

## 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 تاثیر زیادی بر روی استحکام میکروسکوپی و در نتیجه استحکام تراکمی بتن را تحت تاثیر قرار می دهد. 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 تاثیر تخلخل از روی نتایج بدست آمده پیشنهاد می گردد. با استفاده از این تابع فرمول صریح کشش موثر بتن متخلخل و استحکام تراکمی به دست می آید. نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که اثر تخلخل بر روی استحکام تراکمی بتن از استحکام کشش بیشتر می باشد، همچنین نتایج نشان می دهد که استحکام موثر بتن با کاهش سائز تخلخل بهبود می یابد.

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 مترالهای 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 متریکال‌های متخلخل دارا می‌باشند [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.

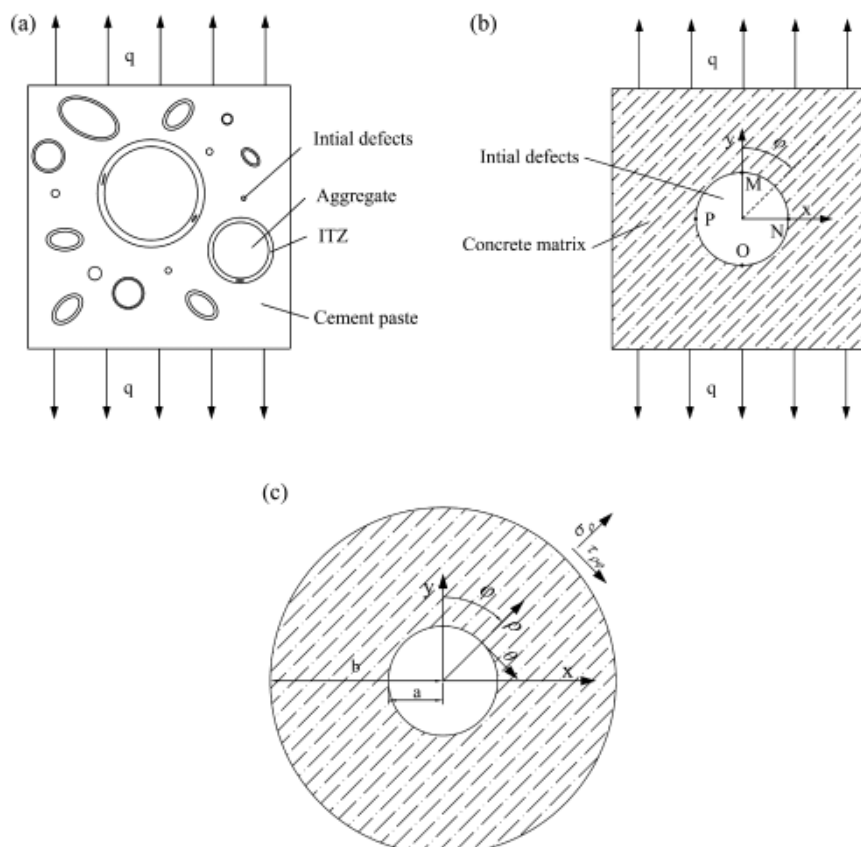
در تحقیق گلونگ و همکاران [۱۰]، ویژگی‌های بتن متخلخل اصلاح شده با مقادیری از مواد پایه جاده معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ماسه سنگ می‌تواند قدرت فشرده سازی و دوام بتن متخلخل به عنوان مواد پایه جاده را بهبود بخشد. بتن متخلخل، به خصوص بتن متخلخل اصلاح شده با افزودنی‌های مقاومتر، دارای مزایایی 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 می دهد 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

ابتدا، با توجه به meso-scale، بتن به صورت متریک 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 فضاهاى خالی تحت بار خارجی گسترش یافته، منتشر شده و از هم می‌باشند 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 شانسى 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  $\rho$  و  $\varphi$  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 راه‌حل Kirsch در مکانیک الاستیک می‌باشند [۱۴].

#### ۴- استحکام کششی موثر بتن متخلخل

استحکام مفید بتن متخلخل نشان دهنده استحکام همگون حجم مورد نظر می باشد که بوسیله ساختار تخلخل تعیین می شود. بخشی از حفره ها تحت بار خارجی تسلیم می شوند. زمانیکه تمام حفره ها صدمه ببینند، بتن به استحکام نهایی خود می رسد. از آنجاییکه حفره ها در مرکز ماتریکس تمرکز دارند، استحکام نهایی بتن بوسیله حفره مرکزی ماتریکس تعیین می شود. در این بخش، تخلخل به صورت یک پارامتر غیروابسته معرفی شده است که بدون در نظر گرفتن سایز 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 می شود. بنابراین، استحکام مفید نهایی بتن متخلخل بوسیله تنش اصلی بیشینه در یک نقطه مشخص از ماتریکس بدست می آید. براساس تئوری الاستیسیته [۱۴]، بیشینه مقدار تنش اصلی زمانیکه تنش کششی اعمال می شود، در نقاط  $N$  و  $P$  اتفاق می افتد و هر دو تنش همانند هم می باشند. در نتیجه، فقط نقطه  $N$  مورد بررسی قرار می گیرد. براساس معادلات ۴ تا ۶، تنش های شعاعی و موربی در نقطه  $N$  برابر با صفر می باشند و بیشینه تنش اصلی تنش محیطی می باشد که به صورت زیر بیان می شود:

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

که  $\sigma_1^N$  تنش اصلی بیشینه ماتریکس در نقطه  $N$  با اعمال بار کششی می باشد. فرض شده است که استحکام کششی ماتریکس در نقطه  $N$  برابر است با  $\sigma_1^N$ . آنالیز بالا نشان می دهد که نقطه  $N$  به استحکام  $\sigma_1^N$  زمانی می رسد 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 می آید:

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

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

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

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

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

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 می دهد. به طور مشابه، تنها نقطه  $M$  برای آنالیز مورد بررسی قرار می گیرد. بنابر معادلات ۴ تا ۶، تنش های شعاعی و موربی در نقطه  $M$  برابر با صفر می باشند و بیشینه تنش اصلی به صورت محیطی می باشد 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  $\sigma_1^M$  تنش اصلی بیشینه در نقطه  $M$  در زمان اعمال بار فشاری می باشد. فرض شده است که استحکام کششی ماتریکس نقطه  $M$  برابر با  $\sigma_{Mt}$  می باشد. فرض می شود که استحکام نقطه  $M$  به مقدار  $\sigma_{Mt}$  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 می شود:

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

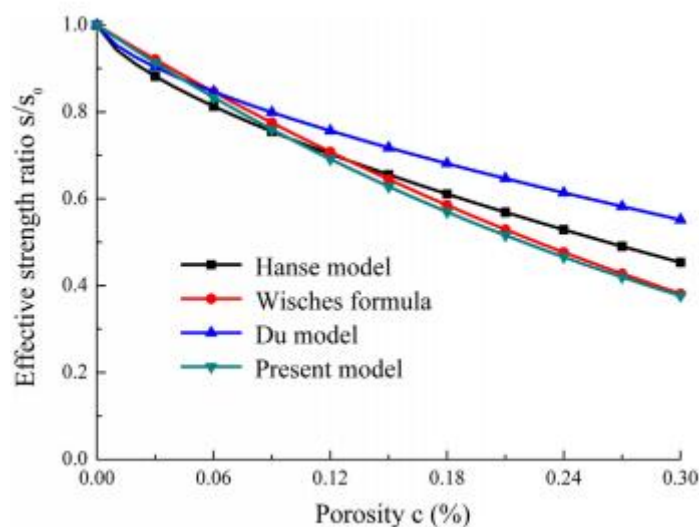
با رسیدن تخلخل بتن به مقدار صفر، استحکام فشاری مفید  $S_{c0}$  بتن نامتخلخل به صورت زیر حاصل می شود:

$$Arch \dot{S}_{c0} = -\sigma_{Mt} \quad (13)$$

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

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

تاثیر 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 تاثیر نامطلوبی بر روی استحکام بتن ندارد [۱۷]. استحکام بتن بیشتر تحت تاثیر خلال‌های میکرو و ماکرو می‌باشد و تاثیر خلال‌های بزرگتر بیشتر واضح و مشخص می‌باشد. ساختار خلال بتن پیچیده بوده و سائز خلال بیشتر مشخصات ساختار تخلخل را بیان می‌کند. بر همین اساس، سائز تخلخل به عنوان فاکتور مربوط به ساختار تخلخل در مدل سازی معرفی می‌گردد. با در نظر گرفتن توزیع سائز تخلخل، ضریب تاثیر کل متاثر از سائز تخلخل به صورت زیر با استفاده از تحقیق [۶] بدست می‌آید:



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

ابتدا، توزیع سائز 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 سائز 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  $d$  سائز 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 سائز تخلخل و استحکام بتن در تحقیقات، مقادیر گرید ارتباط یک تابع توانی از سائز 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 تاثیر سائز تخلخل بر روی استحکام می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه، ضریب تاثیر زمانی که سائز خلال صفر، برابر مقدار صفر می‌باشد. بنابراین، تابع تاثیر به صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

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

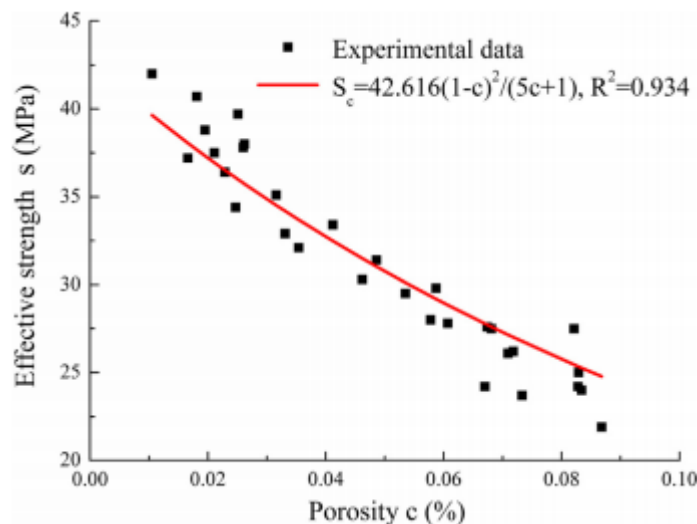
که  $K$  ضریب تاثیر کل بوده و بوسیله سایز تخلخل بتن محاسبه می‌شود؛ و  $d_{\max}$  و  $d_{\min}$  شعاع کمینه و بیشینه خالها می‌باشند. بنا به دشوار بودن انتگرالگیری، معادله ۱۷ به صورت زیر جایگزین شده است:

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

که  $k_i$  و  $c_i$  به ترتیب ضریب تخلخل و تاثیر در دامنه  $i$ ام می‌باشد که محدودده سایز خلال به  $n$  قسمت برابر تقسیم شده است.  $C_i$  مستقل از توزیع سایز تخلخل می‌باشد برای مثال  $c_i = \int_{d_i}^{d_{i+1}} p(d)dd$  و  $k_i$  ضریب تاثیر از میان سایز تخلخل دامنه  $i$ ام می‌باشد.  $C = \sum_{i=1}^n c_i$  در نتیجه  $C_i = \sum_{i=1}^n c_i$  زمانی که بازه‌ها کوچک باشد، معادله ۱۸ بیشتر شبیه به معادله ۱۷ می‌شود. بنا به معادلات ۱۰ و ۱۴، مقادیر آسیب از کشش بتن و استحکام فشاری ناشی از تخلخل را می‌توان 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 می‌شود و کشش مفید و استحکام فشاری بتن به صورت زیر بیان می‌شوند:

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

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



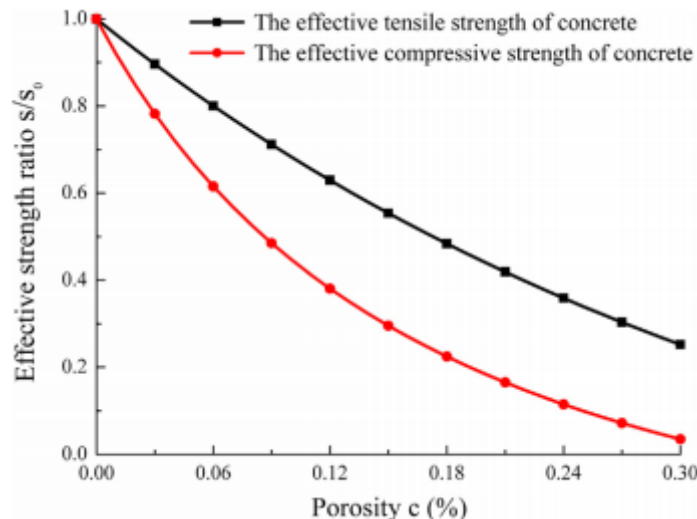
شکل ۳- مقایسه بین مقاومت بدون در نظر گرفتن تخلخل با مشاهدات آزمایشگاهی [۶]

## ۵- بحث و بررسی

تاثیر تخلخل بر کشش و استحکام فشاری مفید متفاوت می‌باشد. 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 می‌گردد که با ثابت تاثیر کل برابر



با ۱/۲، با افزایش تخلخل، استحکام فشاری و کششی مفید کاهش می‌یابد و استحکام فشاری همواره کمتر از استحکام کششی می‌باشد. این نشان می‌دهد 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 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

۱. آنتیک هنزایی، سعیده، ۱۳۹۴، بتن متخلخل، سومین همایش ملی مصالح ساختمانی و فناوری های نوین در صنعت ساختمان، میبد.
2. Z.H. Shui, X.S. Wei, D.M. Wang, Modern Concrete Science and Technology, Science Press, Beijing, China, 2014, pp. 25–28. 142–173.
3. T.C. Hansen, Cracking and fracture of concrete and cement paste, J. Am. Concr. Inst. 20 (1968) 43–46.
4. 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.
5. E.P. Kearsley, P.J. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, Cem. Concr. Res. 32 (2) (2002) 233–239.



6. 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 پرسیامدترین 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 پایپی ۱ مهندسی عمران فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۱ صفحه ۱۰۱-۱۰۹.

۹. محمد کوچک زاده قرا، 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.