدت زمان ۳۰ ثانیه سنگدانه‌ها را اضافه کرده با تغییر سرعت مخلوط‌کن به متوسط (۲۸۰ دور در دقیقه) مخلوط-کن به مدت ۳۰ ثانیه مواد را ترکیب کرده در پایان به مدت ۶۰ ثانیه مواد با سرعت متوسط در مخلوط‌کن ترکیب شده است. ملات سیمان بدست آمده بعد از یکنواخت شدن در مخلوط‌کن در قالب‌ها ریخته شده تا سطح نمونه‌ها برای کاهش خطا در توزیع نیرو در زمان بارگذاری کاملاً صاف و هموار شود. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شده‌اند و بعد خارج کردن آنها از قالب در مخزن آب در دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد تا زمان آزمایش قرار گرفته‌است.

تغییرات وزن سه نمونه از هر طرح اختلاط با استفاده از قانون ارشمیدوس برای آزمون تخلخل اندازه‌گیری شده‌است. در ابتدا نمونه‌ها در دستگاه خشک‌کن در دمای  $105 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد برای رسیدن به وزن ثابت خشک شده‌اند ( $W_d$ ). پس از آن، وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک ( $W_{ssd}$ ) و زیر آب در حالت اشباع ( $W_w$ ) محاسبه شده‌است.

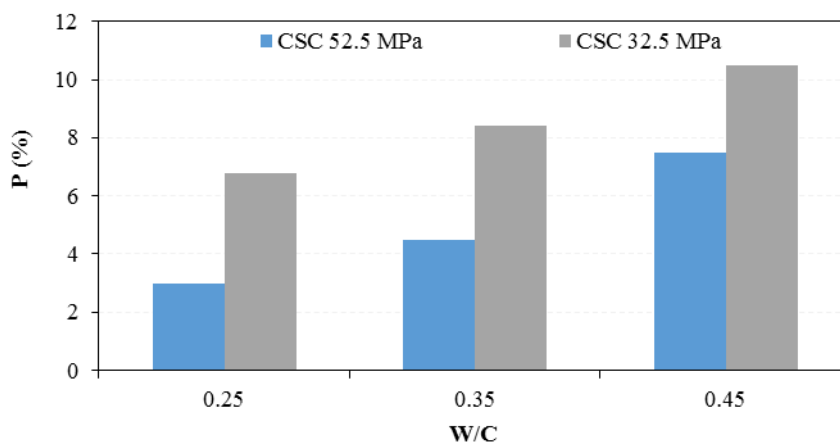


تفاوت وزن بین شرایط خشک و اشباع برای محاسبه تخلخل برای یک درصد از حجم نمونه استفاده شده است. تخلخل (P) با استفاده از رابطه زیر تعیین شده است:

$$P = \frac{(W_{ssd} - W_d)}{(W_{ssd} - W_w)} \times 100\% \quad (1)$$

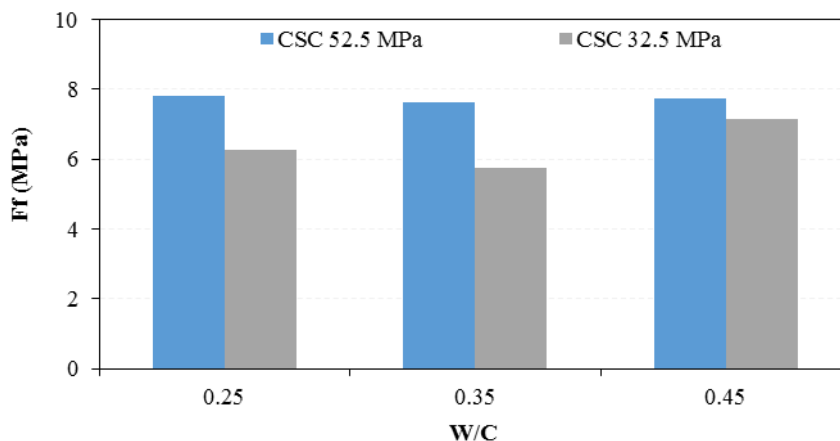
### ۳. بحث و بررسی نتایج

شکل ۱ اثر رده مقاومتی سیمان های ۳۲/۵ و ۵۲/۵ را بر تخلخل ملات سیمان در سن ۲۸ روزه و برای نسبت های آب به سیمان ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تخلخل نمونه ها در سن ۲۸ روزه با افزایش رده مقاومتی سیمان کاهش چشم گیری داشته است. به عنوان مثال برای نمونه ۲۸ روزه با سیمان ۳۲/۵ نسبت آب به سیمان ۰/۲۵، ۷ درصد می‌باشد که با افزایش رده مقاومتی به ۵۲/۵ به ۳ درصد کاهش پیدا کرده است. بعلاوه با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش تخلخل را مشاهده می‌کنیم بطور مثال برای نمونه ۲۸ روزه با سیمان ۵۲/۵ و نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ تخلخل ۳ درصدی را مشاهده می‌کنیم که این عدد با افزایش نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ رشد چشم گیری داشته و به ۷ درصد می‌رسد. در نتیجه همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۵ به ۰/۲۵ کاهش حدود ۵۷ درصدی در میزان تخلخل نمونه های ساخته شده با سیمان ۳۲/۵ شاهد بوده‌ایم که این کاهش برای سیمان ۵۲/۵ برابر حدود ۶۲ درصد بوده است.



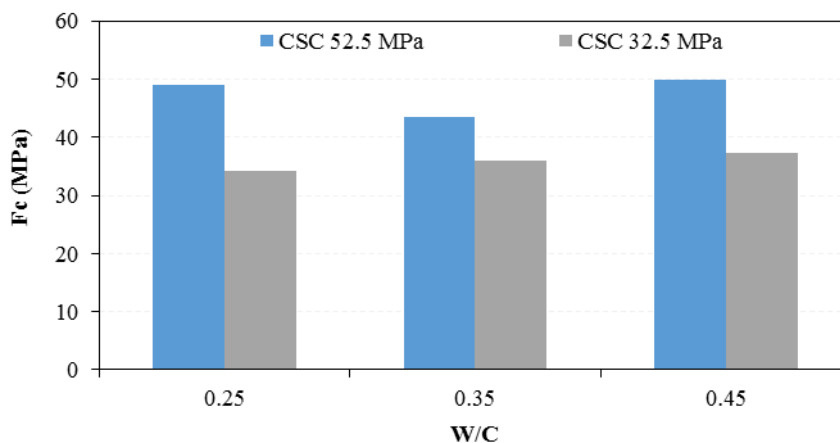
شکل ۱ اثر رده مقاومتی سیمان ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال بر تخلخل ملات سیمان با نسبت های مختلف آب به سیمان.

شکل ۲ تاثیر رده مقاومتی سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت خمشی ملات سیمانی را نشان می‌دهد. در ملات سیمان دارای سیمان ۵۲/۵، نسبت آب به سیمان بر مقاومت خمشی تاثیر ناچیزی را نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش ها، مقاومت خمشی این نمونه های ملات سیمانی ۸ مگاپاسکال می‌باشد. برای ملات سیمانی با رده مقاومتی ۳۲/۵، ملات دارای آب به سیمان ۰/۳۵ کمترین مقاومت خمشی را دارا می‌باشد.



شکل ۲ اثر رده مقاومتی سیمان ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال بر مقاومت خمشی ملات سیمان با نسبت های مختلف آب به سیمان.

شکل ۳ تاثیر رده مقاومتی سیمان ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال را بر مقاومت فشاری ملات سیمان با نسبت های آب به سیمان مختلف نشان می‌دهد. با افزایش رده مقاومتی سیمان، مقاومت فشاری ملات سیمان افزایش می‌یابد. به عنوان مثال مقاومت فشاری در نمونه ۲۸ روزه ساخته شده با سیمان ۳۲/۵ با افزایش مقدار آب به سیمان، مقدار مقاومت فشاری ملات سیمان افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۲۵ به ۰/۳۵ مقاومت فشاری در نمونه ساخته شده با سیمان ۳۲/۵، حدود ۶ درصد افزایش یافته و در نمونه ساخته شده با سیمان ۵۲/۵ این نسبت حدود ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. در حالیکه با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۴۵ مقاومت فشاری افزایش ۵ درصدی برای نمونه ساخته شده با سیمان ۳۲/۵ و افزایش ۱۶ درصدی برای نمونه ساخته شده با سیمان ۵۲/۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۳ اثر رده مقاومتی سیمان ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال بر مقاومت فشاری ملات سیمان با نسبت های مختلف آب به سیمان.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رابطه اثر رده مقاومتی سیمان های ۳۲/۵ و ۵۲/۵ مگاپاسکال بر مقاومت خمشی و فشاری ملات سیمان پرداخته شده است. در این راستا نمونه های منشوری با ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ و مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی متر جهت آزمایش مقاومت خمشی و فشاری مطابق استاندارد ASTM C348 و ASTM C349 ساخته شده است و تاثیر تورم رده های



مقاومتی سیمان و نسبت آب به سیمان بر طرح اختلاط ملات سیمان در ۶ طرح اختلاط ملات سیمان مورد آزمایش قرار گرفته‌است. نتایج نشان داد که با افزایش رده مقاومتی سیمان تخلخل نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده‌است. همچنین نسبت آب به سیمان در میزان تخلخل موثر است و افزایش آب به سیمان باعث افزایش تخلخل می‌شود. همچنین مشاهده شده‌است که با افزایش رده مقاومتی سیمان، مقاومت خمشی و فشاری ملات سیمان افزایش می‌یابد.

## ۵. مراجع

1. Eskandari, H., Designing, Proposing and Comparing the Methods Predicting the Compressive Strength of the Ferro cement Mortar. *Concrete Research Letters*, (2015). 6(1): p. 1-10.
2. Edgell, G. and B.A. Haseltine. *Building Mortar for Low Rise Housing: Recommendations, Problems and Solutions*. (Year) of Conference.: British Masonry Society.
3. Roberti, G.M., L. Binda, and G. Cardani. Numerical modeling of shear bond tests on small brick-masonry assemblages. in *Computer Methods in Structural Masonry-4: Fourth International Symposium*. (Year) of Conference.: CRC Press.
4. Binda, L., C. Tiraboschi, and S. Abbaneo, Experimental research to characterise masonry materials. *Masonry International*, (1997). 10(3): p. 92-101.
5. Nunes, S., et al., Interaction diagrams to assess SCC mortars for different cement types. *Construction and Building Materials*, (2009). 23(3): p. 1401-1412.
6. Eskandari-Naddaf, H. and M. Azimi-Pour, Performance evaluation of dry-pressed concrete curbs with variable cement grades by using Taguchi method. *Ain Shams Engineering Journal*, (2016).
7. Eskandari, H. and M. Tayyebinia, Effect of 32.5 and 42.5 cement grades on ann prediction of fibrocement compressive strength. *Procedia Engineering*, (2016). 150: p. 2193-2201.
8. Cagnon, H., et al., Effects of water and temperature variations on deformation of limestone aggregates, cement paste, mortar and High Performance Concrete (HPC). *Cement and Concrete Composites*, (2016). 71: p. 131-143.
9. Hu, J., Z. Ge, and K. Wang, Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. *Construction and Building Materials*, (2014). 50: p. 657-663.
10. Chandra, S. and J. Björnström, Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars—Part I. *Cement and Concrete Research*, (2002). 32(10): p. 1605-1611.
11. Eskandari, H., A.M. Nic, and A. Ghanei, Effect of Air Entraining Admixture on Corrosion of Reinforced Concrete. *Procedia Engineering*, (2016). 150: p. 2178-2184.
12. Boyd, A.J. and S. Mindess, The use of tension testing to investigate the effect of W/C ratio and cement type on the resistance of concrete to sulfate attack. *Cement and concrete research*, (2004). 34(3): p. 373-377.
13. Kim, Y.-Y., et al., Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount. *Advances in Materials Science and Engineering*, (2014). 2014.
14. Rao, G.A., Generalization of Abrams' law for cement mortars. *Cement and Concrete Research*, (2001). 31(3): p. 495-502.
15. Singh, S., P. Munjal, and N. Thammishetti, Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering*, (2015). 4: p. 94-100.
16. Neville, A.M., *Properties of concrete*. (1995).
17. Westerholm, M., et al., Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, (2008). 30(4): p. 274-282.
18. Ganaw, A.I. and A.F. Ashour, Rheological properties of mortars prepared with different sands. (2014).



19. De Shutter, G. and A.-M. Poppe, Quantification of the water demand of sand in mortar. *Construction and Building Materials*, (2004). 18(7): p. 517-521.
20. Haach, V.G., G. Vasconcelos, and P.B. Lourenço, Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and building materials*, (2011). 25(6): p. 2980-2987.
21. Reddy, B.V. and A. Gupta, Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction and Building Materials*, (2008). 22(8): p. 1614-1623.
22. Eskandari-Naddaf, H. and R. Kazemi, ANN prediction of cement mortar compressive strength, influence of cement strength class. *Construction and Building Materials*, (2017). 138: p. 1-11.
23. Committee, A., C09. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates, (2003), ASTM International.
24. Shah, A., et al., Effect of high range water reducers (HRWR) on the properties and strength development characteristics of fresh and hardened concrete. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, (2013). 37(C): p. 513.
25. Plank, J., et al., Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: the importance of PCE compatibility with silica fume. *Journal of Advanced Concrete Technology*, (2009). 7(1): p. 5-12.
26. ASTM, C., 230/C 230M (2008) Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International, West Conshohocken, (2008).
27. Standard, A., C305. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, (2012), West Conshohocken, PA: ASTM International.