تاثیر دانه‌بندی سنگدانه‌های بتن متخلخل در میزان نفوذپذیری و عکس‌العمل در برابر بار گسترده یکنواخت رویه‌ها

محمدمهدی خبیری[1]، محمدمهدی مجیدی‌شاد[2]

۱- عضوهیئت علمی دانشکده مهندسی عمران،دانشیار راه وترابری،پردیس فنی ومهندسی،دانشگاه یزد،یزد،ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران،راه وترابری، دانشکده مهندسی عمران،پردیس فنی ومهندسی،دانشگاه یزد،یزد،ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (mkhabiri@yazd.ac.ir)

چکیده

بتن متخلخل به عنوان، بتن دارای فضای خالی زیاد برای زهکشی آب‌های سطحی و کاهش آلودگی صدا در کف‌سازی و محوطه‌سازی و معابر با ترافیک سبک قابل استفاده است. مصالح سنگدانه‌ای این نوع بتن بدون ریزدانه و یا با کمترین مقدار است. مقاومت فشاری کم این نوع بتن عملکرد آن در برابر بارگذاری را با مشکل مواجه نموده است. نوع ویژه دانه‌بندی که ریزدانه کم یا دانه‌بندی یکنواخت، فضای خالی پیوسته بین اجزاء مخلوط را به وجود می‌آورد. در مطالعه حاضر بنا به نتایج آزمایشگاهی موجود در مورد تاثیر سنگدانه‌های با اندازه‌های مختلف، بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و میزان تخلخل اندازه‌گیری شده، مطالعه عددی با مدلسازی نرم افزاری انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت دال بتن متخلخل مقدار کرنش کششی بحرانی زیر دال در رویه بتنی تا ۳۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. با توجه به میزان نفوذپذیری مورد نظر بتن متخلخل به تحمل کرنش کششی، بهترین گزینه در انتخاب رویه‌های بتنی، دانه‌بندی درشت‌دانه کاملاً یکنواخت است. همچنین استفاده از مصالح میان دانه یکنواخت و در کل، یکنواختی مصالح، به شدت باعث افزایش نفوذپذیری و تخلخل موجود در بتن متخلخل می‌گردد. مصالح کاملاً درشت و یکنواخت بیشترین درصد فضای خالی و نفوذپذیری را به خود اختصاص داده است. همچنین نتایج تاکید دارد، که در یک ضخامت ثابت بیشترین کرنش مربوط به دانه‌بندی طرح شماره ۳ است، که اندازه‌ی سنگدانه‌های طرح مخلوط بین ۱۲/۵-۵/۵ میلی‌متر بوده است.

کلمات کلیدی: **مصالح سنگدانه‌ای، طرح اختلاط،بتن متخلخل،کرنش بحرانی،رویه بتنی،نفوذپذیری.**

۱. مقدمه

مخلوط بتنی متخلخل یا نفوذپذیر به عنوان یک مخلوط پرکاربرد در کاهش آلودگی صدا و نیز زهکشی بارش‌های سطحی در مناطق با بارندگی زیاد مطرح است. اقلیم متفاوت در پهنه‌ی جغرافیایی وسیع کشور به گونه‌ای است که کاربرد این نوع مخلوط در مناطق ساحلی و با بارش‌های زیاد را ممکن ساخته است. اگرچه پارامترهای مختلفی در عملکرد موثرتر این نوع مخلوط موثرند، اما دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای در میزان نفوذپذیری و پارامتر مقاومت فشاری بتن تاثیر زیادی دارد. در رابطه با استفاده از مصالح متنوع نظیر ضایعات طبیعی و مصنوعی مختلف در طرح اختلاط و عملکرد مقاومتی و نفوذ پذیری آن مطالعات متنوعی صورت گرفت است. ولی در خصوص دانه‌بندی و ابعاد سنگدانه‌ها و ویژگی یکنواختی و غیر یکنواختی دانه‌بندی مصالح سنگی بر عملکرد مخلوط، مطالعات محدودی انجام شده است. در عملیات‌های اجرایی و پروژه‌های کاربردی گوناگون نظیر پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، مسیرهایی با ترافیک کم و سبک و معابر داخلی، ساختمان‌های مسکونی و اداری استفاده کرد. همانگونه که بیان شد نوع ویژه دانه‌بندی که ریزدانه کم یا دانه‌بندی یکنواخت، فضای خالی پیوسته بین اجزاء مخلوط را به وجود می‌آورد و این واقعیت مورد پذیرش محققین است که مقاومت و مدول الاستیسیته بتن حاصله کمتر از بتن رایج است. لذا در این تحقیق علاوه بر بررسی منابع علمی موجود در خصوص عملکرد و طرح اختلاط بتن متخلخل با کمک نتایج آزمایش‌های موجود از این نوع بتن ساخته شده با ۵ طرح دانه‌بندی مختلف، اثر هر یک از آنها بر مقاومت رویه ساخته شده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. محاسبه عکس العمل دال ساخته شده

با کمک نرم افزار المان محدود سه بعدی در محدوده‌ی الاستیک انجام می‌شود و حالت‌های مختلف دانه‌بندی و ضخامت دال به عنوان متغیرهای اصلی این مطالعه مورد توجه قرار می‌گیرند. هدف از بررسی‌های تعریف شده مقایسه دانه‌بندی مختلف و مقایسه بین تاثیرگذاری ضخامت دال بتنی رویه معابر و طرح دانه‌بندی ممکن و مطرح است، که با شناسایی عامل مهم‌تر، در مشخصات فنی طراحی و کنترل آن در اجزاء عملکرد زیرساخت به وجود آمده، مناسبتر شود.

۲. مرور منابع

نوع ویژه‌ای از بتن با تخلخل و فضای آزاد زیاد را بتن متخلخل می‌شناسند که کاربرد ویژه‌ی آن در روسازی‌های بتنی است. حمل و نقل جاده‌ای بخش عمده‌ای از جابجایی‌های کالا و مسافر را انجام می‌دهد. بتن متخلخل به عنوان یک نوع روسازی صلب که مزایای فراوانی از قبیل نفوذپذیری، فیلتراسیون آب‌های جاری و انتقال آب‌های بارش سطحی به لایه‌های زیرین زمین، باعث شده است بیشتر مورد توجه قرار گیرد. مطالعات مختلفی از دیدگاه‌های گوناگون بر روی بتن متخلخل انجام شده است، به عنوان نمونه رستمی و بهرامی با کمک یک سری مطالعات آزمایشگاهی بر روی چندین سنگدانه با دانه‌بندی و جنس مختلف انجام دادند [۱]. در مطالعه دیگری به ضعف روسازی‌های معمول پرداخته شده است و اشاره می‌شود که روسازی‌های بتنی معمول مسئله تولید صدا و نیز مشکل زهکشی دارند که لازم است با استفاده از طرح اختلاط بتن متخلخل مسئله زهکشی و کاهش صدای تولیدی کاهش یابد. از طرف دیگر بتن متخلخل مشکل کاهش مقاومت را با افزایش فضای خالی دارد [۲]. در خصوص کاربرد بتن نفوذپذیر در مناطق مسکونی در کشور، مطالعه‌ای با عنوان، بررسی آزمایشگاهی اثر پودرهای ضایعاتی سیلیس و زغال سنگ بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتن متخلخل انجام شده که در نتایج آن مشخص شده که افزودنی‌های ضایعات زغال‌سنگ و پودر سیلیس در جهت مخالف یکدیگر و متفاوت از هم داشته‌اند، به طوری که با افزایش ۱۰درصد پودر ضایعات زغال سنگ، مقاومت فشاری را ۷۳ درصد افزایش، در حالی که پودر ضایعاتی سیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل را کاهش داده است [۳].

در کاربرد دیگری از بتن متخلخل به عنوان رویه‌های سطحی در شهرهای کشور، استفاده از ضایعات مختلف و پسماندهای ساختمانی در تولید این نوع بتن جهت کاربرد در سطح شهر تبریز مطرح شده است که مزیت این طرح علاوه بر افزایش بازدهی زهکشی سریع مسیر، باز استفاده و بازیافت مصالح ساختمانی ضایعاتی می‌باشد [۴]. در مطالعه دیگری به بررسی تجربی و تخلخل بتن تراوا روسازی مسلح به الیاف پرداخته شده است، که با استفاده از میکروسیلیس و نانو سیلیس به عنوان جایگزین درصدی از وزن سیمان در ترکیبات بتن پرداخته شده است. علاوه بر آن از الیاف فولادی با درصدهای حجمی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد استفاده شده که نتایج نشان می‌دهد استفاده از الیاف تاثیر چندانی بر تخلخل و تراوایی بتن به دست آمده نداشته، در حالی که استفاده از سیلیس در مقیاس پودر یا نانو باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن تراوا شده است [۵-۷]. در خصوص ابعاد سنگدانه‌ها در بتن متخلخل مطالعه‌ای با عنوان، ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی بتن متخلخل با توجه به نحوه دانه‌بندی و اندازه سنگدانه‌ها در سال ۱۳۹۵، انجام شده است، که در این مطالعه ۵ طرح اختلاط با اندازه سنگدانه‌های متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها، مقاومت کاهش یافته و نفوذپذیری و تراوایی بتن افزایش می‌یابد. همچنین نوع سیمان به ابعاد سنگدانه‌ها ویژگی‌های مختلف بتن متخلخل را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۶]. رمضانیان پور و همکاران، در مطالعه‌ای با عنوان تاثیر دانه‌بندی و اندازه سنگدانه‌ها در بتن متخلخل، عملکرد مکانیکی و مقاومت فشاری این بتن را مورد بررسی قرار دادند و تاثیر اندازه سنگدانه‌ها را بر روی ویژگی‌های مقاومتی و نفوذپذیری نشان دادند [۷].

یکی دیگر از کاربردهای بتن متخلخل استفاده از این نوع بتن در صنایع ساختمانی است که با نام تجاری «فرم بتن» شناخته می‌شود. در مطالعه‌ای تاثیر کاربرد الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری فرم بتن را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این الیاف به طول متوسط ۱۲ میلی‌متر و وزن ۰/۳ کیلوگرم در هر مترمکعب در بتن مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۸]. بتن متخلخل اجازه می‌دهد آب از آن عبور کند منابع آب زیرزمینی را تغذیه کند و مصالح سنگی، تشکیل دهنده‌ی آن سنگدانه درشت، مقدار کم یا فاقد ریزدانه،آب و مواد افزودنی می‌باشد، که این عناصر در نهایت بتن با حفرات مرتبط را تولید می‌کنند، که در بسیاری از مراجع علمی کاربردهای متفاوت آن از جمله در روسازی بتنی بیان می‌کنند[۱۳-۹]. البته در بین مطالعات متنوع منتشر شده در سطح بین‌الملل، می‌توان به استفاده از از روش طرح آزمایش‌های تاگوچی در بررسی پارامترهای مختلف بر عملکرد بتن متخلخل پرداخت، نتیجه مطالعه‌ی مورد اشاره بیان می‌کند هرچه حداکثر اندازه درشت‌دانه افزایش یابد، نفوذپذیریی و تخلخل نیز افزایش می‌یابد و مقدار قابل توجهی از مقاومت فشاری کاسته می‌شود که لازم است بین مقاومت و نفوذپذیری رابطه‌ای برقرار نمود که نفوذپذیری و مقاومت فشاری در طول دوره عمر آن از مقدار حداقل کمتر نشود [۱۴]. در یک مطالعه موردی منتشر شده به موضوعاتی از قبیل خواص مکانیکی و هیدرولیکی و دوام بتن متخلخل در رویه راه‌های فرعی پرداخته شده است ونیز هزینه چرخه عمر به عنوان معیار انتخاب بهینه این روسازی توجه شده است [۱۵]. کاربرد انواع مواد بازیافتی و ضایعات طبیعی و مصنوعی در عملکرد روسازی بتنی مورد توجه محققین در مطالعات مختلف بوده است. عملکرد رویه بتنی حاوی خاکستر پوسته برنج در

مقاومت خمشی و مقاومت کششی مورد توجه ابرهایم و همکاران قرار گرفته است به طوری که در مقیاس نانو این خاکستر باعث بهبود خواص مکانیکی روی بتنی می‌شود و مقدار بهینه استفاده آن به صورت جایگزین سیمان به اندازه ۱۰ درصد وزن آن است [۱۶]. کاربرد انواع ضایعات و نخاله‌های ساختمانی با ابعاد درشت در تولید بتن متخلخل سبز مورد مطالعه‌ی یاپ (Yap) و همکاران قرار گرفته است، نتایج مطالعه نامبرده نشان می‌دهد که به طور متوسط مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی مصالح درشت دانه بازیافت شده (RCA)[۱] کمتر از نمونه‌های شاهد است و یا مقاومت در برابر لغزش و صیقل خوردگی در حد مناسب است [۱۷]. در راستای حفظ محیط زیست نیز گاز co_2 تولیدی به میزان ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات سایش سطحی بتن متخلخل –تراوا– نشان می‌دهد هرچه فضای خالی بیشتر باشد یا نسبت سیمان در مخلوط کمتر، میزان سایش سطحی افزایش می‌یابد[۱۸]. در مجموع مطالعات بررسی شده نشان می‌دهد به موضوع تاثیر اندازه سنگدانه‌های بتن متخلخل به صورت مدل عددی در تحلیل عملکرد روسازی پرداخته نشده است.

۳. مبانی علمی و محاسبه درصد فضای خالی بتن

فضای خالی در بتن‌های متخلخل بسته به محل کاربرد و هدف از اجرای آن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد است. که بنا به ضرورت و نفوذ بیشتر مورد نیاز به ۳۵ درصد نیز افزایش می‌یابد، که پیوستگی درونی بین این فضاهای خالی وجود دارد و این امر اجازه حرکت آب بین اجزاء بتن را می‌دهد. میزان فضای خالی طبق رابطه (۱) قابل محاسبه است[۹].

$$V(\%)=\left[۱-\left(\frac{D_d}{D_i}\right)\right]\times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

که در آن؛

D_d: وزن مخصوص (دانسیته) نمونه خشک شده در آون،

D_i: وزن مخصوص نمونه اشباع کامل است.

درصد فضای خالی زیاد باعث کاهش مقاومت می‌شود، به طوری که وقتی فضای خالی بتن در محدوده ۱۵ تا ۲۵ درصد قرار داشته باشد، مقاومت فشاری بیش از ۱۳۵ کیلوگرم نیز می‌تواند داشته باشد. طبق گزارش مرکز ملی فناوری روسازی‌های بتنی آمریکا[۲](NCPTC) که به عنوان طرح مخلوط بتن نفوذپذیر برای مناطق سردسیر منتشر شده است، روابط بین فضای خالی درونی بتن متخلخل و مقاومت فشاری بتن از رابطه (۲) و(۳) پیروی می‌کند.

$$P=۱۴,۷۴\times e^{۱۴,۶۸V} \qquad (۲)$$

$$f'_{cv}=۴۷۶۳,۱-۹۸۱۶\times V \qquad (۳)$$

که در آن

P : میزان نفوذپذیری بر حسب اینچ بر ساعت

V : درصد فضای خالی

f'_c : مقاومت فشاری نمونه ۷روزه بر حسب (psi) است [۹].

همانگونه که در روابط (۲) و (۳) مشخص است با افزایش فضای خالی مقدار نفوذپذیری افزایش می‌یابد، ولی با افزایش درصد فضای خالی مقاومت بتن نیز کاهش پیدا می‌کند، که با جایگذاری معادله رابطه (۲) در رابطه (۳)، معادله ریاضی به رابطه (۴)، یعنی ارتباطی بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری حاصل می‌شود.

---

[۱] Recycled Concrete Aggrgates

[۲] National Concrete Pavement Technology Center

$$f'_{cv}=۶۵۰۰-۶۵۰\,Lnp \qquad (۴)$$

بدین ترتیب رابطه غیرخطی بین میزان نفوذپذیری بتن متخلخل و مقاومت فشاری آن به دست می‌آید، لازمه‌ی کاربرد این رابطه دانستن یکی از معیارهای طراحی میزان نفوذپذیری مورد نیاز به صورت تابع مقاومت فشاری معیار طراحی است.

۴. روش تحقیق

بتن متخلخل در رویه‌های راه و حذف رواناب‌های آلوده در مناطق شهری مورد توجه صنعت قرار گرفته است از طرفی کاهش مقاومت بتن با تخلخل زیاد از مشکلات آن در کاربرد و طراحی است، که مطالعه حاضر تاثیر اندازه سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری و در پی آن نحوه توزیع تنش کششی زیر دال بتنی در روسازی صلب بررسی نموده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر طبق نظر محققین برای سنگدانه‌های با ابعاد مختلف استخراج گردیده است [۷]. در تمامی طرح‌های اختلاط میزان سیمان ۴۲۵ کیلوگرم و وزن آب ۱۵۱ کیلوگرم، به عبارت دیگر نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ انتخاب گردید. اندازه سنگدانه‌ها در پنج دانه‌بندی مختلف: دانه‌بندی طرح (۱)، ۹/۵ - ۴/۷۵میلیمتر، دانه‌بندی طرح (۲)، ۱۲/۵ – ۴/۷۵، دانه‌بندی طرح (۳)، ۱۲/۵ – ۹/۵، دانه‌بندی طرح (۴)، ۴/۷۵ میلیمتر و دانه‌بندی طرح (۵)، ۹/۵ میلیمتر، انتخاب شدند. وزن مصالح سنگی، معادل ۱۶۷۵ کیلوگرم بوده است. بعد از اختلاط مصالح به روش ASTM۱۹۲ و ساخت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای استاندارد، نوع مقاومت فشاری در زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه به دست آمده که در جدول ۱ مقادیر آن نمایش داده شده است [۷]. به علت محدودیت تعداد آزمایشهای انجام شده در مرجع نتایج آزمایشگاهی تعداد حالت بررسی شده نیز زیاد نیست. نتایج این جدول نشان می‌دهد که اندازه‌ی سنگدانه‌ها در معیار مقاومت تاثیرگذار است و بزرگی سنگدانه و غیر یکنواختی آن باعث افزایش مقاومت می‌شود و البته تخلخل یا نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. جدول (۱)، طبقه نتایج مطالعات مورد اشاره حاوی مقادیر نفوذپذیری بتن مختلف متخلخل هم هست.

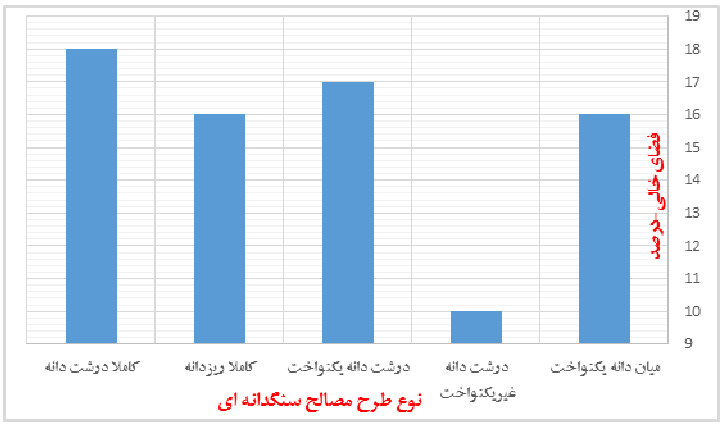
جدول۱- تاثیر ابعاد و توزیع سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری[۷] و تخلخل بتن متخلخل

دانه‌بندی طرح	مقاومت فشاری (Kg/cm^2)		درصد فضای خالی٪	E_c (Kg/cm^2)
	عمل‌آوری ۷ روز	عمل‌آوری ۲۸ روزه		
۱	۱۸۷	۲۳۷	۱۶	۱۶۲۵۰۰
۲	۱۲۸	۱۸۴	۱۰	۱۱۱۲۰۰
۳	۱۳۸	۲۱۷	۱۷	۱۱۹۹۵۰
۴	۱۰۵	۱۵۰	۱۶	۹۱۲۵۰
۵	۱۳۵	۱۹۴	۱۸	۱۱۹۹۰۰

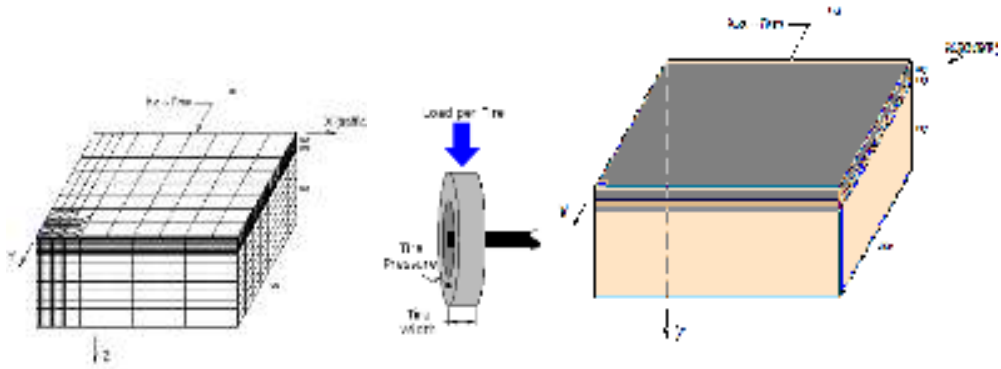
در مرحله بعد با کمک نرم‌افزارهای المان محدود سه بعدی، دال‌های بتنی رویه با ضخامت مختلف انتخاب شدند و تحت بارگذاری بار یک چرخ کامیون استاندارد قرار گرفته و کرنش بحرانی زیر دال محاسبه شدند. بارگذاری توسط یک دایره به شعاع ۱۵ سانتی‌متر و وزن ۲ تن انجام گرفت، برای خاک‌بستر و لایه اساس زیر دال نیز به ترتیب ضخامت ۱۰۰۰ میلی متر و ۱۰۰ میلی متر و با مدول الاستیسیته‌ی ۳۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع انتخاب گردید. دلیل انتخاب کرنش کششی زیر دال نیز به دلیل بحرانی بودن این عکس‌العمل روسازی در هنگام استفاده در مسیرهای عبور وسایل نقلیه است.

۵. تحلیل نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی و بحث

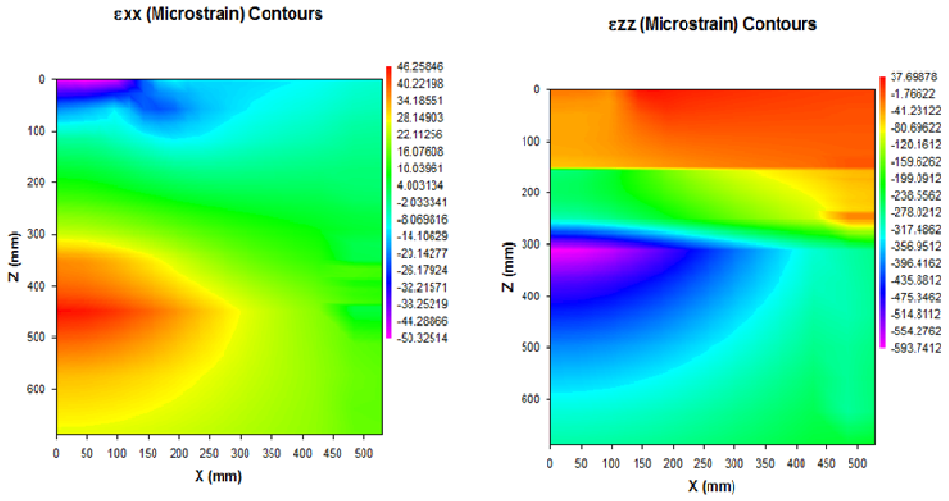
در ابتدا تغییر مقدار نفوذپذیری بتن متخلخل به ازای دانه‌بندی‌های مختلف در نمودار شکل (۱) نمایش داده شده است. نمونه‌ای از مدل‌سازی انجام شده و مش‌بندی لایه ۵ که توسط نرم افزار المان محدودسه بعدی (EverStre) انجام شده مطابق شکل (۲) ارائه شده است. در زیر محل بارگذاری و نزدیک به آن مش‌ها کوچکتر و تعداد آن بیشتر است. شکل (۳) نیز نمونه‌ای از تغییرات کرنش در اثر تغییر در طرح دانه‌بندی و ضخامت لایه بتن متخلخل نمایش می-دهد.



شکل (۱)- تغییرات میزان نفوذپذیری بتن متخلخل در طرح‌های مختلف مصالح سنگدانه‌ای

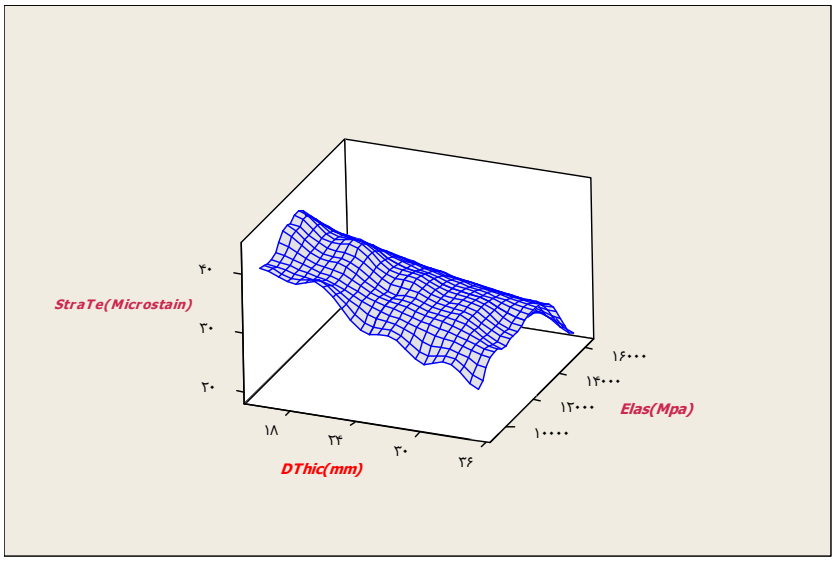


شکل (۲)- مش‌بندی لایه‌های دال بتنی و بارگذاری گسترده یکنواخت دایره‌ای شکل

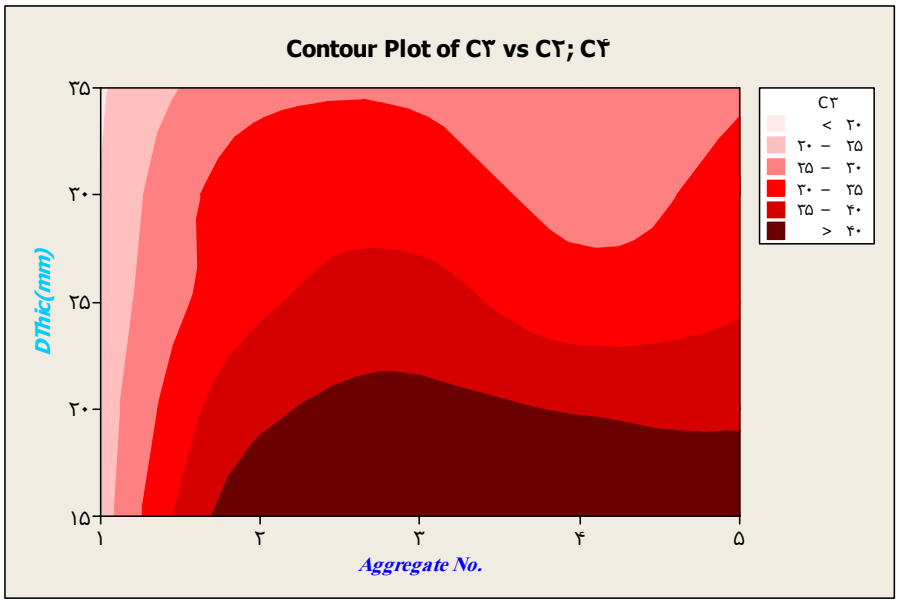


شکل (۳)- نمونه‌ای از خروجی نمودارهای کرنش‌ها در اثر بارگذاری دال بتن متخلخلالف) کنش‌های فشاری ب) کرنش کششی بحرانی

بعد از تحلیل روسازی کرنش‌های به دست آمده در دانه‌بندی‌های مختلف و در ضخامت‌های مختلف به صورت نمودار سه بعدی در نرم افزار آماری Mini-Tab در شکل (۴) و شکل (۵) نمایش داده شده است. در این مطالعه ضخامت دال از ۱۵ سانتی‌متر تا ۳۵ سانتی‌متر متغیر در نظرگرفته‌شد، که از ضخامت‌های معمول در روسازی بتنی محسوب می‌شود.



شکل (۴)- تغییرات ضخامت دال و وضعیت مدول الاستیسیته لایه‌ها بر کرنش کششی زیر دال



شکل (۵)- کنتور کرنش کششی زیر دال بتن متخلخل در ضخامت و با دانه‌بندی‌های مختلف

در شکل (۴)، ملاحظه می‌شود، تغییرات کرنش کششی زیر دال به گونه‌ای است که با افزایش ضخامت دال مقدار کرنش کششی زیر دال به عنوان کرنش معیار در طراحی بتن متخلخل روسازی‌های صلب کاهش پیدا می‌کند. با افزایش ضخامت از ۱۵ به ۳۰ سانتی‌متر در حدود ۳۰ درصد از کرنش کششی کاهش می‌یابد.

همچنین در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که تغییر در دانه‌بندی موجب تغییر در کرنش بحرانی در بتن متخلخل می‌گردد، به طوری که در یک ضخامت ثابت بیشترین کرنش مربوط به دانه‌بندی طرح شماره ۳ است، که اندازه‌ی سنگدانه‌های طرح مخلوط بین ۱۲/۵–۵/۵ میلی‌متر بوده است. کمترین کرنش کششی مربوط به طرح شماره ۴ و طرح شماره ۱ است که ریزدانه‌تر است. البته در جدول (۱) در خصوص نفوذپذیری ملاحظه می‌شود که در نتایج

آزمایشگاهی مقدار نفوذ پذیری در حدود ۱۶ درصد ثابت باقی مـانده است. همچنین طبق این نمـودار ملاحظه می‌شود کرنش کششی ماکزیمم در طرح دانه‌بندی شماره ۴ و شماره ۵ تفاوت معناداری در ضخامت‌های کم وجود ندارد و در ضخامت‌های بیش از ۳۰ سانتی‌متر، دانه‌بندی شماره ۴ کرنش کمتری را بایستی تحمل کند.

۶. نتیجه‌گیری

اگرچه پارامترهای مختلفی در عملکرد موثرتر این نوع مخلوط بتنی موثرند، اما دانه‌بندی مصالح سنگدانه در میزان نفوذپذیری و پارامتر مقاومت فشاری بتن تاثیر زیادی دارد. در این مطالعه به تاثیر ابعاد سنگدانه‌های مختلف بر عملکرد مقاومتی و عکس‌العمل آن در برابر بارگذاری مخلوط‌های بتنی متخلخل پرداخته شد. هدف اصلی این نوشتار توجه به ابعاد سنگدانه‌ها و توزیع آنها در عملکرد نفوذپذیری و مقاومت لایه‌های صلب بوده است. در نهایت موارد ارائه شده در ادامه را می‌توان به عنوان نتایج این مطالعه معرفی نمود.

- استفاده از مصالح میان‌دانه یکنواخت و در کل، یکنواختی مصالح، به شدت باعث افزایش نفوذپذیری و تخلخل موجود در بتن متخلخل می‌گردد. مصالح کاملاً درشت ولی با دانه‌بندی یکنواخت بیشترین درصد فضای خالی و نفوذپذیری را به خود اختصاص داده است.

- با توجه به میزان نفوذپذیری مورد نظر بتن متخلخل به تحمل کرنش کششی، بهترین گزینه در انتخاب رویه‌های بتنی، دانه‌بندی طرح شماره ۵، یعنی درشت‌دانه کاملاً یکنواخت است.

مراجع

[۱]رستمی, م.، بهرامی چگنی،ا. (۱۳۹۴)، بررســی خواص مکانیکی و تاثیرات سنگدانه‌های متداول در ساخت بتـن متخلخل، فصلنامه آنالیز سازه -زلزله ، شماره ۱۲،دوره۳، صفحه۱-۸.

[۲]فروتن, م. ،ضایی،م. (۱۳۹۷)، بررسی آزمایشگاهی اثر پودرهای ضایعاتی سیلیس و پسماند زغال سنگ بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتنی متخلخل، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری ، دانشگاه تبریز و دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، صفحه۱-۸.

[۳]شفابخش, غ.ع.،احمدی،س. (۱۳۹۶)، ارزیابی آزمایشگاهی اثر پودر ضایعاتی زغال سنگ بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی روسازی بتنی متخلخل، دومین کنفرانس ملی رویه های بتنی، تهران، انجمن بتن ایران -مرکز تحقیقات راه ، مسکن و شهرسازی،صفحه۱-۹.

[۴]نیک‌نیاز, م.؛ حسابی،ا. و صدری‌راد،ع.ا.(۱۳۹۶) ، مدیریت آب‌های سطحی شهر تبریز با تولید آسفالت و بتن متخلخل از نخاله‌های ساختمانی و مکانی یابی محل دفع آنها، پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دایمی کنفرانس، صفحه۱-۱۶.

[۵]آزاد, آ.؛ کرمی؛ح. موسوی،س.ف. فرزین،س. (۱۳۹۵)، کاربرد روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی در تحلیل کاهش‌پساب شهری با استفاده از بتن متخلخل، ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، کردستان، دانشگاه کردستان، سنندج صفحه۱-۱۰.

[۶] رمضانیانپور، ع.ا. حسنی،ا. (۱۳۹۳)، ویژگیهای مکانیکی بتن متخلخل با توجه به دانه‌بندی و اندازه‌ی سنگدانه‌ها، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، انجمن بتن ایران،صفحه۱-۱۲.

[۷]سروری, ه.؛ موسایی؛ح. عامری،ف.، پورکاظمی،م.م.(۱۳۹۵)، ارزیابی آزمایشگاهی ویژگی‌های بتن متخلخل با توجه به نحوه دانه‌بندی و اندازه سنگدانه‌ها، دومین همایش ملی عمران، معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی، اصفهان، دانشگاه واحد اردستان، صفحه۱-۱۵.

[۸]کیانا, ا.؛ محمدرحیم پور،س. ،کیانا،م. (۱۳۹۵)، تاثیر الیاف پروپیلن ۱۲ میلیمتری بر مقاومت فشاری بتن سبک متخلخل از نوع فوم بتن، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دایمی کنفرانس، دانشگاه شهید بهشتی،صفحه۱-۵.

[۹]فرجی،ق. ولی‌پور، ح.(۱۳۹۳) روسازی بتنی،طرح اختلاط، طـراحی،اجراء و نگـــهداری، انتشارات موســسه فنی و انتشاراتی حسینیان، انتشارات سیمای دانش، تهران، ۴۰۰ صفحه

[۱۰]عطایی, ا.؛ گلرو ،ا. جوشقانی،ع.ر. (۱۳۹۵)، ارزیابی میزان تاثیر اندازه سنگدانه برخصوصیات مکانیکی و فیزیکی روسازی بتن متخلخل، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره‌ی۸، شماره۱، صفحه۱۱۰-۱۲۳.

[۱۱]خدادوست‌گمچی, م.؛ خدادوست‌گمچی،م.، پاشایی‌گلمرز،ل. (۱۳۹۴)، بررسی تاثیر کاربرد بتن متخلخل در معابر عمومی شهری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر احیای دریاچه ارومیه، چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه های نوین در مهندسی عمران، یاسوج، دانشگاه یاسوج،صفحه۱-۸.

[۱۲]حسینی‌لواسانی, س.پ.، حسینـی‌لواسانی،س.ح. (۱۳۹۴)، بررسی خواص مکانیکی روسازی معابر شهری با استفاده از بتن بی‌صدا، کنفرانس بینالمللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، مهندسین مشاورایده‌پردازان پایتخت ، تهران،صفحه۱-۱۳.

[۱۳]کوچک‌زاده‌قرا, م.، حسینعلی‌بیگی،م.، مدرس،ا. (۱۳۹۵)، بررسی تجربی نفوذپذیری و تخلخل بتن متخلخل روسازی مسلح به الیاف، دومین همایش بین المللی معماری، عمران و شهرسازی، انجمن معماری و شهرسازی استان البرز، تهران، صفحه۱-۱۵.

[۱۴]Joshaghani, A., Ramezanianpour, A. A., Ataei, O., & Golroo, A. (۲۰۱۵). Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. Construction and Building Materials, ۱۰۱, ۳۱۷-۳۲۵.

[۱۵]Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (۲۰۱۶). Pervious concrete as a sustainable pavement material–Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. Construction and Building Materials, ۱۱۱, ۲۶۲-۲۷۴.

[۱۶]Ibrahim, M. M., Ramadhansyah, P. J., Rosli, H. M., & Ibrahim, M. W. (۲۰۱۸, January). Mechanical performance of porous concrete pavement containing nano black rice husk ash. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, Vol. ۲۹۰, No. ۱p. ۰۱۲۰۵۰.

[۱۷]Yap, S. P., Chen, P. Z. C., Goh, Y., Ibrahim, H. A., Mo, K. H., & Yuen, C. W. (۲۰۱۸). Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. Journal of cleaner production, ۱۸۱, ۱۵۵-165.

[۱۸]Leon Raj, J., & Chockalingam, T. (۲۰۱۹). Strength and abrasion characteristics of pervious concrete. Road Materials and Pavement Design, pp: ۱-۱۸.