

# بررسی آزمایشگاهی پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه در بتن

جواد شریفی<sup>۱</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۲\*</sup>، محمود یزدانی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار زمین‌شناسی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار عمران خاک و پی - دانشگاه تربیت مدرس

nikudelm@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۸/۱۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۱/۲۸]

**چکیده** - پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان از پارامترهای مهمی است که بر مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد. نحوه اتصال سنگدانه به خمیر سیمان متأثر از نوع و خواص سنگدانه است که بررسی آن از اهداف این تحقیق می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه، آزمایشی ساده‌ای طراحی و مقاومت پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه برای چند نوع سنگدانه تعیین شده است. سنگدانه‌های انتخاب شده با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت بوده که از معادن قرضه مختلف گردآوری شده و جهت ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه نیز خواص این سنگدانه‌ها تعیین و پس از خرد کردن و تبدیل به شن و ماسه، بر اساس استانداردهای موجود بتن تهیه شده و مقاومت بتن ساخته شده با پارامترهای مقاومت فصل مشترک مقایسه شده است. نتایج بررسی نشان داد که خواص مقاومتی بتن ساخته شده از سنگدانه‌ها، ارتباط نزدیکی با مقاومت پیوستگی فصل مشترک که با روش پیشنهادی اندازه‌گیری شده است، دارد. همچنین نتایج نشان داد که سنگدانه دولومیتی بیشترین مقاومت سطح اتصال و سنگدانه دیوریت و لوماشل کمترین مقاومت ناحیه اتصال دارند، که این مهم به طور زیادی توسط کانی‌شناسی، شکل و خواص سطحی سنگدانه‌ها و همچنین خواص سیمان کنترل می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت سنگدانه‌ها نقش زیادی در مقاومت سطح اتصال دارند که این نقش در سن بالای بتن مشهودتر می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** بتن، مقاومت پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان، سنگدانه، خمیر سیمان

## ۱- مقدمه

در اثر ناصافی سطح سنگدانه‌ها است. یک سطح ناصاف مانند آنچه که در دانه‌های شکسته وجود دارد، منجر به پیوستگی بیشتر ناشی از قفل و بست مکانیکی می‌شود [۸-۵]. معمولاً در مورد سنگدانه‌های غیر مقاوم، متخلخل و حاوی کانی‌های غیر یکنواخت پیوستگی بهتری ایجاد می‌شود. به طور کلی آن دسته از ویژگی‌های بافت سنگی که مانع هر گونه نفوذ به داخل سطح دانه‌ها شوند، پیوستگی مناسب را ایجاد نخواهند کرد. به علاوه پیوستگی تحت تأثیر سایر خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها که با ترکیبات کانی‌شناسی سنگ، ترکیب شیمیایی و شرایط الکترواستاتیکی سطح دانه مرتبط است، نیز قرار می‌گیرد [۹-۱۱]. ویژگی‌های کانی‌شناسی سنگدانه‌های ریز بر

خواص مکانیکی و دوام بتن به ترکیب اجزا، حجم سیمان، خواص سنگدانه‌ها و فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه<sup>۱</sup> بستگی دارد. فصل مشترک به منطقه ضعیفی از بتن گفته می‌شود که در آن خمیر سیمان با سنگدانه در ارتباط می‌باشد و مقاومت ایجاد شده در این منطقه مقاومت پیوستگی نامیده می‌شود [۴-۱]. پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان عامل مهمی در مقاومت بتن، به خصوص مقاومت خمشی آن است. عامل ایجاد کننده پیوستگی کاملاً روشن نشده، ولی بخشی از آن ناشی از قفل و بست بین سنگدانه و خمیر سیمان هیدراته شده

1 Interfacial Transition Zone (ITZ)

سپس بررسی‌هایی در خصوص چگونگی اندازه‌گیری مقاومت فصل مشترک انجام داده و در ادامه روشی برای اندازه‌گیری این مهم پیشنهاد کرده است. در این روش از تعیین مقاومت برشی بین سنگدانه و خمیر سیمان استفاده شده که برای انجام آزمایش، سنگدانه‌هایی از منابع مختلف با خواص سنگ‌شناسی متفاوت گردآوری و برای تعیین مقاومت فصل مشترک تحت آزمایش قرار گرفته است. در نهایت آزمایش پیشنهادی روی سنگدانه‌های مختلف انجام شده، سپس نتایج به دست آمده از آزمایش با توجه به جنس سنگدانه‌های مختلف تجزیه و تحلیل شده است.

## ۲- مطالعات گذشته

یکی از مطالعات مهم در زمینه پیوستگی سنگدانه‌ها با خمیر سیمان به وسیله‌ی الکساندر از آفریقای جنوبی انجام شده است [۲۰]. در این پژوهش دو تکنیک تجربی برای اندازه‌گیری مقاومت پیوستگی ارایه شده است، تکنیک اول بر پایه روش پیشنهادی انجمن جهانی مکانیک سنگ<sup>۱</sup> [به نقل از ۲۵] بوده که انرژی شکست در مغزه گرفته شده از سنگ و خمیر سیمان را تعیین می‌کند. در این روش مغزه ابره بر شده و به خمیر سیمان چسبیده می‌شود، در ادامه به مرکز آن نیرو وارد و طاقت و انرژی شکست محاسبه می‌شود. در انتها هم ریزساختار در ناحیه فصل مشترک به وسیله میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه واقع شده است. در روش دوم ارایه شده به وسیله‌ی الکساندر، سنگ‌های دیسک شکل وسط چند لایه از خمیر سیمان قرار گرفته و مقاومت فصل مشترک آنها تعیین می‌شود [۲۰ و ۱۶-۱۵].

مطالعات دیگر در زمینه پیوستگی سنگدانه‌ها را ویلیام تاسونگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲۱] از دانشگاه شفیلد انجام داده‌اند. این پژوهشگران پژوهش‌های خود را در زمینه پیوستگی شیمیایی و فیزیکی بین خمیر سیمان و سنگدانه در دو پژوهش ارایه کردند. اولین پژوهش این پژوهشگران در ارتباط با برهم‌کنش فیزیکی خمیر سیمان و سنگدانه و سازوکار پیوندی فصل مشترک آنها در بتن است. نتایج این

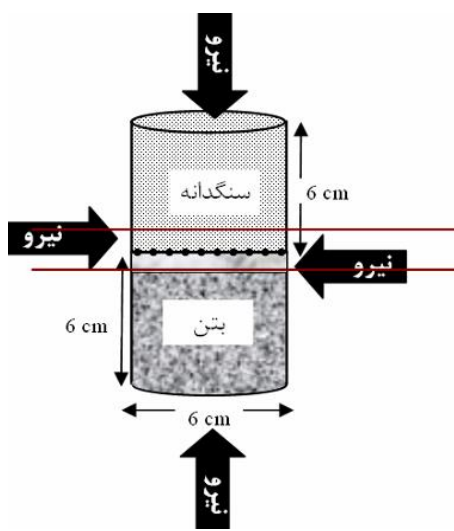
ریزساختارهای منطقه انتقال اثر می‌گذارد. برای نمونه در مورد سنگدانه‌های آهکی و دولومیتی ممکن است قدری پیوستگی شیمیایی وجود داشته باشد. در مورد دانه‌هایی که سطح آنها صیقلی است قدری نیروهای موئینگی ایجاد می‌شود. ولی برای ایجاد یک پیوستگی خوب، الزامی است که سطح سنگدانه تمیز و عاری از هر گونه ذرات خاک رس باشد [۱۴-۱۲].

مطالعه فصل مشترک و تعیین کیفیت پیوستگی سنگدانه‌ها نسبتاً مشکل است و هیچ‌گونه آزمایش قابل قبولی در این زمینه وجود ندارد. در نتیجه به آزمایش‌های سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه اتکا شده است. به شکل کلی وقتی که پیوستگی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان خوب باشد، تعداد کمی از دانه‌ها از غلاف سیمانی اطراف خود بیرون کشیده می‌شوند و بیشتر می‌شکنند. لازم است این نکته یادآوری شود که سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه حوزه تمرکز تنش است. نظر به اینکه مقاومت پیوستگی هم به مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده و هم به خواص سطح سنگدانه‌ها بستگی دارد، بنابراین مقدار آن با عمر بتن افزایش می‌یابد. چنین به نظر می‌رسد که نسبت مقاومت پیوستگی به مقاومت سیمان هیدراته شده متناسب با عمر بتن افزایش می‌یابد. بنابراین مشروط بر آنکه مقاومت پیوستگی به حد کافی باشد، این مقاومت به خودی خود عاملی در کنترل مقاومت معمولی بتن نخواهد بود و لیکن در بتن‌های با مقاومت زیاد احتمال دارد که مقاومت پیوستگی از مقاومت کششی خمیر نیز کمتر شود و بنابراین ترجیحاً گسیختگی ناشی از شکست ناحیه پیوستگی رخ خواهد داد [۱۷ و ۱۵]. مقاومت منطقه سطح مشترک می‌تواند در نتیجه واکنش‌های ثانوی بین هیدرواکسید کلسیم موجود در سیمان و مواد پوزولانی با مرور زمان افزایش یابد. میکروسیلیس که خیلی نرم‌تر از خمیر سیمان است در این رابطه موثر است [۱۹-۱۷].

با توجه به مطالب گفته شده، پیوستگی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان از پارامترهایی مهمی است که بر مقاومت بتن تاثیر می‌گذارد. چگونگی اتصال سنگدانه به خمیر سیمان متاثر از نوع سنگدانه است که بررسی آن یکی از اهداف این پژوهش است. در این پژوهش ابتدا مروری بر مطالعات گذشته داشته،

1 International Society of Rock Mechanics (ISRM)  
2 W.A. Tasong

پس از مشخص شدن نمونه مورد آزمایش، شبیه‌سازی نمونه واقعی صورت گرفت. برای این منظور مغزه‌هایی از سنگ مادر گرفته و روی آن خمیر سیمان قرار گرفته و به ابعاد مورد نظر آماده شده است. با ساخت نمونه آزمایشی (شکل ۱)، نتایج نشان داد به دلیل انقباض و بروز ترک در خمیر سیمان، تعیین مقاومت فصل مشترک میسر نیست. در بررسی‌های دیگر به جای خمیر سیمان از بتن استفاده شد، به شکلی که در قسمت اتصال فقط خمیر سیمان بود (شکل ۲). پس نمونه مورد آزمایش از نیمه مغزه سنگ و نیمه دیگر از بتن ساخته شده، به شکلی که در ناحیه اتصال فقط خمیر سیمان و سنگدانه موجود است. اندازه موثر نمونه که دچار برش می‌شود به صورت دو خط موازی در شکل (۲) مشخص است. برای جلوگیری از کماتش نمونه، نسبت سطح به قطر نمونه حداقل در نظر گرفته شده است.



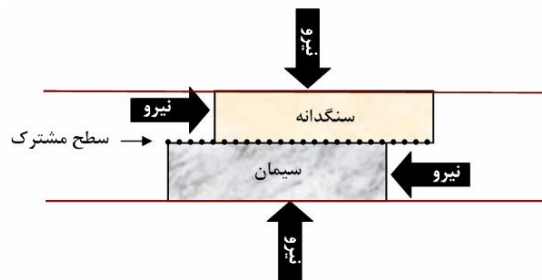
شکل (۲) تصویر شماتیک نمونه آزمایش شده

بنابراین قسمت بتنی و مغزه سنگی در دستگاه به عنوان گیره عمل کرده و تنها قسمت خمیر سیمان و بخش کمی از مغزه دچار برش می‌شود. در ادامه با این فرض، نمونه‌های واقعی ساخته شدند. به دلیل کم بودن ضخامت خمیر سیمان، انقباض و ترک ناچیز است. بنابراین نمونه شکلی ساخته شده که ناحیه اتصال از جنس خمیر سیمان و سنگدانه بوده و نیروی برشی نیز به ناحیه اتصال وارد می‌شود. در این پژوهش نیروی

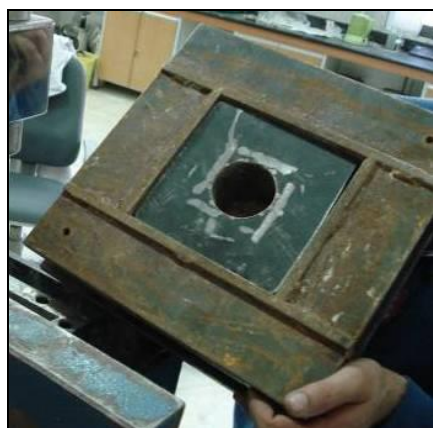
پژوهش‌ها نشان داد که مقاومت پیوندی سطح مشترک را نمی‌توان به تنهایی از زبری سطح سنگدانه پیش‌بینی کرد. در بررسی دیگر که به وسیله‌ی همین پژوهشگران انجام شده است، تاثیر خواص ژئوشیمیایی سنگدانه‌ها روی تولید و افزایش ریزشکافت‌ها (خلل و فرج‌ها) و افزایش قدرت پیوندی در فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان مطالعه شده است. ریزشکافت‌های ایجاد شده به دلیل تغییر ترکیب شیمیایی کانی‌ها در ناحیه اتصال در سه سنگدانه معمولی شامل سنگ آهک، بازالت و کوارتزیت بررسی شده است [۱ و ۲].

### ۳- بررسی‌های آزمایشگاهی

با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه، هنوز راه حل قابل قبول و جامعی برای اندازه‌گیری این مهم وجود ندارد [۸-۱]. از آنجایی که پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان عامل مهمی برای افزایش خواص مقاومتی و دوام بتن است، در این پژوهش ابتدا این مهم مطالعه سپس روش‌های اندازه‌گیری آن بررسی شده است. اصول روش ارایه شده برای تعیین مقاومت فصل مشترک در این پژوهش، با این فرض است که بتن در زیر بار وارد شده بر اثر کاهش مقاومت بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها شکسته می‌شود و در نهایت منجر به شکستن کل نمونه می‌شود. پس با توجه به این مطلب، برای اندازه‌گیری مقاومت فصل مشترک از مقاومت برشی بین خمیر سیمان و سنگدانه استفاده شده است. شکل (۱) تصویر شماتیک نمونه مورد آزمایش و فرضیه به کار برده شده را نشان می‌دهد. در این تصویر نمونه از دو قسمت ساخته شده که نیمه سنگدانه (مغزه از سنگ) و نیمه خمیر سیمان است، به طوری که فصل مشترک آنها به وضوح مشخص است.



شکل (۱) تصویر شماتیک فرضیه بررسی شده



شکل (۳) قالب ساخته شده



شکل (۴) نمونه ساخته شده و محل قرار گیری آن



شکل (۵) قالب بالا و پایین نمونه

عمودی ناچیز بوده و در طول آزمایش اتساع احتمالی نمونه‌ها ثبت شده است.

به دلیل تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر خواص بتن [۱۵-۱۰]، در این پژوهش نمونه‌های مورد آزمایش از سه گروه سنگ‌ها (رسوبی، دگرگونی و آذرین) انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌ها، مغزه‌های تهیه شده از سنگ در یک پوشش پلاستیکی گذاشته و روی سطح ابربر شده آنها ابتدا خمیر سیمان و سپس به وسیله بتن تا ارتفاع ۶ سانتی متر پر شد. نمونه‌ها به تعداد ۶۰ عدد از ۱۰ سنگدانه (مغزه سنگ) که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها تعیین شده بود، ساخته و از هر سنگدانه ۶ نمونه برای آزمایش در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آماده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از زمان ساخت در آب در دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد تا روز آزمایش نگهداری و در شرایط مرطوب تحت آزمایش قرار گرفتند [۱۳-۱۲]. لازم به گفتن است که آزمایش‌های شیمیایی برای مواد زیان‌آور و همچنین واکنش‌های قلیایی و کربناتی طبق استانداردهای موجود روی مصالح سنگدانه‌ای انجام و واکنش پذیری آنها تعیین شده است [۲۳-۲۱].

پس از طراحی و ساخت نمونه‌ها، از دستگاه برش مستقیم با قالب  $30 \times 30$  سانتی‌متر که نیرویی به اندازه ۵۰ کیلو نیوتن وارد می‌کند، برای تعیین مقاومت فصل مشترک نمونه‌ها استفاده شد. به علت این که قالب دستگاه بزرگ و مکعبی است از قالبی استفاده شد که کوچک و استوانه‌ای بوده، بنابراین نمونه مورد نظر درون قالبی دیگر و به صورت غیرمستقیم در این دستگاه قرار داده شد. برای این منظور قالبی ساخته شده که امکان جاگذاری نمونه استوانه‌ای در قالب مکعبی فراهم نمود. تصویر قالب ساخته شده و چگونگی قرارگیری نمونه در آن در شکل-های (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

پس از طرح شماتیک قالب، شبیه‌سازی آن به وسیله مصالح و مواد مختلف انجام گرفت. در نهایت قالب گفته شده با استفاده از ورقه‌های فلزی ساخته شد. این قالب در شکل (۳) نشان داده شده که درون قالب  $30 \times 30$  سانتی‌متری جای می‌گیرد. محل نمونه هم در این قالب قسمتی از یک مغزه‌گیر به قطر ۵۴ میلی-متر است.

در مراحل قبل طراحی نمونه، شبیه‌سازی و انتخاب دستگاه آزمایش انجام شد. در این مرحله نمونه‌ها با توجه به زمان عمل‌آوری در دستگاه قرار داده و با سرعت ثابتی روی نمونه‌ها آزمایش انجام و نمودار جابه‌جایی و مقاومت حداکثر برای هر نمونه رسم شد (شکل ۶ و ۷). در ادامه مقاومت برشی فصل

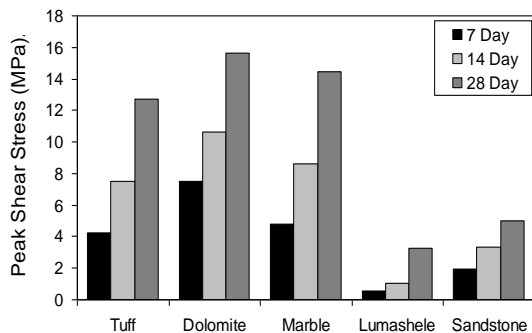
در مقاومت ۲۸ روزه به دلیل افزایش مقاومت ناحیه اتصال، قسمت ضعیف نمونه برش خورده است (شکل ۱۰). در این نمونه مقاومت سنگدانه لوماشل کمتر از بتن بوده و برش از ناحیه سنگ صورت گرفته است. این مورد نشان دهنده آن است که مقاومت برشی ناحیه اتصال بیشتر از مقاومت سنگدانه بوده است. در نهایت مقاومت برشی فصل مشترک در زمان‌های تعیین شده برای سنگدانه‌های رسوبی و دگرگونی (شکل ۱۱) و سنگدانه آذرین (شکل ۱۲) بدست آمد.



شکل (۹) نمونه مرمر بعد از آزمایش

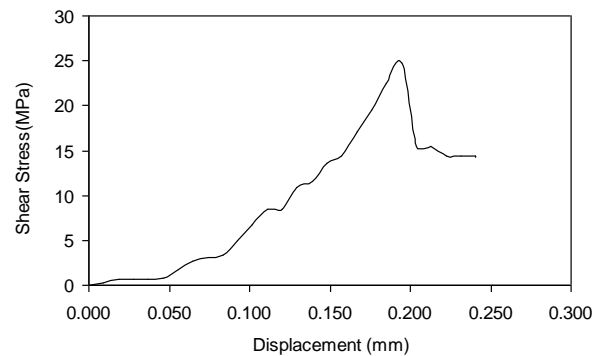


شکل (۱۰) نمونه لوماشل بعد از آزمایش

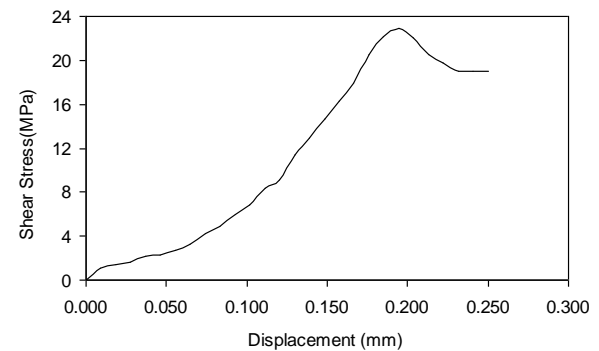


شکل (۱۱) مقاومت فصل مشترک (سنگدانه‌های رسوبی و دگرگونی)

مشترک بتن و سنگدانه در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز برای سنگدانه‌های مورد مطالعه تعیین شد (شکل ۸). لازم به ذکر است که در حین آزمایش نیروی عمودی بر همه نمونه‌ها یکسان و تغییر شکل عمودی اندازه‌گیری شده است. طبق نتایج به دست آمده، اتساع یا تغییر شکل عمودی در هیچ کدام از نمونه‌ها مشاهده نشد.



شکل (۶) منحنی تنش - جابه‌جایی نمونه بازالتی



شکل (۷) منحنی تنش - جابه‌جایی نمونه گرانیتی



شکل (۸) نمونه آندزیت بعد از آزمایش

تنش برشی در همه نمونه‌ها قابل اندازه‌گیری نبود. نمونه ساخته شده با سنگدانه مرمر، به دلیل پیوند قوی در قسمت فصل مشترک، نمونه از ناحیه اتصال برش نخورده و بلکه از ناحیه بتنی شکسته شده است (شکل ۹). در نمونه لوماشل<sup>۱</sup> نیز

۱ سنگ زیست آواری رسوبی

سیمان استفاده شده برای ساخت بتن و همچنین خمیر سیمان، پرتلند پوزلانی ساخت شرکت سیمان تهران تحت عنوان سیمان‌های ترکیبی مطابق با استاندارد ASTM C 959 است (جدول ۱). در ادامه با استفاده از دانه‌بندی استاندارد و طرح اختلاط ثابتی از سنگدانه‌های موجود بتن تهیه شد. طرح اختلاط طراحی شده در جدول (۲) نشان داده شده است. در این طرح، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۴ و مقاومت فشاری طراحی برابر با ۲۵ مگاپاسکال تعیین شده است. همچنین اسلامپ این طرح برابر با ۳۰ میلی‌متر و درصد هوای غیر عمدی در بتن نیز یک درصد در نظر گرفته شده است [۲۳ و ۸-۷].

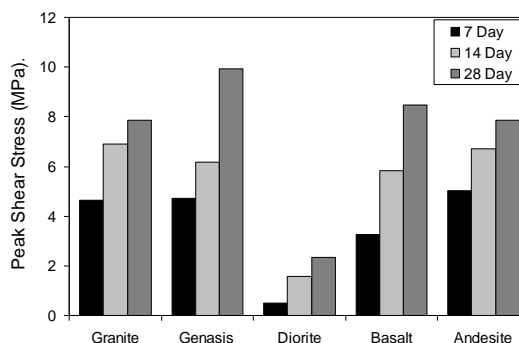
جدول (۱) خواص سیمان استفاده شده

ویژگی سیمان پژوهش	ویژگی استاندارد [۳]	نام ویژگی
340	300	نرمی (متر مربع بر کیلوگرم)
		سلامت
0.98	حداکثر 1.0	انبساط کلی (میلی‌متر)
0.077	حداکثر 0.8	انبساط در کوره (درصد)
		زمان گیرش (دقیقه)
110	حداقل 30	اولیه
160	حداکثر 600	نهایی
		مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
33.0	حداقل 16.0	۳ روزه
41.0	حداقل 22.0	۷ روزه
52.0	حداقل 33.0	۲۸ روزه

جدول (۲) نسبت اختلاط مصالح

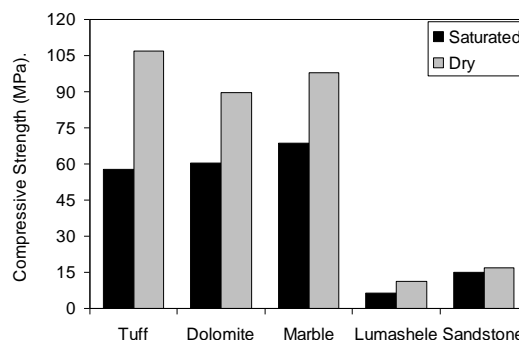
نوع مصالح	نسبت حجمی ( $m^3$ )	نسبت وزنی ( $kg / m^3$ )
آب	۰/۱۵	۱۵۰
سیمان	۰/۱۱	۳۳۶
شن	۰/۳۸	۹۶۰
ماسه	۰/۳۴	۸۵۰

پس از تعیین مشخصات مصالح و طرح اختلاط، ساخت بتن بر اساس نسبت حجمی مصالح مختلف در آزمایشگاه به وسیله دستگاه مخلوط‌کن انجام گرفت. قبل از انتقال بتن به

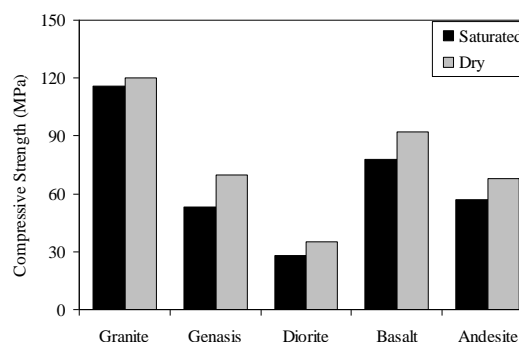


شکل (۱۲) مقاومت فصل مشترک (سنگدانه‌های آذرین)

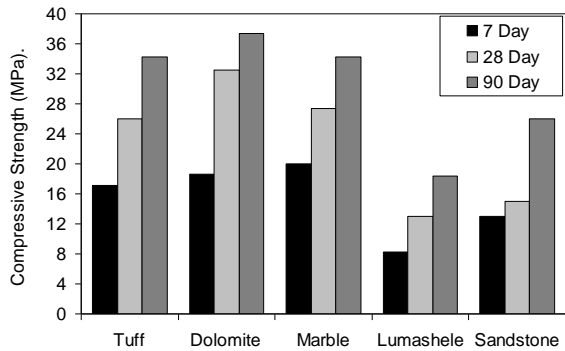
هم‌زمان با انجام آزمایش‌های مقاومت فصل مشترک، نمونه‌هایی از جنس سنگدانه‌های مطالعه شده آماده و به وسیله سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی به ذراتی در اندازه شن و ماسه تبدیل و سپس خواص فیزیکی و مکانیکی آنها طبق استانداردهای موجود تعیین شد [۲۷-۲۴]. مقاومت فشاری تک‌محوری این سنگدانه‌ها مطابق با استانداردهای معمول در حالت خشک و اشباع انجام شده و در نمودارهای شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.



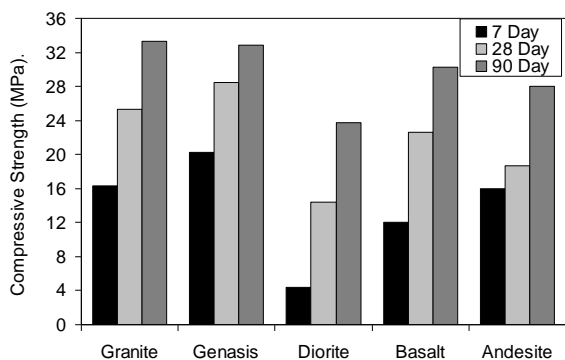
شکل (۱۳) مقاومت تک‌محوری (سنگدانه‌های رسوبی و دگرگونی)



شکل (۱۴) مقاومت تک‌محوری (سنگدانه‌های آذرین)



شکل (۱۶) مقاومت بتن ساخته شده (سنگدانه رسوبی و دگرگونی)



شکل (۱۷) مقاومت بتن ساخته شده (سنگدانه آذرین)

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

پس از بررسی‌های آزمایشگاهی، نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ابتدا نتایج آزمایش‌های مقاومتی فصل مشترک در مقابل مقاومت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های مختلف روی یک نمودار رسم شد. نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین مقاومت تک محوری بتن و مقاومت فصل مشترک وجود دارد (شکل ۱۸). همچنین برآزشی بین مقاومت کششی بتن و مقاومت فصل مشترک نیز انجام شد که در شکل (۱۹) نشان داده شده است. برآزش‌های داده شده در نمودارهای گفته شده برای مدت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه است. در این نمودارها مشاهده می‌شود ارتباط بین مقاومت تک محوری بتن و مقاومت سطح پیوستگی در سنین بالا زیادتر است.

با توجه به نمودارهای شکل (۱۸) و (۱۹)، ارتباط مناسبی بین مقاومت بتن و مقاومت پیوستگی، که با روش پیشنهادی اندازه‌گیری شده، مشاهده می‌شود. این مهم نشان دهنده کارایی روش ارایه شده برای سنجش فصل مشترک بین خمیر سیمان و

درون قالب (نمونه‌گیری) مقداری از آن جهت آزمایش اسلامپ مجزا و آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143/C143M-12 برای هر طرح اختلاط انجام شد [به نقل از ۸ و ۷]. مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برای هر مخلوط بتنی بین ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر متغیر بوده که این تغییر در ارتباط با جنس سنگدانه‌ها و بافت ظاهری آنها است.

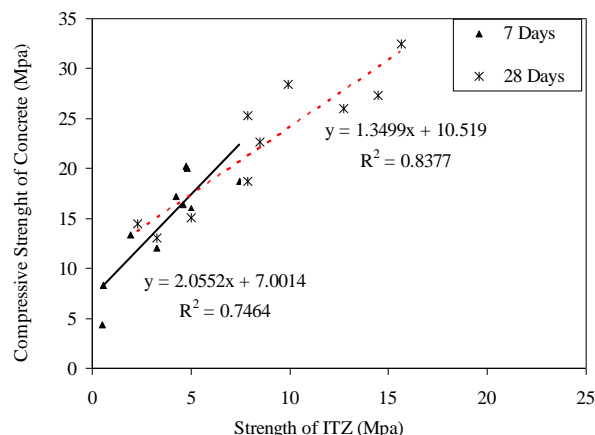
پس از آزمایش اسلامپ، نمونه‌گیری از بتن در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای طبق استانداردهای مربوطه انجام شد. در ادامه سطح خارجی نمونه‌ها تا ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه و به وسیله گونی پوشش داده و در پایان این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج و درحوضچه بتن که حاوی آب با دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد بود، تا زمان انجام آزمایش‌های فشاری و کششی نگهداری شد [۷]. نمونه‌های مکعبی استاندارد تهیه در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ در حالت اشباع با سطح خشک به وسیله دستگاه‌های فشار، تحت نیروی فشاری طبق استاندارد BS 1881-116:1983 قرار گرفت (شکل ۱۵). نیرو بطور یکنواخت، ممتد و بدون ضربه با آهنگ ازدیاد تنش ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه روی نمونه اعمال شد [۳۰، ۴-۲۶]. نتایج مقاومت فشاری بتن تهیه شده از سنگدانه‌ها در نمودارهای (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۵) انجام آزمایش مقاومت تک محوری بتن

سنگدانه است.

از انجام رگرسیون ساده روی داده‌ها، روابطی برای تخمین مقدار مقاومت تراکمی بتن و همچنین مقاومت کششی بتن به دست آورده شد. با توجه به مقدار Sig ۰/۰۵ به دست آمده از آزمون فیشر (جدول ۳)، هر دو مدل (مدل رابطه مقاومت کششی و فشاری با مقاومت ناحیه اتصال) معنادار است. همچنین پس از آزمون دوتایی t، روابط معناداری بین مقدار مقاومت کششی بتن و مقاومت تراکمی با مقاومت سطح اتصال یافت شد که در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به مقدار sig به دست آمده (جدول ۴)، ضریب همبستگی مقاومت فشاری و کششی بتن با مقاومت ناحیه اتصال تقریباً یکسان است.



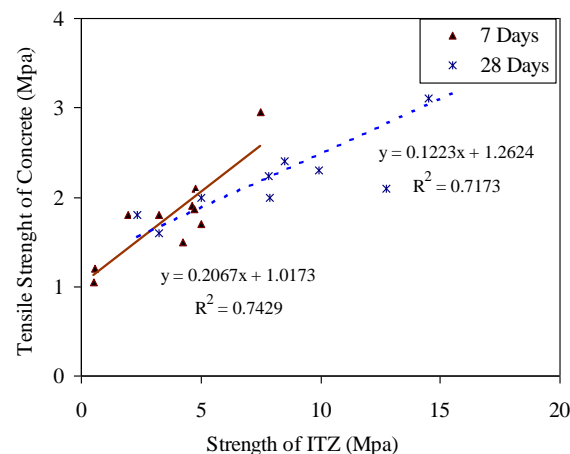
شکل (۱۸) ارتباط مقاومت فصل مشترک با مقاومت فشاری بتن

جدول (۳) جدول ANOVA

Model		Mean Square	F	Sig.
مقاومت فشاری بتن	Regression	73.633	40.383	.000
	Residual	1.823		
مقاومت کششی بتن	Regression	336.786	41.345	.000
	Residual	8.146		

جدول (۴) ضرایب مدل

Model		R2	t	Sig.
مقاومت فشاری بتن	(Constant)		5.131	.001
	مقاومت سطح اتصال	.81	6.430	.000
مقاومت کششی بتن	(Constant)		15.083	.000
	مقاومت سطح اتصال	.77	6.355	.000



شکل (۱۹) ارتباط مقاومت فصل مشترک با مقاومت کششی بتن

پس از بررسی معنا دار بودن مدل و ارتباط مقاومت فشاری و کششی بتن با مقاومت ناحیه اتصال، علت متفاوت بودن این همبستگی‌ها در سنگدانه مختلف تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقاومت ناحیه اتصال در سنگدانه‌های ماسه-سنگ، دیوریت و لوماشل به دلیل خواص زبری و شکل مضرس سنگدانه‌ها است. ولی در سنگدانه گرانیتی به دلیل بافت صیقلی و شکست صدفی، قفل و بست ذرات کمتر بوده و در نتیجه دارای مقاومت پیوستگی پایینی است. سنگدانه‌های گرانیت، گنایس و آندزیت علیرغم مقاومت بالای سنگ مادر، مقاومت نهایی بتن تحت تاثیر مقاومت پیوستگی قرار گرفته و سبب می‌شود که مقاومت بتن از مقاومت پیوستگی فراتر نرود و شکست بتن در ناحیه فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه صورت گیرد (شکل ۸). در سنگدانه‌هایی مثل لوماشل به دلیل

به کمک نرم افزار SPSS دو نوع تحلیل رگرسیون بر روی داده‌ها صورت گرفت. ابتدا تحلیل رگرسیون ساده روی نمونه‌ها انجام گرفت و روابطی بین پارامترها به دست آمد، سپس تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره انجام گرفت. رگرسیون چند متغیره با استفاده از روش Backward انجام شد که برای نشان دادن معنادار بودن مدل از جدول ANOVA استفاده می‌شود (جدول ۳). از نتایج مقاومت سطح اتصال، مقاومت فشاری و کششی بتن در سن ۲۸ روزه برای تحلیل آماری استفاده شده است.

با توجه به مقدار F و Sig به دست آمده، مدل آماری تحلیل می‌شود. همچنین برای وجود ضرایب در مدل، از جدول ضرایب استفاده شده است، که بر اساس مقدار Sig و مقدار t به دست آمده از آزمون t-student قضاوت انجام شده است. پس



صدفی سطح بیرونی سنگدانه‌ها، قفل و بست ذرات کمتر بوده و در نتیجه دارای مقاومت پیوستگی پایینی است. بنابراین پیوستگی ایجاد شده در سنگدانه‌های آذرین از نوع فیزیکی بوده و وابسته به تخلخل و زبری بافت سنگدانه، شکل و گوشه داری سنگدانه بوده و سبب قفل و بست اجزای بتن می‌شود. این سنگدانه‌ها با وجود مقاومت بالای سنگ مادر، مقاومت نهایی بتن تحت تاثیر مقاومت پیوستگی قرار گرفته و سبب می‌شود که بتن از ناحیه سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان شکسته شود. نمونه‌های ساخته شده با دولومیت و مرمر به علت مقاومت خوب پیوستگی و مقاومت نسبتاً بالای سنگدانه‌ها، بتن حاصله دارای مقاومت خوبی می‌باشد. در نتیجه سطح شکست بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها موقع شکستن از میان سنگدانه‌ها عبور می‌کند. برای نمونه سنگدانه مرمر به دلیل پیوند قوی در فصل مشترک گزینه مناسبی برای ساخت بتن‌های با مقاومت بالا می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Xie, Y., Corr. D. J., Jin, F., Zhou, H., Shah, S. P., "Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC)", *Cement and Concrete Composites*, Volume 55, January 2015, Pages 223-231
- [2] Shuguang, L., Qingbin, L., "Method of meshing ITZ structure in 3D meso-level finite element analysis for concrete" *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 93, January 2015, Pages 96-106
- [3] Gambhir, M. L., "Concrete technology", Third edition, New Delhi, Tata McGraw-Hill, 1986.
- [۴] نویل، ام.، بروکس، ج.ج.، "خواص بتن"، ترجمه هرمرز فامیلی، انتشارات ابوریحان بیرونی، چاپ اول، تهران، ۱۳۷۸.
- [5] Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C., "Aggregate-Cement paste interface Part II: influence of physical properties", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 10 pp. 1453-1465, 1988.
- [6] Basheer, P., Basheer, L., Lange, D., Long, A.E., "Role of thresholding to determine the size of interfacial transition zone", *ACI Special Publication SP-189*, ACI Spring convention, Chicago, p. 164-86, 1990.
- [۷] شاه‌نظری، محمد، سحاب، محمد باقر، "دستورالعمل آزمایشگاه بتن"، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰، چاپ اول، تهران، ۱۳۷۱.
- [۸] رمضانپور، علی اکبر، طاحونی، شاپور، پیدایش، منصور،

تخلخل و زبری سطح سنگدانه‌ها، بتن به دست آمده دارای مقاومت پیوستگی خوبی است. ولی در این سنگدانه‌ها به دلیل مقاومت پایین سنگ مادر، مقاومت نهایی بتن تحت تاثیر مقاومت سنگ مادر قرار می‌گیرد. در نتیجه سبب می‌شود مقاومت نهایی بتن از مقاومت سنگ مادر فراتر نرود و در محدوده مقاومت سنگ مادر بتن شکسته شود (شکل ۹). نمونه‌های ساخته شده با دولومیت و مرمر به علت مقاومت خوب پیوستگی و مقاومت نسبتاً بالای سنگدانه‌ها، بتن به دست آمده دارای مقاومت خوبی است. در نتیجه سطح شکست بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها موقع شکستن از میان سنگدانه‌ها عبور می‌کند (شکل ۱۰).

پیوستگی ایجاد شده در سنگدانه‌های آذرین از نوع فیزیکی بوده و وابسته به تخلخل و زبری بافت سنگدانه، شکل و گوشه داری سنگدانه بوده و سبب قفل و بست اجزای بتن می‌شود. در سنگدانه‌های رسوبی علاوه بر دارا بودن زبری سطح و گوشه دار بودن شکل سنگدانه‌ها، قدری پیوند شیمیایی نیز وجود دارد که بین هیدرواکسیدهای سیمان با کربنات‌های سنگدانه مرمر و دولومیت (سنگدانه‌های آهکی) انجام می‌شود [۳۷-۳۱].

## ۵- نتیجه گیری

فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان یکی از عوامل مهم در خواص مقاومتی و ویژگی‌های بتن است. نتایج نشان داد که همبستگی مناسبی بین مقاومت تک‌محوری فشاری و کششی بتن و مقاومت فصل مشترک وجود دارد. برای نمونه افزایش مقاومت ناحیه اتصال در سنگدانه‌هایی مانند ماسه‌سنگ، دیوریت و لوماشل به دلیل خواص زبری و شکل مضرس سنگدانه‌ها است. در سنگدانه‌های با مقاومت پایین مثل لوماشل و ماسه سنگ سست، مقاومت نهایی بتن تحت تاثیر مقاومت سنگ مادر قرار می‌گیرد. در نتیجه سبب می‌شود مقاومت نهایی بتن از مقاومت سنگ مادر فراتر نرود و در محدوده مقاومت سنگ مادر بتن شکسته شود. سنگدانه‌های متخلخل و کم مقاومت برای بتن‌های مقاومت بالا با وجود مقاومت پیوستگی خوب، گزینه‌های مطلوبی نیست. از طرفی در سنگدانه‌های آذرین مثل گرانیتی و گنایسی به دلیل بافت صیقلی و شکست

aggregate geochemistry”, *Cement and Concrete Research* 29, 1019–1025, 1999.

[22] ASTM C 289-94, “Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)”, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 865–963, 1990.

[۲۳] مستوفی نژاد، داوود، ((تکنولوژی و طرح اختلاط بتن))،

انتشارات ارکان دانش، چاپ یازدهم، اصفهان، ۱۳۸۵.

[24] BS 1881: 1983 Part 111, “Method of normal curing of test specimens (20°C method)”, London, UK, British Standards Institution, 1990.

[25] Brown, E.T., “Rock characterization testing and monitoring, published for the Commission on Testing Methods”, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press, Oxford, New York, 1981.

[26] BS 812 Part 2, Testing Aggregates Part 2: “Methods of Determination of Density”, London, UK, British Standards Institution, 1995.

[27] BS 812-105: 1989, Part 105, “Methods for Determination of Particle Shape - Section 1: Flakiness Index”, London, UK, British Standards Institution, 1989.

[28] BS 1881: Part 116, “Method for determination of compressive strength of concrete cubes”, London, UK, British Standards Institution, 1983.

[29] BS 1881: 1983 Part 102, “Determination of slump and temperature in fresh concrete”, London, UK, British Standards Institution, 1990.

[30] BS 1881: Part 114, Testing concrete: “methods for determinations of density of harden concrete”, London, UK, British Standards Institution, 1983.

[31] Wu, K.R., Chen, B., Yao, W., Zhang, D., “Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete”, *Cement and Concrete Research* 31, 1421–1425, 2001.

[32] Sidorova, A., Vazquez-Ramonich, E., Barra-Bizinotto, M., Roa-Rovira, J.J., Jimenez-Pique, E., “Study of the recycled aggregates nature’s influence on the aggregate–cement paste interface and ITZ”, *Construction and Building Materials*, Volume 68, 15 October 2014, Pages 677–684

[33] Elices, M., Rocco, C.G., “Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete”, *Engineering Fracture Mechanics* 75, 3839–3851, 2008.

[34] Hussin, A., Poole, C. “Petrography evidence of the interfacial transition zone (ITZ) in the normal strength concrete containing granitic and limestone aggregates” *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 5, May 2011, Pages 2298–2303

[35] Pereira, C.G., Castro-Gomes, J., Oliveira, L.P.D., “Review Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete”, *Construction and Building Materials* 23, 602–608, 2009.

[36] Zhou, C., Li, K., Ma, F., “Numerical and statistical analysis of elastic modulus of concrete as a three-phase heterogeneous composite”, *Computers & Structures*, Volume 139, 15 July 2014, Pages 33–42

[37] Maso, J.C., “Interfacial Transition Zone in Concrete”, Third edition, E & FN Spon, London, UK, 2005.

”دستنامه اجرای بتن”، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه

تهران، چاپ اول، تهران، ۱۳۸۰.

[9] El-Dash, K.M., Ramadan, M.O., “Effect of aggregate on the performance of confined concrete”, *Cement and Concrete Research* 36, 599 – 605, 2006.

[10] Zheng, J.J., Zhou, X.Z.” Effective medium method for predicting the chloride diffusivity in concrete with ITZ percolation effect” *Construction and Building Materials*, Volume 47, October 2013, Pages 1093-1098

[11] Scrivener, K.L., Crumbie, A.K., Pratt, P.L., “A study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete”, bonding in cementitious composites, *Proc Mat Res Soc Sympos*, 114:87–9, 1988.

[۱۲] شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، ۱۳۸۹، ”بررسی تاثیر

کانی شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن” نشریه زمین شناسی

مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، جلد چهارم، شماره دو،

ص. ۹۷۱–۹۸۶.

[۱۳] شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، یزدانی، م.، ۱۳۹۲، ”تأثیر

خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن ”

مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۱

و ۲، ص. ۶۷ تا ۸۲

[14] Rangaraju, P.R., Olek, J., Diamond, S., “An investigation into the influence of inter-aggregate spacing and the extent of the ITZ on properties of Portland cement concretes” *Cement and Concrete Research*, Volume 40, Issue 11, November 2010, Pages 1601-1608.

[15] Jeong, J., Ramézani, H., Leklou, N., “Thermo-chemical heterogeneous hydration gradient modeling of concrete and aggregates size effect on ITZ” *Thermochimica Acta*, Volume 590, 20 August 2014, Pages 165-180.

[16] Sicat, E., Gong, F., Ueda, T., Zhang, D., “Experimental investigation of the deformational behavior of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete during freezing and thawing cycles” *Construction and Building Materials*, Volume 65, 29 August 2014, Pages 122-131

[17] Xiong, G., Liu, J., Li, G., Xie, H., “A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials”, *Cement and Concrete Research* 32, 1877–1881, 2002.

[18] Leemann, A., Loser, R., Münch, B., “Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Composites*, Volume 32, Issue 2, February 2010, Pages 116-120

[19] Beshr, H., Almusallam, A.A., Maslehuddin, M., “Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete”, *Construction and Building Materials* 17, 97–103, 2003.

[20] Alexander, M. G., “TWO EXPERIMENTAL TECHNIQUES FOR STUDYING THE EFFECTS OF THE INTERFACIAL ZONE BETWEEN CEMENT PASTE AND ROCK”, *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*, Vol 23; 567-575, 1993.

[21] Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C., “Aggregate-cement paste interface Part I: Influence of

Research Note:

## Study of Interfacial bond between Aggregate and Cement paste in Concrete

J. Sharifi<sup>1</sup>, M.R. Nikudel<sup>2\*</sup>, M. Yazdani<sup>3</sup>

1- M.Sc. Graduate, Engineering Geology, Tarbiat Modares University

2- Prof. in Engineering Geology, Faculty of Sciences, Tarbiat Modares University

3- Assistant Prof., Civil Engineering, Tarbiat Modares University

nikudelm@modares.ac.ir

### Abstract:

Mechanical and durability properties of concrete depend on paste composition, paste volume, the physical characteristics of aggregate, and the nature of the interfacial transition zone (ITZ). The ITZ is usually regarded as the weakest region in concrete, influencing both mechanical properties and durability, and is the reason why the stress deformation behavior of concrete differs from that of its individual components, i.e., hydrated cement paste and aggregate. The processes responsible for the formation of the ITZ are not well understood. Indirect evidence of the bonding mechanisms due to mechanical interlocking aided by the aggregate surface texture has been established by comparing the bond strength of fractured rock surfaces with that of polished rock surfaces. Due to the importance of interfacial transition zone on the mechanical properties of concrete and the lack of a simple and accurate method of measurement, it is necessary to develop a test for measurement of aggregate-cement paste interface. For this purpose, an apparatus was designed, based on the direct shear test and aggregate-cement paste interface strength of different concrete aggregates was measured. For this purpose, test specimens were preparing in based of direct shear test. Due to the difficulties involved in studying ITZ in normal concrete, laboratory specimens were prepared by casting cement paste on aggregate specimen. The aggregates were sawed into cylinder with height and diameter of 60 mm. A thin layer of cement with the same diameter was applied over aggregate in cylinder mould, and then layer of concrete apply over it. Therefore upper aggregate part was sawed aggregate and the other part consists of concrete and cement paste interlayer. The later procedure was used to prepare all specimens. Based on above discussions, 90 samples were made by ten aggregate types for three curing time. To measure the interfacial force, the shear box was positioned inside the servo-controlled direct shear machine and the specimens after 7, 14 and 28 days of curing in surface saturated-dry condition. The test was carried out using shear box with 30×30 cm<sup>2</sup> dimensions. After carrying out test, The test results of ITZ strength showed values between 1 and 18 MPa at 7, 14 and 28 days. The highest ITZ strength of 15.64 Mpa at 28 curing days was measured in the concrete specimens prepared with the dolomite aggregates while the lowest ITZ strength was in diorite and lumashele aggregates. The result show that, ITZ strength of concrete is strongly influenced by the aggregate properties such as mineralogical source, compressive strength, porosity, water adsorption, shape, and surface texture. Mineralogical source of aggregate caused high degree of hydration in concrete at all ages, but is more appreciable in old age. Shape and surface texture porosity and water adsorption controls ITZ strength of concrete in all ages. Therefore surface texture porosity of aggregate has important in physical interlocking of aggregate with cement paste. Also, mechanical properties of aggregate are important in ITZ strength in all ages, this effect is visible in late age. In order to prepare high-strength concrete, the aggregate with high ITZ strength could be used. Therefore, in high-strength concrete, the aggregate-cement paste interface plays an important role in the strength.

**Keywords:** Concrete; Interfacial Transition Zone (ITZ) strength; Aggregate; Cement paste.