



بررسی اثر تخلخل و وجود حفره بر استحکام تراکمی بتن

ابوذر موحدی منش

کارشناسی مهندسی عمران - راه، کهگیلویه و بویراحمد

* Movahedabozar72@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۹۹ پذیرش: بهمن ماه ۹۹

چکیده

تخلخل و وجود حفره در بتن تأثیر زیادی بر روی استحکام میکروسکوپی این محصول دارد و متناسب با میزان و شدت تخلخل، کشش و استحکام تراکمی بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل و نتایج اطلاعاتی دیگران، ضمن ارائه رابطه بین کشش موثر و استحکام تراکمی بتن با تخلخل براساس مدل تخلخل مرکزی، تابعی برای تأثیر تخلخل از روی نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از این تابع فرمول صریح کشش موثر بتن متخلخل و استحکام تراکمی به دست می‌آیند. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اثر تخلخل بر روی استحکام تراکمی بتن از استحکام کشش بیشتر می‌باشد، همچنین نتایج نشان می‌دهد که استحکام موثر بتن با کاهش سائز تخلخل بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: استحکام تراکمی بتن، کشش موثر، تخلخل، مدل تخلخل مرکزی

۱- مقدمه

بتن متخلخل دارای تخلخل بالاست که یکی از عمده ترین کاربردهای آن اجرای روسازی می باشد. این بتن رواناب و آب باران را از خود عبور می دهد و منجر به کاهش رواناب جاری شده بر سطح زمین و همچنین افزایش سطح آبهای زیرزمینی می شود. بتن متخلخل به طور مرسوم در پارکینگ ها، مناطقی با ترافیک کم، پیاده رو و گلخانه ها مورد استفاده قرار می گیرد. اختلاط بتن متخلخل شامل سیمان پرتلند، پوزولان، درشت دانه های یک شکل سنگی و آب می باشد. در مقایسه با بتن معمولی که دارای ۳ تا ۵ درصد فضای خالی می باشد، فضای خالی و تخلخل این بتن بین ۱۵٪ تا ۲۵٪ است و این فضاهای خالی باید به هم مرتبط باشند تا کانالهایی را ایجاد نمایند که از طریق آن آب به سطوح زیرزمینی نفوذ کند. بتن متخلخل با کاهش رواناب موجب کاهش نیاز به تاسیسات جداگانه ای برای کنترل رواناب یا سیلاب می شود [۱].

بیشتر محققان معمولاً تخلخل را به عنوان تنها فاکتور در مدلسازی متریکال های پایه سیمان مورد استفاده قرار می دهند. در این راستا پاور [۲] تئوری نرخ فضای ژل را برای امتحان استحکام تراکمی سیمان پورتلند پیشنهاد داد. در بیانی دیگر هانسن [۳] فرض کرد که ایرادات بیشتر بر روی یک فضای خالی کروی تمرکز داشته و این استحکام متناسب با ناحیه ژل در برش موربی می باشد. بعلاوه، بسیاری از معادلات نیمه تجربی نیز برای تعیین ارتباط بین استحکام و تخلخل پیشنهاد داده شده اند مانند معادلات توان، ایندکس، خطی و لگاریتمی [۴]. این معادلات از کاربرد فراوانی در تخمین متریکال های متخلخل دارا می باشند [۵]. با این حال، نتایج تحقیقات

تجربی [۶] نشان می‌دهند که این مدل‌های استحکام، برای تخمین به اندازه کافی دقیق نمی‌باشند زیرا نه تنها تخلخل بلکه سایز و اتصال تخلخل‌ها به هم نیز تاثیر زیادی در استحکام دارند.

با اتکا به صحبت‌های صورت گرفته شده، در این مقاله یک مدل ریاضی از استحکام موثر بتن همراه با تاثیر عوامل تخلخل و ارتباط‌های متفاوت موجود بین کشش و استحکام تراکمی با ساختار تخلخل بررسی می‌شود. دقت مدل توسعه یافته در مقایسه با سه روش کلاسیک و آزمایشگاهی تایید می‌شود. در نهایت تاثیر تخلخل و ساختار آن بر روی کشش و استحکام تراکمی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق

میکروسیلیس مورد استفاده (جایگزین سیمان بصورت ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪)، و مدت زمان عمل آوری (۳، ۷، ۲۸ و ۵۶ روز) به عنوان متغیرهای آزمایش‌ها در نظر گرفته شده و از هر طرح مخلوط سه نمونه ساخته شده و مشخصات و خواص مکانیکی نمونه‌ها از جمله مقاومت فشاری و تخلخل سنجی به روش تخلخل سنجی جیوه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزایش مصرف میکروسیلیس (به عنوان جایگزین سیمان) مقاومت فشاری نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های کنترل افزایش یافته و مقدار افزایش مقاومت‌های فشاری برای مصرف میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد ۲۲ درصد نسبت به نمونه‌های کنترل بوده است. همچنین نتایج نشانگر این بودند که با افزایش اندازه پربسامدترین قطر حفرات مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین همبستگی خوبی بین مقاومت فشاری و اندازه پربسامدترین قطر حفرات مشاهده گردید و همچنین یک رابطه خطی بین این دو پارامتر ارایه گردید. شده، مقاومت فشاری، کششی، نفوذ پذیری و مقدار قطر منافذ و توزیع منافذ به روش آزمایش تخلخل سنجی جیوه (MIP) در مدت زمانهای عمل آوری فوق‌الذکر مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

در تحقیق نیلی و صالحی [۸]، بررسی عمل آوری حرارتی (مدلی از عمل آوری مرکز ستون‌های حجیم) و عمل آوری استاندارد، و مقایسه‌ی تأثیر هریک از آنها بر مقاومت فشاری اولیه و درازمدت، و حجم منافذ داخلی بتن‌های مختلف صورت گرفته است. بدین منظور هشت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳ ساخته شد. علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی پوزولان طبیعی به مقدار ۱۵٪ و ۳۰٪، خاکستر بادی به میزان ۱۵٪ و ۲۵٪ و میکروسیلیس به میزان ۵٪، ۸٪ و ۱۱٪ وزنی سیمان انجام شد. از هر طرح مخلوط بتن دو سری نمونه تهیه شده است: نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های حرارتی. نمونه‌ها را پس از قالب‌گیری داخل محفظه‌ی پر از آب قرار داده و سپس تاریخچه‌ی دمای هیدراسیون بر آنها اعمال می‌شود. مشاهده شد عمل آوری حرارتی تأثیر منفی بیشتری بر مقاومت فشاری درازمدت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارد. اما جایگزینی انواع پوزولان‌ها (پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس) در بتن، باعث کاهش میزان جذب آب در نمونه‌های عمل آوری شده در حرارت (نسبت به بتن شاهد) می‌شود.

در پژوهش کوچک زاده و همکاران [۹] به بررسی استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس به عنوان جایگزین درصدی از وزن سیمان در ترکیبات بتن پرداخته شد. علاوه بر آن از الیاف‌های فولادی (۲/۰ و ۳/۰ و ۵/۰ درصد حجمی) و PPS (0/1 و ۱۵/۰ و ۲/۰ درصد حجمی) به منظور بهبود دوام بتن متخلخل استفاده شد. نتایج آزمون‌های بتن‌های حاوی میکرو و نانوسیلیس نشان می‌دهد الیاف نسبت به میکرو و نانوسیلیس تأثیر آنچنانی بر نفوذپذیری و تخلخل نداشته و این در حالی است که با افزایش مقدار میکرو و نانوسیلیس نفوذپذیری و تخلخل به سرعت در حال کاهش می‌باشد.

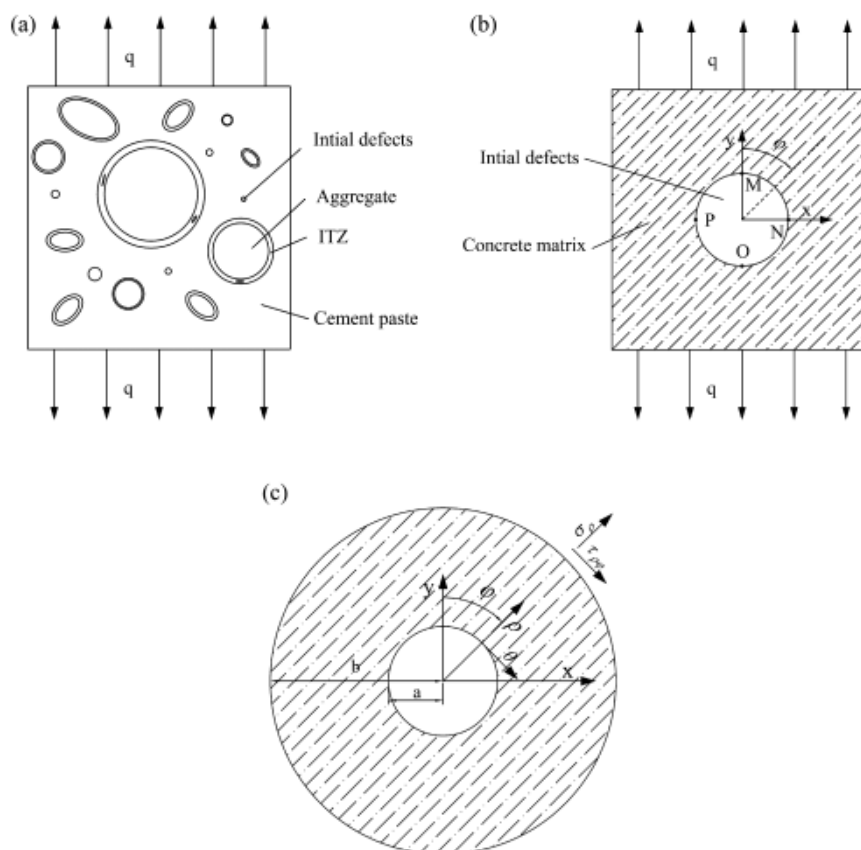
در تحقیق گلونگ و همکاران [۱۰]، ویژگی‌های بتن متخلخل اصلاح شده با مقادیری از مواد پایه جاده معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماسه سنگ می‌تواند قدرت فشرده سازی و دوام بتن متخلخل به عنوان مواد پایه جاده را بهبود بخشد. بتن متخلخل، به خصوص بتن متخلخل اصلاح شده با افزودنی‌های مقاومتر، دارای مزایایی نسبت به سایر مواد پایه جاده ای در زمینه فرسایش و انقباض است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که ماسه سنگ نقطه مشترک بین یک سنگ در بتن متخلخل را تقویت می‌کند. و خاکستر سبک (خاکستر بادی) می‌تواند به طور قابل توجهی تراکم و مقاومت به خشک شدن بتن متخلخل را بهبود بخشد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که تخلخل کل بتن متخلخل یک رابطه خطی با تخلخل موثر و عملکرد دارد و رابطه ای بین

نفوذپذیری و تخلخل موثر وجود دارد. این بتن متخلخل اصلاح شده می تواند به عنوان مسیر پایه جاده برای پروژه های شهری و همچنین بزرگراه استفاده گردد.

در تحقیق دوناگی و همکاران [۶]، ابتدا رابطه بین کشش موثر و استحکام تراکمی بتن با تخلخل براساس مدل تخلخل مرکزی بیان می شود. ثانیاً، برای بررسی بیشتر تاثیر تخلخل، سایز حفره های تخلخل به عنوان فاکتور در نظر گرفته شده و تابعی برای تاثیر تخلخل از روی نتایج آنالیز پیشنهاد می گردد. ضریب تاثیر نهایی سایز تخلخل با ترکیب تابع پخش سایز تخلخل و تابع تاثیر بدست می آید. با در نظر گرفتن ضریب تاثیر نهایی در رابطه بین استحکام موثر و تخلخل، فرمول صریح کشش موثر بتن متخلخل و استحکام تراکمی به دست می آید. با مقایسه رویکرد مقاله با چندین راه حل کلاسیک و آزمایشات قبلی، دقت و امکان پذیری روش حاضر مشخص شده و فرمول های بدست آمده ساده و راحت می باشند. آنالیز و بحث پیشنهاد می دهد که اثر تخلخل بر روی استحکام تراکمی بتن از استحکام کشش بیشتر می باشد و اینکه استحکام موثر بتن با کاهش سایز تخلخل بهبود می یابد.

۳- مدل تخلخل مرکزی ارائه شده

دا و همکاران [۱۱] یک مدل کروی توخالی را برای استحکام مفید بتن متخلخل ارائه داده اند. در این تحقیق فرض شده است که بتن معیوب از فضای خالی مرکزی تشکیل شده است که دور آن ماتریکس بتن بدون تخلخل پوشش می دهد. فرآیند معادل بتن متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- فرآیند انطباق (a) حالت تنش میکرو واحد (b) مدل ساده شده تخلخل مرکزی (c) مدل قطبی معادل b

ابتدا، با توجه به meso-scale، بتن به صورت متریال چهار فاز در نظر گرفته شده است که از توده، سیمان، یک ناحیه گذار (ITZ) و ایرادات ساخته شده است (شکل ۱a). سپس، سه مورد اول به عنوان ماتریکس در نظر گرفته شد اند و ایرادات موجود در سیمان و ITZ در مرکز ماتریکس متمرکز می باشند همانند شکل ۱b. مدل تخلخل مرکزی تحت بار کششی محوری خارجی قرار گرفته و

موقعیت‌های M, N, O و P به ترتیب برای متغیر در شعاع داخلی a می‌باشند. ایرادات شامل ترکها و فضاهای خالی تحت بار خارجی گسترش یافته، منتشر شده و از هم می‌پاشند که مهمترین فاکتوری می‌باشد که منجر به رفتار غیرخطی الاستیک بتن می‌شود. در دیگر تحقیقات انجام شده توسط وونگ [۱۲] و چن و همکاران [۱۳]، عیوب به صورت شانس در بتن توزیع شده اند و تخلخل مورب در حجم بتن در محدوده کوچکی نوسان دارد و به صورت مساوی در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه، تخلخل مورب عموماً برای نشان دادن تخلخل بتن در بررسی خواص مکانیکی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیقات، برش مورب نشانگر با تخلخل متوسط برای بررسی رابطه بین استحکام بتن و تخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. برای راحتی محاسبات، مدل ارائه شده در شکل b_1 به مختصات قطبی تغییر داده شده است همانند شکل c_1 و مبدا مرز تنش براساس تئوری الاستیک [۱۴] به صورت زیر منتقل شده است:

$$\begin{aligned} (\sigma_\rho)_{\rho=b} &= \frac{q}{2} + \frac{q}{2} \cos 2\varphi, \quad (\sigma_\rho)_{\rho=a} = 0, \quad (\tau_{\rho\varphi})_{\rho=b} = -\frac{q}{2} \sin 2\varphi, \\ (\tau_{\rho\varphi})_{\rho=a} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که q مقدار بار محوری کششی خارجی بر حسی مگاپاسکال، زاویه مشخص شده در شکل‌های b_1 و c_1 بوده و ρ و φ به ترتیب راستای شعاعی و محیطی را نشان می‌دهند. براساس اصل سوپر پوزیشن مکانیک الاستیک، شرایط مرزی به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش‌های اول و دوم از شرایط مرزی تنش به صورت زیر می‌باشند.

$$(\sigma_\rho^I)_{\rho=b} = \frac{q}{2}, \quad (\tau_{\rho\varphi}^I)_{\rho=b} = 0, \quad (\sigma_\rho^I)_{\rho=a} = 0, \quad (\tau_{\rho\varphi}^I)_{\rho=a} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_\rho^{II})_{\rho=b} &= \frac{q}{2} \cos 2\varphi, \quad (\tau_{\rho\varphi}^{II})_{\rho=b} = -\frac{q}{2} \sin 2\varphi, \quad (\sigma_\rho^{II})_{\rho=a} = 0, \\ (\tau_{\rho\varphi}^{II})_{\rho=a} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

با حل تقریبی مکانیک الاستیک [۱۴]، تنش‌های شعاعی، محیطی و موربی حلقه معادل با اعمال بخش اول شرایط مرزی تنش به دست می‌آیند. با توجه به بخش ۲ شرایط مرزی تنش، مولفه‌های تنش را می‌توان با مکانیک الاستیک نیمه برعکس بدست آورد [۱۵]. در نتیجه، ماتریکس تنش‌ها که شرایط مرزی هر دو بخش را ارضا می‌کند و تنش‌های شعاعی، محیطی و موربی به صورت ذیل بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{q}{2} \frac{\rho^2 - cb^2}{\rho^2(1-c)} - \frac{q}{(c-1)^3} \left[\frac{4c^2 + c + 1}{2} - 2(c^3 + c^2 + c) \frac{b^2}{\rho^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{3(c^3 + c^2)b^4}{2\rho^4} \right] \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{q}{2} \frac{\rho^2 + cb^2}{\rho^2(1-c)} + \frac{q}{(c-1)^3} \left[-6c \frac{\rho^2}{b^2} + \frac{4c^2 + c + 1}{2} + \frac{3(c^3 + c^2)b^4}{2\rho^4} \right] \cos 2\varphi \quad (5)$$

$$\tau_{\rho\varphi} = \frac{q}{(c-1)^3} \left[-3c \frac{\rho^2}{b^2} + \frac{4c^2 + c + 1}{2} + (c^3 + c^2 + c) \frac{b^2}{\rho^2} - \frac{3(c^3 + c^2)b^4}{2\rho^4} \right] \sin 2\varphi \quad (6)$$

که فاصله از مرکز، a و b به ترتیب شعاع داخلی و بیرونی و پارامتر c تخلخل بتن را نشان می‌دهند. با میل شعاع خارجی b به بی نهایت، مسئله تبدیل می‌شود به فضای بی نهایت که حاوی یک حفره دایروی می‌باشد و معادلات ۴ تا ۶ دقیقاً مانند راه حل Kirsch در مکانیک الاستیک می‌باشند [۱۴].

۴- استحکام کششی موثر بتن متخلخل

استحکام مفید بتن متخلخل نشان دهنده استحکام همگون حجم مورد نظر می‌باشد که بوسیله ساختار تخلخل تعیین می‌شود. بخشی از حفره‌ها تحت بار خارجی تسلیم می‌شوند. زمانیکه تمام حفره‌ها صدمه ببینند، بتن به استحکام نهایی خود می‌رسد. از آنجاییکه

حفره‌ها در مرکز ماتریکس تمرکز دارند، استحکام نهایی بتن بوسیله حفره مرکزی ماتریکس تعیین می‌شود. در این بخش، تخلخل به صورت یک پارامتر غیروابسته معرفی شده است که بدون در نظر گرفتن سائز تخلخل به استحکام بتن ارتباط داده شده است. ماتریکس بتن تا استحکام کششی به صورت خطی الاستیک فرض شده است. معیار تنش کششی بیشینه به عنوان معیار شکست در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، استحکام مفید نهایی بتن متخلخل بوسیله تنش اصلی بیشینه در یک نقطه مشخص از ماتریکس بدست می‌آید. براساس تئوری الاستیسیته [۱۴]، بیشینه مقدار تنش اصلی زمانی که تنش کششی اعمال می‌شود، در نقاط N و P اتفاق می‌افتد و هر دو تنش همانند هم می‌باشند. در نتیجه، فقط نقطه N مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس معادلات ۴ تا ۶، تنش‌های شعاعی و موربی در نقطه N برابر با صفر می‌باشند و بیشینه تنش اصلی تنش محیطی می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_1^N = \frac{q}{1-c} + \frac{2(2c+1)q}{(1-c)^2} = \frac{3(c+1)q}{(1-c)^2} \quad (7)$$

که σ_1^N تنش اصلی بیشینه ماتریکس در نقطه N با اعمال بار کششی می‌باشد. فرض شده است که استحکام کششی ماتریکس در نقطه N برابر است با σ_1^N . آنالیز بالا نشان می‌دهد که نقطه N به استحکام σ_1^N زمانی می‌رسد که بار خارجی اعمالی متناسب با استحکام کششی مفید میکروسکوپی S_t باشد. بنابراین، استحکام کششی مفید S_t بتن با تخلخل C براساس معادله ۷ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$S_t = \frac{(1-c)^2}{3(c+1)} \sigma_{Nt} \quad (8)$$

با رسیدن تخلخل بتن به مقدار صفر، استحکام کششی مفید بتن بدون تخلخل براساس معادله ۷ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$S_{t0} = \frac{\sigma_{Nt}}{3} \quad (9)$$

بنابراین براساس معادلات ۸ و ۹، رابطه عددی بین استحکام کششی مفید و تخلخل به این شکل بیان می‌شود:

$$\frac{S_t}{S_{t0}} = \frac{(1-c)^2}{c+1} \quad (10)$$

استحکام فشاری مفید بتن متخلخل با توجه به استفاده از تنش فشاری در مرز، بیشینه مقدار تنش اصلی بیشینه براساس نظریه الاستیک [۱۴] در نقاط M و O رخ می‌دهد. به طور مشابه، تنها نقطه M برای آنالیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابر معادلات ۴ تا ۶، تنش‌های شعاعی و موربی در نقطه M برابر با صفر می‌باشند و بیشینه تنش اصلی به صورت محیطی می‌باشد که داریم:

$$\sigma_1^M = \frac{q}{1-c} - \frac{2(2c+1)q}{(1-c)^2} = -\frac{(5c+1)q}{(1-c)^2} \quad (11)$$

که σ_1^M تنش اصلی بیشینه در نقطه M در زمان اعمال بار فشاری می‌باشد. فرض شده است که استحکام کششی ماتریکس نقطه M برابر با σ_{Mt} می‌باشد. فرض می‌شود که استحکام نقطه M به مقدار σ_{Mt} برسد اگر بار خارجی اعمال شده برابر با استحکام فشاری مفید میکروسکوپی S_c باشد. بنابراین، استحکام فشاری مفید S_c بتن متخلخل براساس معادله ۱۱ به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$S_c = -\frac{(1-c)^2}{(5c+1)} \sigma_{Mt} \quad (12)$$

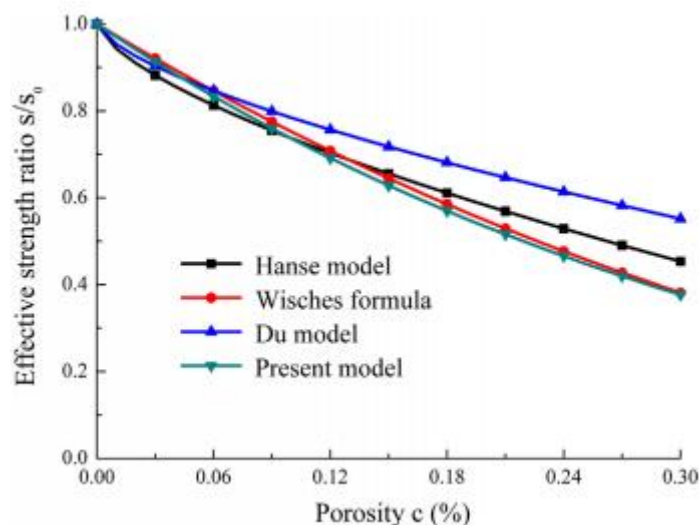
با رسیدن تخلخل بتن به مقدار صفر، استحکام فشاری مفید S_{c0} بتن نامتخلخل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$S_{c0} = -\sigma_{Mt} \quad (13)$$

بنابه معادلات ۱۲ و ۱۳، رابطه عددی بین استحکام فشاری مفید و تخلخل به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{S_c}{S_{c0}} = \frac{(1-c)^2}{5c+1} \quad (14)$$

تأثیر ساختار تخلخل بر روی استحکام فشاری و کششی مفید آزمایشات صورت گرفته توسط دان و همکاران [۱۶]، نشان می‌دهد که بتن با نرخ تخلخل بیشتر و توزیع خلال مناسب، استحکام فشاری بالاتری از خود بروز می‌دهد. چندین مطالعه نشان می‌دهند که تخلخل بتن به لایه C-S-H، تخلخل میکرو و تخلخل ماکرو تقسیم می‌شود و تخلخل C-S-H تأثیر نامطلوبی بر روی استحکام بتن ندارد [۱۷]. استحکام بتن بیشتر تحت تأثیر خلال‌های میکرو و ماکرو می‌باشد و تأثیر خلال‌های بزرگتر بیشتر واضح و مشخص می‌باشد. ساختار خلال بتن پیچیده بوده و سایز خلال بیشتر مشخصات ساختار تخلخل را بیان می‌کند. بر همین اساس، سایز تخلخل به عنوان فاکتور مربوط به ساختار تخلخل در مدل سازی معرفی می‌گردد. با در نظر گرفتن توزیع سایز تخلخل، ضریب تأثیر کل متأثر از سایز تخلخل به صورت زیر با استفاده از تحقیق [۶] بدست می‌آید:



شکل ۲- مقایسه روش حاضر با سه روش کلاسیک [۶]

ابتدا، توزیع سایز تخلخل واقعی در بتن پیچیده می‌باشد. با توجه به اینکه خواص مکانیکی بتن شبیه به توده سنگ می‌باشد، تابع توزیع تخلخل بتن را برای راحتی می‌توان با توده سنگ جایگزین کرد. یک تحقیق [۱۸] نشان می‌دهد که سایز تخلخل توده سنگ متناسب با یک تابع توزیع لگاریتمی می‌باشد به صورت زیر:

$$p(d) = E \exp\left(-\frac{d}{F}\right) \quad (15)$$

که d سایز تخلخل به میلی‌متر بوده و E و F پارامترهای تابع لگاریتمی می‌باشند که مقدار آنها اصولاً توسط نسبت آب سیمان، نسبت شن به سیمان، محتوای کلوخی و نوع بتن [۱۹] تعیین می‌شود که می‌توان از نتایج آزمایشگاهی بدست آورد. ثانیاً، با توجه به آنالیز رابطه خاکستری بین سایز تخلخل و استحکام بتن در تحقیقات، مقادیر گرید ارتباط یک تابع توانی از سایز خلال بوده و خلال‌های بزرگ منجر به کاهش استحکام بتن می‌شود. آنالیز ارتباط خاکستری معیار خوبی برای بیان ارتباط بین فاکتورها بوده [۲۰] و می‌تواند برای تحقیق درباره تأثیر سایز تخلخل بر روی استحکام می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه، ضریب تأثیر زمانی که سایز خلال صفر، برابر مقدار صفر می‌باشد. بنابراین، تابع تأثیر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k(d) = Gd^H \quad (16)$$

که k ضریب تأثیر مرتبط با سایز تخلخل بتن بوده و G و H پارامترهای تابع تأثیر می‌باشند که مقادیر آنها با آزمایشات استحکام بتن و آنالیز ارتباط خاکستری قابل دسترسی می‌باشند.

$$K = \frac{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} k(d)p(d)dd}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} p(d)dd} \quad (17)$$

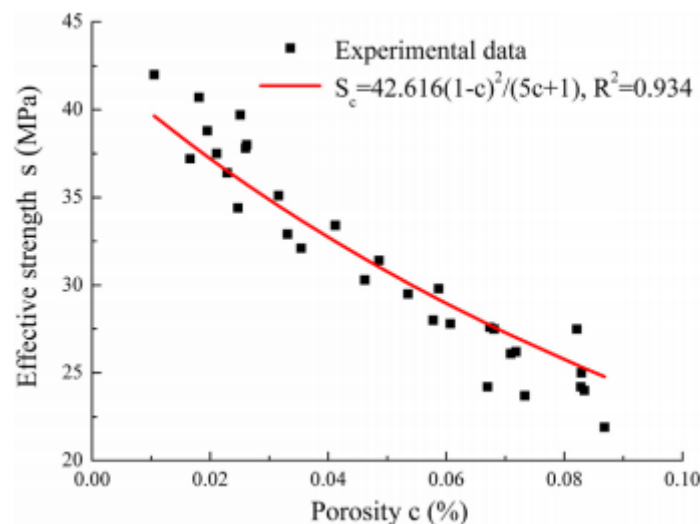
که ضریب تاثیر کل بوده و بوسیله سایز تخلخل بتن محاسبه می شود؛ و d_{\max} و d_{\min} شعاع کمینه و بیشینه خلالها می باشد. بنا به دشوار بودن انتگرالگیری، معادله ۱۷ به صورت زیر جایگزین شده است:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n c_i k_i}{c} \quad (18)$$

که k_i و c_i به ترتیب ضریب تخلخل و تاثیر در دامنه Δm می باشد که محدوده سایز خلال به n قسمت برابر تقسیم شده است. C_i مستقل از توزیع سایز تخلخل می باشد برای مثال $c_i = \int_{d_i}^{d_{i+1}} p(d)dd$ و k_i ضریب تاثیر از میان سایز تخلخل دامنه Δm می باشد. C تخلخل کل می باشد و در نتیجه $C = \sum_{i=1}^n c_i$. زمانی که بازه ها کوچک باشد، معادله ۱۸ بیشتر شبیه به معادله ۱۷ می شود. بنا به معادلات ۱۰ و ۱۴، مقادیر آسیب از کشش بتن و استحکام فشاری ناشی از تخلخل را می توان با $D_t = 1 - \frac{(1-c)^2}{c+1}$ تعیین کرد. تاثیر سایز تخلخل بر روی استحکام مفید با ضرب مقدار آسیب در ضریب تاثیر کل K ، حساب می شود و کشش مفید و استحکام فشاری بتن به صورت زیر بیان می شوند:

$$\frac{S_t}{S_{t0}} = 1 - KD_t = 1 - K \left[1 - \frac{(1-c)^2}{c+1} \right] \quad (19)$$

$$\frac{S_c}{S_{c0}} = 1 - KD_c = 1 - K \left[1 - \frac{(1-c)^2}{5c+1} \right] \quad (20)$$

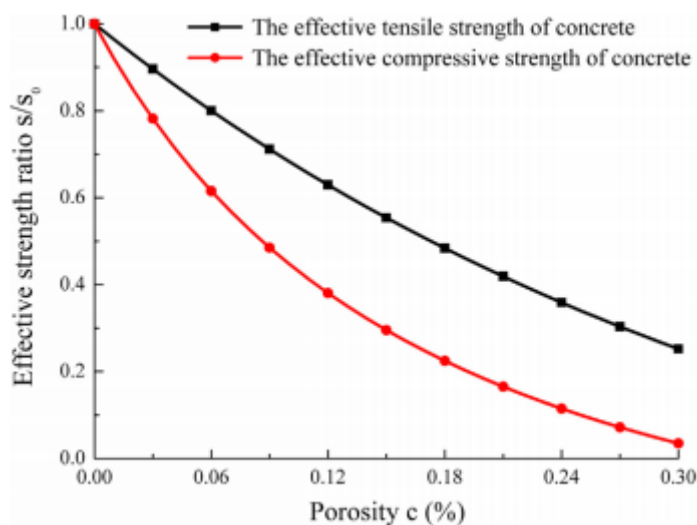


شکل ۳- مقایسه بین مقاومت بدون در نظر گرفتن تخلخل با مشاهدات آزمایشگاهی [۶]

۵- بحث و بررسی

تاثیر تخلخل بر کشش و استحکام فشاری مفید متفاوت می باشد. بنابراین، ضریب تاثیر کل K باقی مانده است و رابطه بین تخلخل، کشش و استحکام فشاری مفید در شکل ۴ مورد آنالیز قرار گرفته است [۶]. در شکل ۴ مشاهده می گردد که با ثابت تاثیر کل برابر با ۱/۲، با افزایش تخلخل، استحکام فشاری و کششی مفید کاهش می یابند و استحکام فشاری همواره کمتر از استحکام کششی می باشد. این نشان می دهد تاثیر تخلخل بر روی استحکام فشاری بیشتر از کششی بوده که با نتایج چن [۱۳] مطابقت دارد. دلیل این

پدیده این است که تنش در اطراف خلال هنگام اعمال بار خارجی، سریعتر افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل‌های کلاسیک، که رابطه بین تخلخل، کشش و استحکام فشاری بتن را مشخص نمی‌کنند ممکن است دقت لازم در تخمین استحکام فشاری بتن را نداشته باشند.



شکل ۴- تاثیر تخلخل بر روی مقاومت کششی و فشاری مفید بتن

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با اتکا به نتایج مطالعاتی دیگران، با در نظر گرفتن روابط مختلف بین کشش مفید و استحکام فشاری مفید و تخلخل و همچنین تاثیر سائز تخلخل بر روی مقاومت، فرمولهای مشخصی برای کشش مفید میکروسکوپی و استحکام فشاری بتن متخلخل بدست آمدند. راه حل‌های آنالیزی ارائه شده با راه حل‌های کلاسیکو مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شده اند. نتایج نشان می‌دهند که روابط بدست آمده برای بررسی تخلخل و مقاومت بتن دقیق و منطقی بوده اند. مقاومت بتن با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد و این کاهش برای مقاومت فشاری بیشتر از کششی می‌باشد. مقاومت مفید بتن را می‌توان با کاهش سائز تخلخل افزایش داده و بهبود بخشید.

۷- قدردانی

تقدیم به پدرم همان معلم دلسوز و تقدیم به مادرم همان که چگونه پاک بودن و صداقت را توشه راهم کرد.

۸- مراجع

- آنتیک هنزایی، سعیده، ۱۳۹۴، بتن متخلخل، سومین همایش ملی مصالح ساختمانی و فناوری های نوین در صنعت ساختمان، میبد.
- Z.H. Shui, X.S. Wei, D.M. Wang, Modern Concrete Science and Technology, Science Press, Beijing, China, 2014, pp. 25–28. 142–173.
- T.C. Hansen, Cracking and fracture of concrete and cement paste, J. Am. Concr. Inst. 20 (1968) 43–46.
- M.Y. Balshin, Relation of mechanical properties of powder metal and their porosity and the ultimate properties of porous metal ceramic materials, Dokl. Akad. Nauk. SSSR. 67 (5) (1949) 831–834.
- E.P. Kearsley, P.J. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, Cem. Concr. Res. 32 (2) (2002) 233–239.
- Dongqi Li, Zongli Li, Congcong Lv, Guohui Zhang, Yueming Yin, A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size, Construction and Building Materials Volume 170, 10 May 2018, Pages 520-526.

۷. نادری زرنقی، وهاب و فروغی اصل، علی و نورانی، وحید، ۱۳۹۶، بررسی همبستگی مقاومت فشاری و پرسامدترین اندازه تخلخل بتن سبک خودتراکم با آزمایش تخلخل سنج جیوه ای، نهمین کنفرانس ملی بتن، قرچک.
۸. محمود نیلی، امیرمسعود صالحی، بررسی تغییرات مقاومت فشاری و تخلخل در هسته‌ی سازه‌های بتنی حجیم با مقاومت زیاد، دوره ۲-۲۸، شماره ۱ - شماره پیاپی ۱ مهندسی عمران فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۱ صفحه ۱۰۱-۱۰۹.
۹. محمد کوچک زاده فرا، مرتضی حسینعلی بیگی مرتضی حسینعلی بیگی، امیر مدرس امیر مدرس، بررسی تجربی نفوذپذیری و تخلخل بتن متخلخل روسازی مسلح به الیاف، دومین همایش بین المللی معماری، عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم - ۱۳۹۵.
10. Gelong Xua, Weiguo Shena, Xujia Huoa, Zhifeng Yangd, Jing Wange, Wensheng Zhange, Xiaoli Ji, Investigation on the properties of porous concrete as road base material, *Construction and Building Materials*, 141-148, 2018.
11. X.L. Du, L. Jin, G.W. Ma, Macroscopic effective mechanical properties of porous dry concrete, *Cem. Concr. Res.* 44 (2013) 87-96.
12. R.C.K. Wong, K.T. Chau, Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1566-1576.
13. J.X. Chen, X.H. Deng, Y.B. Luo, L.C. He, Q. Liu, X. Qiao, Investigation of microstructural damage in shotcrete under a freeze-thaw environment, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 275-282.
14. Z.L. Xu, *Elasticity*, Higher Education Press, Beijing, China, 2006, pp. 54-77.
15. Y.Z. Zhang, *Elastic mechanics and finite element method*, Chinese Railway Publishing House, Beijing, China, 1983, pp. 155-157.
16. P. Duan, W. Zhou, C. Yan, Investigation of pore structure and ITZ of concrete blended with mineral admixtures in a seawater environment, *Mag. Concr. Res.* 67 (15) (2015) 812-820.
17. M.P. Kumar, P.J.M. Monteiro, *Concrete Microstructure Properties and Materials* (Translated by W.Z. Qin, et al.), China Electric Power Press, Beijing, China, 2008, pp. 20-21.
18. Y. Ju, Y.M. Yang, Z.D. Song, W.J. Xu, A statistical model for porous structure of rocks, *Sci. China. Ser. E.* 51 (11) (2008) 2040-2058.
19. A.S. Agar-Ozbek, J. Weerheijm, E. Schlangen, K.V. Breugel, Investigating porous concrete with improved strength: testing at different scales, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 480-490.
20. Y.J. Zhang, X. Zhang, Grey correlation analysis between strength of slag cement and particle fractions of slag powder, *Cem. Concr. Res.* 29 (2007) 498-504.