فصلنامه پژوهش های نوین درعمران، معماری و شهرسازی شماره۱ – دوره ۲- صفحات ۲۹-۳۹
Journal of New researches in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning
ISSN: ۳۰۶۰-۶۰۸X

OPEN ACCESS

بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن

پانیذ ملک زادگان[۱] ، میکائیل مرادی[۲] ، هانا پیری[۳] ، سهیل طالبیان[۴]*
۱-دانشجوی کارشناسی ، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی اسلام آباد غرب ، دانشگاه رازی ، کرمانشاه.
۲-دانشجوی کارشناسی ، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی اسلام آباد غرب ، دانشگاه رازی ، کرمانشاه.
۳-دانشجوی کارشناسی ، مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی اسلام آباد غرب ، دانشگاه رازی ، کرمانشاه.
۴-استادیار گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه رازی ، کرمانشاه.

چکیده

نسبت آب به سیمان یکی از بنیادی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین پارامترها در فناوری بتن است که نقش مستقیم و غیرقابل انکاری در ریزساختار، تخلخل، دوام و به‌ویژه مقاومت فشاری بتن ایفا می‌کند. قانون آبرامز بیان می‌کند که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن به صورت معکوس کاهش می‌یابد؛ با این حال، رفتار واقعی بتن تحت تأثیر عوامل متعددی همچون نوع سیمان، شرایط عمل‌آوری، افزودنی‌های شیمیایی و معدنی، کیفیت سنگدانه‌ها و شرایط محیطی قرار دارد. هدف این مقاله، بررسی تحلیلی و تجربی تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف و تحلیل مکانیزم‌های میکروسکوپی حاکم بر این رابطه است. در این پژوهش، نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰.۳۵، ۰.۴۵، ۰.۵۵ و ۰.۶۵ تهیه و مقاومت فشاری آن‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز مطابق استاندارد و آیین‌نامه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۶۵ به ۰.۳۵ موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تا بیش از ۶۰ درصد در سن ۲۸ روز گردید. تحلیل ریزساختاری نشان داد که افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش تخلخل موئینه و کاهش چگالی ژل C-S-H شده و در نتیجه مقاومت کاهش می‌یابد. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که کنترل دقیق نسبت آب به سیمان، همراه با استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها، می‌تواند منجر به دستیابی به بتن‌های با مقاومت بالا و دوام مطلوب گردد. این یافته‌ها می‌تواند در طراحی اختلاط بتن‌های سازه‌ای، بهینه‌سازی مصرف سیمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن، قانون آبرامز، ریزساختار بتن، تخلخل موئینه، دوام بتن

فصلنامه پژوهش های نوین درعمران، معماری و شهرسازی شماره۱ – دوره ۲- صفحات ۲۹-۳۹
Journal of New researches in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning
ISSN: ۳۰۶۰-۶۰۸X

OPEN ACCESS

۱. مقدمه

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان، ستون توسعه زیرساخت‌های عمرانی معاصر را تشکیل می‌دهد و نقش اساسی در ساخت سازه ها ایفا می‌کند. عملکرد سازه‌ای بتن تا حد زیادی به مقاومت فشاری آن وابسته است؛ زیرا بسیاری از معیارهای طراحی سازه‌ای، از جمله ظرفیت باربری، ابعاد مقاطع و ضرایب ایمنی، بر مبنای مقاومت فشاری مشخصه تعریف می‌شوند. در این میان، پارامترهای متعددی نظیر نوع سیمان، کیفیت سنگدانه‌ها، شرایط عمل‌آوری، دمای محیط و افزودنی‌های شیمیایی بر مقاومت بتن اثرگذارند، اما نسبت آب به سیمان به‌عنوان بنیادی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین عامل در طراحی اختلاط بتن شناخته می‌شود.مفهوم ارتباط میان نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری نخستین‌بار به‌صورت نظام‌مند توسط داگلاس آبرامز در اوایل قرن بیستم مطرح شد و به «قانون آبرامز» شهرت یافت. بر اساس این اصل تجربی، برای مصالح و شرایط عمل‌آوری ثابت، مقاومت فشاری بتن تابعی معکوس از نسبت آب به سیمان است؛ به‌عبارت‌دیگر، هرچه مقدار آب مصرفی نسبت به سیمان کاهش یابد، مقاومت نهایی افزایش خواهد یافت. این اصل همچنان در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های معتبر از جمله توصیه‌های ACI به‌عنوان مبنای طراحی اختلاط بتن مورد استناد قرار می‌گیرد.از دیدگاه علمی، نقش آب در بتن دوگانه است؛ از یک‌سو آب برای آغاز و تداوم واکنش‌های هیدراسیون سیمان و تشکیل محصولات اصلی نظیر ژل C-S-H ضروری است؛ از سوی دیگر، آب اضافی که در واکنش شرکت نمی‌کند، پس از سخت‌شدن بتن به‌صورت حفرات موئینه باقی می‌ماند. افزایش حجم این حفرات موجب افزایش تخلخل مؤثر، کاهش چگالی خمیر سیمان، افت مدول الاستیسیته و در نهایت کاهش مقاومت فشاری و دوام بتن می‌شود. تحقیقات ریزساختاری ارائه‌شده نشان می‌دهد که رابطه مستقیم و معناداری میان حجم تخلخل موئینه و کاهش مقاومت مکانیکی وجود دارد. با وجود سادگی ظاهری مفهوم نسبت آب به سیمان، تعیین مقدار بهینه آن همواره یکی از چالش‌های اصلی در فناوری بتن بوده است. نسبت‌های پایین آب به سیمان اگرچه منجر به افزایش مقاومت می‌شوند، اما کارایی بتن را کاهش داده و احتمال ایجاد حفرات ناشی از تراکم ناقص را افزایش می‌دهند. در مقابل، نسبت‌های بالاتر موجب بهبود کارایی و سهولت اجرا می‌شوند، اما مقاومت و دوام سازه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهند. از این‌رو، ایجاد تعادل میان کارایی، مقاومت و دوام، مستلزم رویکردی علمی و مبتنی بر آزمایش است. علاوه بر ملاحظات سازه‌ای، موضوع پایداری زیست‌محیطی نیز اهمیت این بحث را دوچندان کرده است. صنعت سیمان سهم قابل‌توجهی در انتشار دی‌اکسیدکربن جهانی دارد و بهینه‌سازی طراحی اختلاط بتن از طریق کنترل نسبت آب به سیمان می‌تواند منجر به کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش اثرات زیست‌محیطی شود.

۲ . مبانی نظری

۲-۱ قانون آبرامز

قانون آبرامز که نخستین‌بار توسط Duff A. Abrams در سال ۱۹۱۸ ارائه شد، یکی از بنیادی‌ترین روابط تجربی در فناوری بتن به شمار می‌رود و همچنان مبنای بسیاری از روش‌های طراحی اختلاط مدرن است. این قانون بیان می‌کند که برای مصالح مشخص و در شرایط عمل‌آوری یکسان، مقاومت فشاری بتن تابعی معکوس از نسبت آب به سیمان است. اهمیت این قانون در آن است که برای نخستین‌بار رابطه‌ای کمی میان پارامتر اختلاط و یک شاخص مکانیکی کلیدی برقرار کرد و مسیر توسعه طراحی علمی بتن را هموار ساخت.بیان ریاضی متداول قانون آبرامز به صورت یک رابطه توانی یا نمایی ارائه می‌شود:

$$f_c = A(\frac{w}{c})^{-B}$$

OPEN ACCESS

که در آن f_c مقاومت فشاری بتن در سن مشخص، $\frac{w}{c}$ نسبت جرمی آب به سیمان،A و B ضرایب تجربی وابسته به نوع سیمان، کیفیت سنگدانه‌ها، درجه تراکم و شرایط عمل‌آوری هستند. این رابطه نشان می‌دهد که تغییرات کوچک در نسبت آب به سیمان می‌تواند منجر به تغییرات قابل‌توجه در مقاومت فشاری شود، زیرا وابستگی مقاومت به $\frac{W}{C}$ خطی نیست بلکه ماهیتی غیرخطی و حساس دارد. در محدوده نسبت‌های متداول (تقریباً ۰.۳۵ تا ۰.۷۰)، منحنی مقاومت بر حسب $\frac{W}{C}$ شیبی کاهشی و نسبتاً تند دارد، به‌ویژه در مقادیر پایین‌تر که کاهش جزئی آب می‌تواند افزایش چشمگیری در مقاومت ایجاد کند. تبیین علمی این قانون را می‌توان در چارچوب نظریه تخلخل و ریزساختار خمیر سیمان تحلیل کرد. برای هیدراسیون کامل سیمان پرتلند، حدود ۰.۲۲ تا ۰.۲۵ واحد آب به ازای هر واحد جرم سیمان برای واکنش شیمیایی ضروری است و حدود ۰.۱۵ واحد دیگر برای پر کردن فضای ژلی مورد نیاز است. بنابراین اگر نسبت آب به سیمان کمتر از حدود ۰.۳۶ تا ۰.۳۸ باشد، آب موجود تقریباً صرف هیدراسیون و تشکیل ژل C-S-H می‌شود و فضای خالی موئینه پیوسته بسیار محدود خواهد بود. در مقابل، هر مقدار آب افزوده بیش از نیاز هیدراسیون، پس از سخت‌شدن به صورت حفرات موئینه باقی می‌ماند. افزایش حجم این حفرات موجب افزایش تخلخل کل، کاهش سطح مؤثر انتقال تنش و ایجاد نواحی تمرکز تنش در ماتریس سیمانی می‌شود که در نهایت کاهش مقاومت فشاری را در پی دارد.از منظر مکانیک مصالح، مقاومت فشاری بتن تابعی از نسبت حجم جامد مؤثر به حجم کل و همچنین پیوستگی فاز خمیر سیمان است. با افزایش نسبت آب به سیمان، ضریب تخلخل افزایش یافته و مدول الاستیسیته خمیر کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود تحت بارگذاری فشاری، ریزترک‌ها در اطراف حفرات موئینه با سهولت بیشتری آغاز و گسترش یابند. بنابراین قانون آبرامز را می‌توان بازتابی ماکروسکوپی از تغییرات میکروسکوپی در شبکه تخلخل دانست.

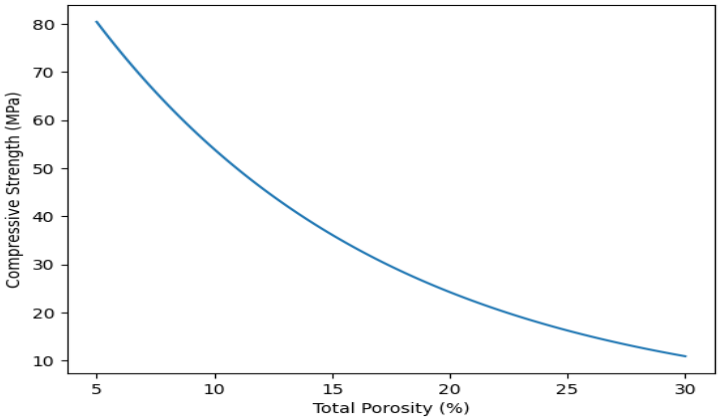
با وجود اعتبار گسترده، قانون آبرامز محدودیت‌هایی نیز دارد. این رابطه اساساً تجربی است و برای شرایطی معتبر است که سایر متغیرها ثابت باشند. تغییر در نوع سیمان، استفاده از مواد مکمل سیمانی نظیر خاکستر بادی یا سرباره، به‌کارگیری فوق‌روان‌کننده‌ها، تغییر نسبت سنگدانه به خمیر و یا شرایط متفاوت عمل‌آوری می‌تواند ضرایب A و B را تغییر دهد. افزون بر این، در بتن‌های با عملکرد بسیار بالا که نسبت آب به سیمان به کمتر از ۰.۳۰ می‌رسد، رفتار سیستم به دلیل استفاده گسترده از افزودنی‌های شیمیایی و تراکم بسیار بالا از الگوی کلاسیک آبرامز فاصله می‌گیرد و روابط اصلاح‌شده‌ای برای پیش‌بینی مقاومت مورد استفاده قرار می‌گیرد.در تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی، معمولاً با ترسیم نمودار لگاریتم مقاومت فشاری بر حسب لگاریتم نسبت آب به سیمان، رابطه‌ای تقریباً خطی به دست می‌آید که بیانگر ماهیت توانی قانون آبرامز است. این ویژگی امکان برازش رگرسیونی و پیش‌بینی مقاومت هدف در طراحی اختلاط را فراهم می‌کند. به همین دلیل، بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی بتن همچنان انتخاب اولیه نسبت آب به سیمان را بر مبنای مقاومت مشخصه مورد نظر و با استناد به همین رابطه تجربی انجام می‌دهند.

۲-۲ تأثیر ریزساختار و تخلخل بر مقاومت فشاری بتن

رفتار مکانیکی بتن در مقیاس ماکروسکوپی، بازتاب مستقیم سازمان‌یافتگی ریزساختاری خمیر سیمان و نحوه توزیع فازهای جامد و حفرات در مقیاس میکرو و نانو است. هنگامی که آب با سیمان واکنش می‌دهد، فرآیند هیدراسیون منجر به تشکیل محصولات اصلی نظیر ژل C-S-H ، هیدروکسید کلسیم و فازهای آلومیناتی می‌شود. در میان این محصولات، ژل C-S-H فاز اصلی باربر بوده و شبکه‌ای سه‌بعدی و نسبتاً متراکم ایجاد می‌کند که مسئول اصلی انتقال تنش فشاری در خمیر سیمان است. با این حال، ساختار نهایی این شبکه به شدت وابسته به مقدار آب اولیه موجود در سیستم است؛ به بیان دیگر، نسبت آب به سیمان تعیین‌کننده چگالی، پیوستگی و درجه تخلخل ماتریس سیمانی خواهد بود.در سیستم‌های با نسبت آب به سیمان بالا، پس از تکمیل بخش عمده هیدراسیون، بخشی از آب که در واکنش شرکت نکرده است تبخیر یا خارج می‌شود و شبکه‌ای از حفرات موئینه نسبتاً درشت و

پیوسته باقی می‌گذارد. این حفرات، که معمولاً در محدوده چند نانومتر تا چند میکرومتر قرار دارند، مسیرهای ترجیحی برای تمرکز تنش و آغاز ریزترک‌ها محسوب می‌شوند. افزایش حجم و پیوستگی این حفرات موجب کاهش سطح مؤثر انتقال تنش و افت مدول الاستیسیته خمیر سیمان می‌گردد. در نتیجه، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. این دیدگاه با یافته‌های ارائه‌شده توسط P. K. Mehtaو Paulo J. M. Monteiro در کتابشان[۱] همخوانی دارد، جایی که نشان داده شده مقاومت بتن تابعی نمایی از تخلخل کل سیستم است.

نمودار۱-رابطه مفهومی تخلخل و مقاومت فشاری



نمودار ارائه‌شده رابطه مفهومی میان تخلخل کل و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش درصد تخلخل منجر به کاهش نمایی مقاومت می‌گردد. این رفتار را می‌توان با مدل‌های مکانیک محیط‌های متخلخل توضیح داد، به‌طوری‌که مقاومت فشاری تقریباً متناسب با توان معینی از کسر حجمی فاز جامد مؤثر در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که تخلخل از حدود ۱۰ درصد به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد، افت مقاومت بسیار شدید و غیرخطی خواهد بود، زیرا شبکه حفرات به تدریج از حالت منفصل به حالت پیوسته تبدیل می‌شود و این پیوستگی، مسیر گسترش ترک را تسهیل می‌کند.از دیدگاه ریزمکانیکی، شکست بتن تحت بار فشاری معمولاً از ناحیه انتقالی خمیر سیمان و سنگدانه[۲] آغاز می‌شود. این ناحیه به دلیل نسبت آب به سیمان موضعی بالاتر و تراکم کمتر، دارای تخلخل بیشتری نسبت به خمیر بالک است. افزایش نسبت آب به سیمان کلی مخلوط، این ضعف موضعی را تشدید کرده و ضخامت و تخلخل ناحیه انتقالی را افزایش می‌دهد. در نتیجه، ریزترک‌ها با تنش‌های پایین‌تری آغاز شده و با هم‌پیوستگی سریع‌تری گسترش می‌یابند که نهایتاً منجر به شکست ترد بتن می‌شود.در مقابل، کاهش نسبت آب به سیمان موجب افزایش تراکم ژلC-S-H ، کاهش فاصله بین ذرات هیدراته‌شده و محدود شدن اندازه و پیوستگی حفرات موئینه می‌گردد. در این حالت، مسیرهای انتشار ترک طولانی‌تر و پرانرژی‌تر

[۱] Concrete: Microstructure, Properties, and Materials
[۲] Interfacial Transition Zone

OPEN ACCESS

شده و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با این حال، اگر نسبت آب به سیمان بیش از حد کاهش یابد و تراکم مناسب تأمین نشود، حفرات ناشی از گیر افتادن هوا می‌تواند جایگزین حفرات موئینه شود و اثر معکوس ایجاد کند.

۳. روش تحقیق

۳-۱ مواد و طرح اختلاط

در این پژوهش، انتخاب مصالح و طراحی طرح اختلاط با هدف دستیابی به یک چارچوب کنترل‌شده جهت بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری انجام شد، به‌گونه‌ای که سایر متغیرهای مؤثر تا حد امکان ثابت نگه داشته شوند. سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند معمولی تیپ I بوده که از نظر ترکیب شیمیایی شامل فازهای اصلیC_3S ، C_2S، C_3Aو C_4AF است و رفتار هیدراسیون آن در سنین اولیه و میانی برای تحلیل تغییرات مقاومت مناسب ارزیابی شد. ویژگی‌های فیزیکی سیمان شامل سطح مخصوص بلین، زمان گیرش اولیه و نهایی و مقاومت ملات استاندارد، پیش از استفاده کنترل گردید تا یکنواختی نتایج تضمین شود. سنگدانه‌های مورد استفاده شامل ماسه طبیعی شسته با مدول نرمی حدود ۲.۶ تا ۲.۸ و سنگدانه درشت شکسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر بودند. منحنی دانه‌بندی هر دو نوع سنگدانه مطابق محدوده‌های استاندارد تنظیم شد تا تراکم بهینه و حداقل فضای خالی حاصل شود. وزن مخصوص ظاهری، جذب آب و درصد رطوبت سنگدانه‌ها پیش از اختلاط اندازه‌گیری و در محاسبات طرح اختلاط اعمال گردید تا نسبت واقعی آب به سیمان حفظ شود. کنترل رطوبت سنگدانه‌ها در این مطالعه اهمیت ویژه‌ای داشت، زیرا هرگونه خطا در برآورد آب مؤثر می‌تواند نسبت آب به سیمان واقعی را تغییر داده و تحلیل نتایج را مخدوش کند. فرآیند طراحی طرح اختلاط بر مبنای روش حجمی مطلق و با در نظر گرفتن مقاومت هدف ۲۸ روزه انجام شد. در این روش، ابتدا نسبت آب به سیمان به‌عنوان متغیر مستقل تعیین و سپس مقدار سیمان مورد نیاز برای دستیابی به مقاومت هدف برآورد گردید. پس از تعیین مقدار آب و سیمان، حجم باقیمانده به سنگدانه‌های ریز و درشت اختصاص داده شد به‌گونه‌ای که کارایی مناسب و حداقل جداشدگی حاصل شود. در تمامی طرح‌ها اسلامپ هدف در محدوده بتن‌های سازه‌ای متعارف حفظ گردید تا مقایسه مقاومت‌ها در شرایط کارایی مشابه انجام شود.

جدول ۱- مقادیر مصالح مصرفی برای یک متر مکعب بتن در چهار نسبت مختلف آب به سیمان

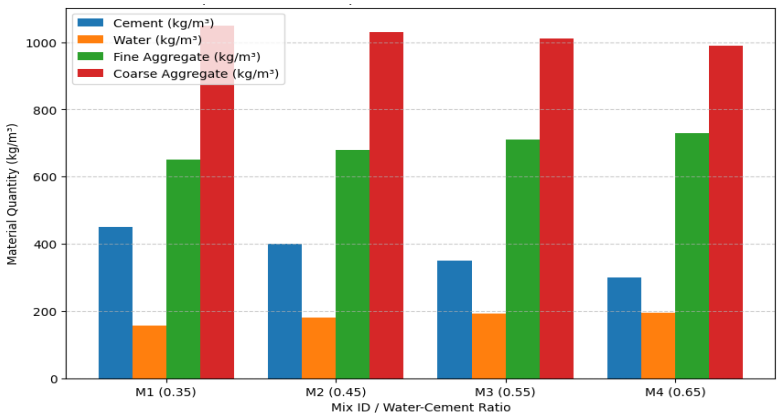
Mix ID	نسبت آب به سیمان($\frac{W}{C}$)	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	سنگدانه ریز($\frac{kg}{m^3}$)	سنگدانه درشت($\frac{kg}{m^3}$)
A	۰.۴۰	۳۸۰	۱۵۲	۶۹۰	۱۱۶۰
B	۰.۴۵	۳۵۰	۱۵۸	۷۱۰	۱۱۴۰
C	۰.۵۰	۳۲۰	۱۶۰	۷۳۰	۱۱۲۰
D	۰.۵۵	۳۰۰	۱۶۵	۷۵۰	۱۱۰۰

جدول ارائه‌شده، مقادیر مصالح مصرفی برای یک مترمکعب بتن در چهار نسبت مختلف آب به سیمان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان کاهش یافته و برای حفظ حجم کل، سهم سنگدانه‌های ریز افزایش یافته است. این رویکرد موجب شد تغییرات مقاومت عمدتاً ناشی از تغییر نسبت آب به سیمان باشد و نه تغییرات اساسی در نسبت خمیر به سنگدانه.از دیدگاه ریزساختاری، افزایش مقدار سیمان در نسبت‌های پایین‌تر آب به سیمان سبب افزایش حجم خمیر متراکم و کاهش تخلخل موئینه پیوسته گردید. در مقابل، در طرح‌های با نسبت آب به سیمان بالاتر، اگرچه کارایی افزایش

ISSN: ۳۰۶۰-۶۰۸X

یافت، اما به دلیل کاهش چگالی خمیر و افزایش فضای خالی مؤثر، ساختار نهایی بتن متخلخل‌تر شد. همچنین کاهش تدریجی مقدار سنگدانه درشت در نسبت‌های بالاتر به منظور جلوگیری از افت کارایی انجام گرفت، اما این تغییرات در محدوده‌ای کنترل‌شده بود تا اثر غالب همچنان متعلق به نسبت آب به سیمان باقی بماند.

نمودار۲- مقایسه اجزای مخلوط برای نسبت های مختلف آب به سیمان



۳-۲ نمونه‌سازی و عمل‌آوری

فرآیند نمونه‌سازی و عمل‌آوری در مطالعات مقاومت فشاری بتن نقشی تعیین‌کننده در اعتبار نتایج تجربی دارد، زیرا هرگونه تغییر در نحوه اختلاط، تراکم یا شرایط نگهداری می‌تواند به‌طور مستقیم بر ریزساختار نهایی خمیر سیمان و در نتیجه بر مقاومت اندازه‌گیری‌شده اثر بگذارد. از این رو، در این پژوهش تمامی مراحل ساخت نمونه‌ها با هدف کنترل متغیرهای مداخله‌گر و تضمین قابلیت تکرارپذیری نتایج، بر اساس الزامات استانداردهای بین‌المللی انجام شد. چارچوب کلی آزمایش‌ها منطبق با دستورالعمل‌ها[۳] برای ساخت و آزمایش نمونه‌های بتنی و همچنین توصیه‌ها[۴] در خصوص عمل‌آوری استاندارد بوده است.اختلاط بتن در مخلوط‌کن آزمایشگاهی با ظرفیت کنترل‌شده انجام شد تا یکنواختی توزیع آب و سیمان تضمین گردد. ترتیب افزودن مصالح به‌گونه‌ای انتخاب شد که ابتدا سنگدانه‌های ریز و درشت به همراه بخشی از آب مخلوط شده و سپس سیمان افزوده شود تا از کلوخه‌شدن ذرات سیمان جلوگیری گردد. زمان اختلاط به اندازه‌ای تنظیم شد که خمیر سیمان به‌صورت یکنواخت سطح سنگدانه‌ها را پوشش دهد، اما از افزایش بیش از حد دمای مخلوط جلوگیری شود. دمای بتن تازه بلافاصله پس از اختلاط اندازه‌گیری شد تا در محدوده مجاز (حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) باقی بماند، زیرا دمای اولیه می‌تواند بر سرعت هیدراسیون و ساختار محصولات هیدراته تأثیرگذار باشد.نمونه‌های فشاری به‌صورت استوانه‌ای با ابعاد استاندارد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. قالب‌ها پیش از بتن‌ریزی روغن‌کاری شدند تا جداسازی بدون آسیب نمونه‌ها پس از گیرش اولیه امکان‌پذیر باشد. بتن در سه لایه تقریباً مساوی در قالب ریخته شد و هر لایه با استفاده از میله فولادی استاندارد و میز ویبره متراکم گردید تا هوای محبوس کاهش یافته و تراکم یکنواخت حاصل شود. کنترل میزان تراکم اهمیت ویژه‌ای داشت، زیرا باقی‌ماندن حباب‌های هوا می‌تواند مقاومت فشاری را به‌طور مصنوعی کاهش دهد و اثر واقعی نسبت آب

[۳] ASTM International
[۴] ACI

به سیمان را مخدوش سازد. پس از اتمام تراکم، سطح فوقانی نمونه‌ها با ماله فلزی صاف شد تا توزیع تنش در هنگام بارگذاری یکنواخت باشد.پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی کنترل‌شده با دمای حدود ۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بالا نگهداری شدند تا گیرش اولیه کامل گردد. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و به حوضچه آب آهک اشباع منتقل شدند. استفاده از آب آهک اشباع سبب جلوگیری از انحلال هیدروکسید کلسیم از سطح نمونه و حفظ تعادل شیمیایی محیط عمل‌آوری می‌شود. عمل‌آوری مرطوب تا سن آزمایش (۷ و ۲۸ روز) ادامه یافت تا فرآیند هیدراسیون در شرایط ایده‌آل رطوبتی تکمیل شود. این روش عمل‌آوری موجب کاهش جمع‌شدگی زودرس، محدود کردن ایجاد ترک‌های حرارتی و دستیابی به حداکثر پتانسیل مقاومت بتن می‌گردد. پیش از انجام آزمایش فشاری، سطح دو انتهای نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا از هم‌راستایی و یکنواختی تماس با صفحات دستگاه اطمینان حاصل شود. در صورت نیاز، از کلاهک‌های گوگردی یا صفحات الاستومری استفاده شد تا توزیع تنش یکنواخت گردد و تمرکز تنش موضعی ایجاد نشود. آزمایش مقاومت فشاری با نرخ بارگذاری کنترل‌شده و یکنواخت انجام شد تا شرایط شبه‌استاتیکی برقرار باشد. نرخ افزایش تنش مطابق استاندارد تنظیم شد تا نتایج قابل مقایسه با مطالعات دیگر باشند. از دیدگاه ریزساختاری، اهمیت عمل‌آوری در این پژوهش به این دلیل است که نسبت آب به سیمان تنها در صورتی اثر واقعی خود را نشان می‌دهد که هیدراسیون به‌طور کافی پیشرفت کند. در صورت کمبود رطوبت، حتی در نسبت‌های پایین آب به سیمان، بخشی از سیمان هیدراته نشده باقی مانده و ساختار خمیر سیمان به تراکم نهایی خود نمی‌رسد.

۴. نتایج و تحلیل

۴-۱ نتایج مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان‌دهنده وابستگی شدید و غیرخطی مقاومت به نسبت آب به سیمان است؛ رفتاری که از نظر تئوریک با مبانی قانون آبرامز و از نظر ریزساختاری با نظریه تخلخل موئینه قابل تبیین است. در این پژوهش، با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰.۶۵ به ۰.۳۵، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که مقاومت ۲۸ روزه از محدوده حدود ۲۵ مگاپاسکال در نسبت‌های بالا به بیش از ۵۰ مگاپاسکال در نسبت‌های پایین رسید. این افزایش بیانگر آن است که کنترل نسبت آب به سیمان نه‌تنها عامل تعیین‌کننده در دستیابی به مقاومت‌های سازه‌ای متعارف است، بلکه در طراحی بتن‌های با مقاومت بالا نیز نقش بنیادین دارد.

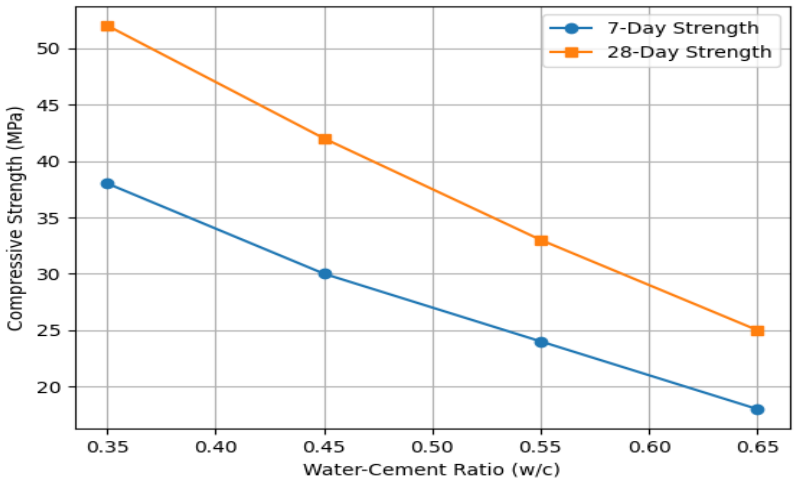
جدول ۲- نتایج و تحلیل آماری مقاومت فشاری بتن

نسبت $\frac{f_{۲۸}}{f_{۷}}$	درصد افزایش مقاومت(%)	افزایش مقاومت از ۷ تا ۲۸ روز (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	نسبت آب به سیمان($\frac{W}{C}$)
۱.۳۷	۳۶.۸	۱۴	۵۲	۳۸	۰.۳۵
۱.۴۰	۴۰.۰	۱۲	۴۲	۳۰	۰.۴۵
۱.۳۸	۳۷.۵	۹	۳۳	۲۴	۰.۵۵
۱.۳۹	۳۸.۹	۷	۲۵	۱۸	۰.۶۵

تحلیل روند تغییرات مقاومت نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب به سیمان در محدوده ۰.۵۵ تا ۰.۴۵ موجب افزایش نسبتاً خطی مقاومت می‌شود، اما در محدوده پایین‌تر از ۰.۴۵ شیب افزایش مقاومت تندتر می‌گردد. این رفتار غیرخطی ناشی از کاهش سریع

تخلخل پیوسته و افزایش چگالی شبکه ژل C-S-H در نسبت‌های پایین‌تر است. در واقع، هنگامی که نسبت آب به سیمان به مقادیر نزدیک به حد بهینه هیدراسیون می‌رسد، کاهش‌های جزئی در مقدار آب آزاد موجب کاهش چشمگیر در حجم حفرات موئینه مؤثر می‌شود و این موضوع به‌صورت جهشی در افزایش مقاومت منعکس می‌گردد. مقایسه مقاومت‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که نرخ رشد مقاومت در طرح‌های با نسبت آب به سیمان پایین‌تر بیشتر بوده است. این پدیده بیانگر آن است که در این طرح‌ها، به دلیل تراکم بالاتر خمیر سیمان و نسبت کمتر آب آزاد، محصولات هیدراسیون به‌صورت فشرده‌تر و پیوسته‌تر تشکیل شده‌اند و ساختار میکروسکوپی در طول زمان تکامل مؤثرتری داشته است. در مقابل، در طرح‌های با نسبت آب به سیمان بالا، اگرچه در سنین اولیه بخشی از مقاومت تأمین می‌شود، اما به دلیل وجود حفرات موئینه بزرگ‌تر و پیوسته‌تر، ظرفیت افزایش مقاومت در سنین بعدی محدودتر است.از دیدگاه مکانیک شکست، نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که نمونه‌های با نسبت آب به سیمان پایین‌تر رفتار تردتری از خود نشان دادند و شکست آن‌ها با گسترش سریع ترک‌های قطری مشخص گردید، در حالی که در نمونه‌های با نسبت‌های بالاتر، به دلیل تخلخل بیشتر و مدول الاستیسیته کمتر، تغییرشکل‌های نسبی بزرگ‌تری پیش از گسیختگی مشاهده شد. این تفاوت رفتاری نشان می‌دهد که نسبت آب به سیمان علاوه بر مقدار مقاومت، بر نحوه گسیختگی و پاسخ تنش–کرنش بتن نیز اثرگذار است. از منظر آماری، روند کاهشی مقاومت بر حسب نسبت آب به سیمان را می‌توان با یک رابطه نمایی یا توانی با ضریب همبستگی بالا مدل‌سازی کرد. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات مقاومت تصادفی نبوده و تابعی سیستماتیک از پارامتر طراحی مخلوط است. به بیان دیگر، نسبت آب به سیمان متغیری کنترل‌کننده با اثر غالب بوده و سایر عوامل در این پژوهش در محدوده‌ای کنترل‌شده باقی مانده‌اند.

نمودار۳- مقاومت فشاری در برابر نسبت آب به سیمان



نتایج مقاومت فشاری این تحقیق تأیید می‌کند که نسبت آب به سیمان مهم‌ترین شاخص پیش‌بینی‌کننده مقاومت بتن است و کاهش آن تا محدوده بهینه، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت ۷ و ۲۸ روزه می‌شود. با این

OPEN ACCESS

حال، این افزایش باید در چارچوب ملاحظات اجرایی و کارایی بتن تفسیر شود، زیرا کاهش بیش از حد آب بدون استفاده از افزودنی‌های مناسب می‌تواند مشکلات اجرایی ایجاد کند.

۴-۲ تحلیل نتایج

تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان می‌دهد که نسبت آب به سیمان به‌عنوان پارامتر حاکم بر ریزساختار خمیر سیمان، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل عملکرد مکانیکی بتن ایفا می‌کند. روند کاهشی مقاومت با افزایش نسبت آب به سیمان، نه‌تنها از منظر تجربی قابل مشاهده است، بلکه از دیدگاه تئوری‌های بنیادین مکانیک بتن نیز قابل توجیه می‌باشد. این رفتار در چارچوب قانون آبرامز و همچنین نظریه تخلخل موئینه قابل تحلیل است، به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری تابعی معکوس از نسبت آب به سیمان و تابعی مستقیم از تراکم ریزساختاری شبکه ژل C-S-H تلقی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب به سیمان موجب کاهش حجم حفرات موئینه پیوسته و در نتیجه افزایش چگالی مؤثر خمیر سیمان می‌گردد. در نسبت‌های بالاتر از ۰.۵۵، بخش قابل توجهی از آب مصرفی در فرآیند هیدراسیون شرکت نکرده و پس از تبخیر، شبکه‌ای از حفرات متصل ایجاد می‌کند که به‌عنوان مسیرهای تمرکز تنش عمل می‌کنند. این نواحی ضعیف، آغازگر رشد ریزترک‌ها در هنگام بارگذاری فشاری بوده و کاهش محسوس مقاومت را در پی دارند. در مقابل، در نسبت‌های پایین‌تر، آب موجود تقریباً در حد نیاز هیدراسیون بوده و حجم حفرات باقیمانده کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، انتقال تنش در ماتریس سیمانی یکنواخت‌تر انجام شده و مقاومت افزایش می‌یابد. از منظر مکانیک شکست، رفتار مشاهده‌شده را می‌توان به تفاوت در انرژی لازم برای گسترش ترک نسبت داد. در بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین، پیوستگی بهتر فاز خمیر و چسبندگی قوی‌تر در ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه [۵] موجب افزایش مقاومت در برابر انتشار ترک می‌شود. در حالی‌که در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالا، ضعف در ITZ و وجود حفرات بزرگ‌تر سبب تمرکز تنش و گسیختگی زودرس می‌گردد. بنابراین، تفاوت مقاومت تنها ناشی از تغییر مقدار آب نیست، بلکه ناشی از تغییر در ساختار چندمقیاسی بتن، از مقیاس نانومتری ژل هیدراته تا مقیاس ماکروسکوپی توزیع تنش است.

تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین مقاومت ۲۸ روزه و نسبت آب به سیمان از یک تابع توانی با ضریب همبستگی بالا تبعیت می‌کند. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات مقاومت ماهیتی سیستماتیک داشته و تابعی قابل پیش‌بینی از پارامتر طراحی اختلاط است. به بیان دیگر، نسبت آب به سیمان را می‌توان به‌عنوان شاخص کنترلی اصلی در مدل‌سازی مقاومت فشاری در نظر گرفت. در محدوده بررسی‌شده، کاهش هر ۰.۱۰ واحد در نسبت آب به سیمان منجر به افزایش قابل توجه مقاومت شده که این افزایش در محدوده نسبت‌های پایین‌تر شدیدتر است. این رفتار غیرخطی مؤید آن است که حساسیت مقاومت در محدوده بتن‌های با مقاومت بالا بیشتر بوده و کنترل دقیق آب مصرفی اهمیت مضاعف می‌یابد. همچنین مقایسه رشد مقاومت از ۷ تا ۲۸ روز نشان داد که الگوی تکامل زمانی مقاومت در تمامی طرح‌ها مشابه است و تفاوت اصلی در مقدار اولیه تراکم ریزساختاری نهفته است. این نتیجه نشان می‌دهد که مکانیزم هیدراسیون در تمام طرح‌ها مشابه بوده، اما میزان فضای در دسترس برای تشکیل محصولات هیدراته تعیین‌کننده مقاومت نهایی است.

۵.بحث و نتیجه‌گیری

[۵] ITZ

OPEN ACCESS

۱- نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نسبت آب به سیمان به‌عنوان بنیادی‌ترین پارامتر طرح اختلاط، نقش حاکم بر رفتار مکانیکی بتن را ایفا می‌کند و تغییرات آن به‌صورت مستقیم در ریزساختار، تخلخل مؤثر، کیفیت ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه و در نهایت مقاومت فشاری منعکس می‌شود. روند کاهشی مقاومت با افزایش نسبت آب به سیمان که در نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد، با مبانی کلاسیک فناوری بتن و رابطه تجربی آبرامز هم‌راستا بوده و بیانگر آن است که کنترل این پارامتر می‌تواند اختلافی بیش از صد درصد در مقاومت نهایی ایجاد کند. این حساسیت بالا نشان می‌دهد که حتی تغییرات جزئی در میزان آب مصرفی، در صورت عدم کنترل دقیق، می‌تواند عملکرد سازه‌ای بتن را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار دهد.

۲- تحلیل ریزساختاری نتایج نشان می‌دهد که در نسبت‌های پایین‌تر آب به سیمان، کاهش حجم و پیوستگی حفرات موئینه موجب افزایش چگالی ژل C-S-H و بهبود پیوستگی ماتریس سیمانی می‌شود. در این شرایط، انتقال تنش در خمیر سیمان یکنواخت‌تر بوده و ناحیه انتقال (ITZ) از نظر مکانیکی پایدارتر عمل می‌کند. در مقابل، در نسبت‌های بالاتر، وجود آب مازاد سبب شکل‌گیری شبکه‌ای از حفرات متصل می‌گردد که به‌عنوان نقاط ضعف موضعی عمل کرده و تمرکز تنش را افزایش می‌دهد. این پدیده منجر به شروع و گسترش سریع‌تر ترک‌ها در بارگذاری فشاری و کاهش مقاومت نهایی می‌شود. بنابراین، نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که مقاومت فشاری صرفاً تابع مقدار سیمان مصرفی نیست، بلکه تابعی از کیفیت ساختار میکروسکوپی حاصل از نسبت آب به سیمان است.

۳- از منظر تکامل زمانی مقاومت، داده‌ها نشان داد که الگوی رشد مقاومت از ۷ تا ۲۸ روز در تمامی طرح‌ها مشابه است و اختلاف اصلی در مقدار پایه مقاومت نهفته است. این موضوع بیانگر آن است که مکانیزم هیدراسیون در همه طرح‌ها ماهیتی مشابه دارد، اما میزان فضای موئینه اولیه تعیین‌کننده ظرفیت نهایی تشکیل محصولات هیدراته و تراکم ساختاری است. در واقع، نسبت آب به سیمان، چارچوب هندسی اولیه شبکه خمیر سیمان را تعریف می‌کند و این چارچوب در طول زمان تکامل می‌یابد. هرچه این چارچوب اولیه متراکم‌تر باشد، مقاومت نهایی بالاتر خواهد بود.

۴- بحث نتایج همچنین نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب به سیمان تا محدوده‌های پایین، اگرچه موجب افزایش مقاومت می‌شود، اما از دیدگاه اجرایی باید همراه با کنترل کارایی بتن باشد. در نسبت‌های بسیار پایین، افت اسلامپ و کاهش روانی می‌تواند مشکلاتی در تراکم و جای‌دهی ایجاد کند که خود منجر به ایجاد حفرات ناخواسته و کاهش مقاومت واقعی گردد. بنابراین، کاربرد عملی نتایج این پژوهش مستلزم استفاده از فناوری‌های مکمل مانند فوق‌روان‌کننده‌ها برای حفظ کارایی در عین کنترل نسبت آب به سیمان است.

۵- از نظر مهندسی سازه، یافته‌های این تحقیق اهمیت ویژه‌ای در طراحی بتن‌های سازه‌ای با مقاومت متوسط تا بالا دارد. نتایج نشان می‌دهد که تنظیم دقیق نسبت آب به سیمان مؤثرترین و اقتصادی‌ترین راهکار برای افزایش مقاومت است، پیش از آن‌که به افزایش عیار سیمان یا استفاده از مصالح خاص متوسل شویم. این موضوع می‌تواند در بهینه‌سازی مصرف سیمان، کاهش هزینه‌ها و حتی کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از تولید سیمان نقش مهمی ایفا کند.

۶- در نهایت می‌توان بیان داشت که این پژوهش با تکیه بر داده‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده، بار دیگر نقش بنیادی نسبت آب به سیمان را در تعیین مقاومت فشاری بتن تأیید می‌کند. رابطه معکوس و غیرخطی بین این پارامتر و مقاومت، ریشه در تغییرات ریزساختاری و تخلخل مؤثر دارد و از منظر مکانیک مصالح نیز قابل توجیه است. کنترل دقیق این نسبت، نه‌تنها تضمین‌کننده دستیابی به مقاومت طراحی‌شده است، بلکه چارچوبی علمی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی رفتار بتن فراهم می‌آورد. بر این اساس،

می‌توان نتیجه گرفت که نسبت آب به سیمان باید به‌عنوان مهم‌ترین شاخص طراحی در فناوری بتن مدرن در نظر گرفته شود و مدیریت آن، کلید دستیابی به عملکرد مکانیکی مطلوب و دوام بلندمدت سازه‌های بتنی خواهد بود.

۶.منابع

۱- D. A. Abrams, Design of Concrete Mixtures, Bulletin ۱, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, ۱۹۱۸.
۲- I.-C. Yeh, "Generalization of Strength Versus Water–Cement Ratio Relationship to Age," Cement and Concrete Research, vol. ۳٦, no. ۱۰, pp. ۱۸٦٥–۱۸۷۳, ۲۰۰٦.
۳- S. E. Hedegaard and T. C. Hansen, "Modified Water/Cement Ratio Law for Compressive Strength of Fly Ash Concretes," Materials and Structures, vol. ۲٥, pp. ۲۷۳–۲۸۳, ۱۹۹۲.
٤- Wikipedia contributors, "Abrams' law," Wikipedia, The Free Encyclopedia, ۲۰۲۳. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Abrams%۲۷_law
٥- ScienceDirect Topics, "Abrams Law – Strength and Water/Cement Ratio," in Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, ۲۰۱۹. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/abrams-law
٦- Journal of Building Engineering, "Role of Water/Cement Ratio on Strength Development of Cement Mortar," Elsevier, ۲۰۱٥. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S۲۳٥۲۷۱۰۲۱٥۳۰۰۲۳۱
۷- Materials Characterization, "Strength and w/c Ratio Relationship of Cement Based Materials Through Pore Features," Elsevier, ۲۰۱٦. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S۱۰٤٤٥۸۰۳۱٦۳۰۷۷۸۱
۸- ASTM C۳۹, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, ۲۰۲۰.
۹- ACI ۲۱۱,۱, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, American Concrete Institute, ۲۰۰۹.
۱۰- شبکه مهندسان ایران, "تحلیل مفهومی نسبت آب به سیمان و ارتباط آن با مقاومت بتن". Civil۸۰۸,۲۰۲۳
۱۱-مجله سازه," جدول مقادیر نسبت آب به سیمان و تقریب مقاومت فشاری بتن".۲۰۲۲
۱۲-مجله تحقیقات بتن ایران ," مطالعه روش های غیر مخرب و رابطه مقاومت فشاری با نسبت آب به سیمان و داده های تجربی". ۲۰۲۱