

## مدل آزمایشگاهی و اجزاء محدود شبیه سازی رفتار انقباضی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان

رضا روح افزا<sup>۱</sup>، امین تیموری<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد گروه حمل و نقل، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،

تهران، ایران

۲- دکتری تخصصی گروه راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده

هدف از این مقاله، توسعه توابع رگرسیون خواص مواد بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مدل المان محدود (FEM) برای شبیه سازی رفتار انقباض در قشر اساس تثبیت شده با سیمان است. در مرحله اول، خواص مواد از آزمایشات خاصیت فیزیکی بدست آمد. همبستگی بین ضریب مقاومت سیمان، استحکام، مدول و ضریب انقباض با رگرسیون آماری ایجاد شد. در مرحله دوم، یک مدل اجزای محدود برای شبیه سازی انقباض خشک و حرارتی در قشر اساس ایجاد شد. سوم، یک روش ساده برای پیش بینی فاصله ترک های انقباضی محاسبه شد. در نهایت، مدل اجزا محدود با استفاده از تجزیه و تحلیل مقایسه ای با راه حل های تحلیلی و مشاهدات میدانی در روسازی بتن گلتکی (RCC) به دلیل شباهت به رفتارهای انقباضی، تأیید شد. مشاهده شد که استحکام و خواص انقباضی سنگدانه تثبیت شده با سیمان با مقاومت فشاری ۷ روزه ارتباط خوبی دارد. همچنین مشاهده شد که از روابط طول روسازی و تنش های انقباضی، فاصله ترک هایی انقباضی را می توان با روش اجزای محدود محاسبه کرد. همچنین نتیجه گرفته شد که مدل اجزای محدود پیشنهادی ابزاری دقیق برای شبیه سازی رفتار انقباضی می باشد و نتایج پیش بینی مطابق با عملکرد روسازی واقعی است.

**کلمات کلیدی:** مصالح تثبیت شده سیمان، آزمایش های فیزیکی، اجزای محدود، رفتار انقباضی بتن.

### ۱- مقدمه

یکی از مهمترین مشکلات قشر اساس تثبیت شده با سیمان، ترک های انقباضی در مراحل اولیه پس از ساخت است. هنگامی که تنش های کششی انباشته شده در اثر انقباض خشک و حرارتی به حد مقاومت مصالح برسند، در قشر اساس ظاهر می شود. در نهایت، ترکها تحت تأثیر ترکیبی از ترافیک، دما و رطوبت تا سطح آسفالت منعکس می شوند و در نتیجه سرعت زوال روسازی را تسریع می کنند.

عوامل زیادی در ترک خوردگی انقباضی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان نقش دارند، از جمله رطوبت، سرما، اصطکاک و خاصیت مواد و غیره (George, 1968). با توجه به تحقیقات پیشین، محتوای سیمان به عنوان یک عامل مهم برای انقباض مورد پذیرش است. برخی از محققان نتیجه گرفتند که با افزایش مقدار سیمان، انقباض کاهش یافته است، در حالی که برخی دیگر مدعی شدند وجود سیمان بهینه برای به حداقل رساندن انقباض تاثیرگذار است. با این حال، برخی دیگر هیچ ارتباطی بین محتوای سیمان و انقباض قائل نشدند (Sebesta, 2005). با توجه به تحقیقات نظری، عملکرد و توزیع

هشتمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

فضای ترک خوردگی در دوره ساخت قشر اساس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Sun et al., 2003). براساس تئوری الاستیک و نظریه استحکام بتن، یک مدل نظری برای پیش بینی فاصله ترک خوردگی حرارتی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان تهیه شده است (Shi et al., 2004). هدف از این مطالعه، توسعه توابع رگرسیون خواص مواد بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود برای شبیه سازی رفتار انقباضی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان است.

## ۲- خواص مواد

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سیمان سیلیکات ترکیبی ۳۲.۵ با دانه بندی معمولی تثبیت شده با سیمان مورد استفاده در کشور چین برای آزمایشات انتخاب شد.

جدول ۱- دانه بندی سنگدانه ها

0.075	0.6	2.36	4.75	9.5	19	26.5	31.5	الک (میلی متر)
2.5	13.9	27.2	42.0	54.3	82.6	94.7	100.0	درصد عبوری

همچنین آزمایش های زیر انجام شده است:

- آزمایش مقاومت فشاری نامشخص: نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی متر که در کیسه های پلاستیکی با رطوبت مطلوب بسته شده اند، در اتاق پخت استاندارد (دما = ۲۵، رطوبت ۹۵٪) نگهداری می شوند و به مدت ۲۴ ساعت قبل از آزمایش در آب غوطه ور می شوند.
- آزمایش کشش غیر مستقیم (IDT): نمونه های مشابه آزمایش مقاومت فشاری توسط MTS با بارگذاری ۱ میلی متر در دقیقه آزمایش می شوند.
- آزمایش انقباضی خشک: سیستم آزمایش شامل ابزارهای پیمایشی مقاومت استاتیک، جعبه های ترانسفورماتور، سنجهای کرنش مقاومت و خطوط اتصال است. به ترتیب طول نمونه ۱۰۰ میلی متر عرض نمونه ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع نمونه ۴۰۰ میلی متر است.
- آزمایش انقباضی حرارتی: در جعبه سیکل درجه حرارت پایین که در آن دما از ۵۵°C به ۲۵°C با میزان ۱°C در دقیقه کاهش می یابد عمل می شود. هنگامی که کاهش انباشته به ۱۰ می رسد، آزمایش متوقف می شود و ۲ ساعت قبل از شروع، مجدد دمای آن ثابت است.
- آزمایش های میدانی: آزمون FWD در بخش هایی از روسازی برای آزمایش مقاومت آزمایشگاهی، کرگیری انجام می شود.

همبستگی تجربی بین محتوای سیمان، استحکام آزمایشگاهی، مقاومت درجا، مدول مقاومت و ضرایب انقباض مصالح تثبیت شده با سیمان از نتایج آزمون تهیه شد. با استفاده از  $\sigma_w$  به عنوان یک متغیر میانی، توابع برای خواص ماده در معادله (۱) - (۵) نشان داده شده است. اگر  $\sigma_w$  یا  $\sigma_7$ ، که از آزمایشات بدست می آید، نیز می توان پارامترهای دیگری مانند مدول برجهنگی، ضرایب انقباضی و مقاومت کششی غیرمستقیم را از این توابع محاسبه کرد.

هشتمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

$$\alpha d = 1.1688\sigma w^2 - 21.9181\sigma w + 151.56 \quad (1)$$

$$\alpha T = 0.1243\sigma w + 0.601 \quad (2)$$

$$\sigma IDT = 0.05164 \quad (3)$$

$$\sigma w = \frac{-161.63 + \sqrt{26124.26 + 140.72(400.5 E)}}{70.36} \quad (4)$$

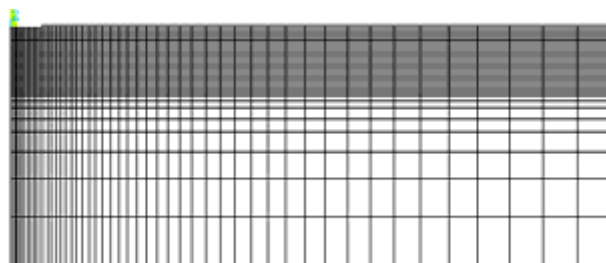
$$\sigma w = 2.4353\sigma 7 = 2.7361X \quad (5)$$

که در آن،  $\sigma w$  مقاومت فشازی نامشخص در نمونه های کرگیری شده است،  $\sigma IDT$ ؛ MPa؛ مقاومت کشش غیرمستقیم،  $\alpha d$ ؛ MPa؛ ضریب انقباضی خشک متوسط،  $\alpha T$ ؛ درصد؛ ضریب انقباض حرارتی متوسط،  $6-10$  درجه سانتی گراد؛  $E$  مدول برجهنگی،  $7$ ؛ MPa؛ مقاومت فشاری  $7$  روزه تعریف نشده،  $X$ ؛ MPa؛ مقدار سیمان، %.

### ۳- توسعه مدل اجزای محدود

مدل FEM بر اساس فرضیات زیر است: (1) مخلوط برای هر لایه الاستیک همگن، ایزوتروپیک و خطی است، با استفاده از روش تجزیه و تحلیل روسازی بتونی (2) کرنش انقباضی خشک به طور مساوی در کل قشر اساس توزیع می شود، و (3) کرنش انقباض حرارتی نیز به طور مساوی در کل قشر اساس توزیع می شود. بنابراین، مدل را می توان به یک پلان کرنشی ساده کرد.

توابع نمایی (Wu et al, 1996) برای شبیه سازی توزیع دما مورد استفاده قرار گرفتند، در حالی که تنش انقباضی خشک با تبدیل رطوبت به کاهش دما با کرنش معادل انقباضی بدست آمد. اصطکاک تماسی بین قشر اساس و لایه پایین تأثیر معنی داری بر تنش های انقباضی قشر اساس دارد. مدل اصطکاک کولمب برای شبیه سازی اصطکاک تماسی بین دو لایه معرفی شده است (Dowson, 2003). در این تحقیق از عنصر پارامتری اجزای محدود 8 گره ای برای محاسبه استفاده شد. برای شبیه سازی محدودیت، از یک جفت تماس بین قشر اساس و زیر اساس استفاده شد. عمق کلی یک متر از آنجا که اثر قابل توجهی از تغییر دما در ساختار روسازی در ضخامت تاثیرگذار است، مدل شد. به دلیل تقارن، فقط نیمی از سیستم نیاز به مدل سازی دارد. به منظور صرفه جویی در هزینه محاسبه، شبکه به گونه ای درشت و درشت تر از وسط تا لبه ها طراحی شده است، که در شکل 1 مشاهده شده است. حداقل اندازه چشمه شبکه 5 میلی متر است.



اجزای محدود

شکل 1-مدل شبکه های

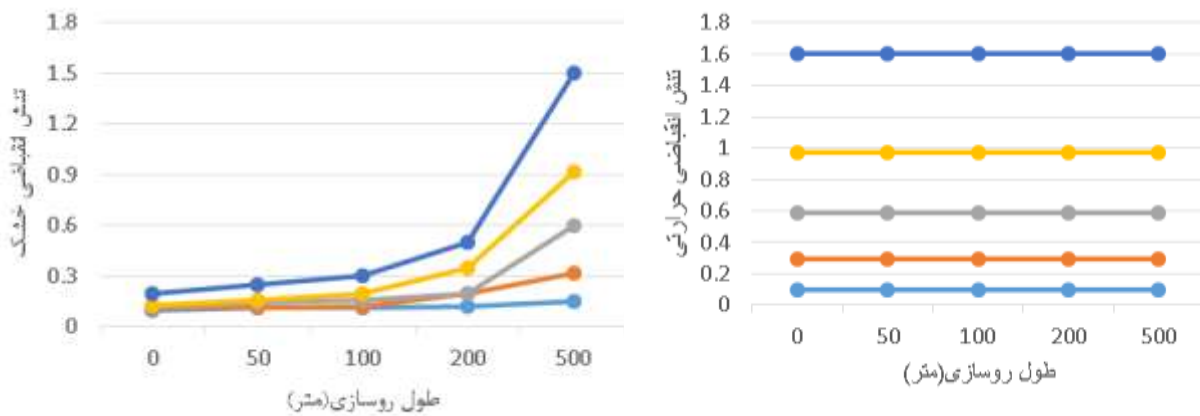
### ۴- تعیین فاصله ترک های انقباضی

هشتمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

برای تعیین فاصله ترک های انقباضی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان ، ابتدا باید روابط طول روسازی و تنشهای انقباضی تعیین شود. ساختار روسازی مورد استفاده در این تجزیه و تحلیل شامل ۳۰ سانتی متر اساس ، ۳۰ سانتی متر زیر اساس (E-1000MPa ،  $\alpha T-10-5 / ^\circ C$  ، E-60MPa) ،  $\alpha T-2 \times 10-5 / ^\circ C$  و خاک بستر. خصوصیات مصالح قشر اساس تثبیت شده با سیمان ، همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است ، از معادله (۱) - (۵) محاسبه شده است.

جدول ۲. خواص مصالح سنگی تثبیت شده با سیمان.

ضریب انقباضی حرارتی $\alpha T$ (10-6/ 6/°C)	ضریب انقباضی خشک $ad$ (10-6/%)	مقاومت کشش $R_{sp}$ غیرمستقیم (MPa)	مدول برجهنگی E mpa	سازه
6.7	70.4	0.27	2000	1
7.0	51.2	0.45	4000	2
7.3	50.4	0.6	6000	3
7.6	60.8	0.72	8000	4
8.2	115.9	0.93	12000	5



شکل ۲. تأثیر طول روسازی در تنشهای انقباضی

شکل ۲ نشان می دهد که تنش انقباضی خشکی بالاتر در اساس با طول زیاد رخ می دهد ، در حالی که تأثیر ناچیز تنش انقباضی حرارتی بر طول روسازی وجود دارد. بنابراین ، اگر بخش ترک نخورده، کوتاهتر از یک مقدار معین باشد ، تنشهای انقباضی را می توان زیر مقاومت کششی کنترل کرد ، که می توان از آن برای پیش بینی فاصله ترک خوردگی در اساس تثبیت شده با سیمان استفاده کرد. به عبارت دیگر ، فاصله ترک خوردگی انقباضی همان طول بحرانی روسازی است که در آن تنشهای انقباضی برابر استحکام کششی مصالح در شرایط خاص انقباضی است. همانطور که در معادله (۶) مشاهده می شود، معیار شکست توسط تنش شکست بیان می شود.

$$\gamma \sigma m \leq \sigma IDT \quad (1)$$

که در آن ،  $\sigma_m$  تنش انقباضی ،  $\sigma_{IDT}$  MPa؛ مقاومت کشش غیرمستقیم ،  $\gamma_f$  MPa؛ ضریب اطمینان ۱.۲۰-۱.۳۳ برای پایایی هدف ۹۵٪.

با استفاده از این مدل اجزای محدود، تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شد و نتایج نشان داد که قشر اساس با مدول پایین دارای ترک خوردگی کمتر است و هیچ تغییر بنیادی در تنش های انقباضی با فواصل زمانی مختلف حین ساخت و ساز بین سطح آسفالت و قشر اساس وجود ندارد (Ni et al, 2008).

#### ۵- اعتبار مدل اجزای محدود

صحت روشهای نظری برای پیش بینی انقباض در بتن غلتکی در مطالعات قبلی به خوبی ثبت شده است (Yu et al, 1997). به دلیل عدم وجود داده های میدانی روی قشر اساس تثبیت شده با سیمان و به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی اجزای محدود ، یک روسازی بتن غلتکی ، به دلیل رفتار انقباضی مشابه ، به عنوان هدف آزمایش میدانی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج پیش بینی شده توسط مدل اجزای محدود با راه حل های نظری موجود و مشاهدات میدانی می تواند برای قضاوت در مورد صحت مدل استفاده شود. فقط انقباض خشک در این شبیه سازی در نظر گرفته شده است زیرا این عامل اصلی برای تعیین اندازه دال برای بتن غلتکی مناسب است. راه حل های تحلیلی تنش انقباضی از معادلات تنش حرارتی برای دال روسازی ناشی از اصطکاک (Zhu et al, 1985) بدست آمد و جایگزین فشار خشک برای کرنش حرارتی شد. ساختار روسازی انتخاب شده برای شبیه سازی شامل ۲۴ سانتی متر بتن غلتکی ، قشر اساس تثبیت شده با آهک ۱۵ سانتی متر و بستر است. فرض بر این بود که رطوبت روسازی بتن غلتکی از رطوبت بهینه ۵/۵ درصد به حالت نهایی ۲ درصد تغییر یافته است.

جدول ۳. مقایسه راه حل های اجزای محدود و تحلیلی

خطا	راه حل تحلیلی (Mpa)	راه حل اجزای محدود (Mpa)	طول دال (m)	ضریب انقباضی (% $10^6$ )
3.7%	0.564	0.544	5	200
2.8%	1.352	1.315	10	
-2.9%	2.150	2.214	15	
4.8%	3.492	3.332	20	
3.5%	0.844	0.815	5	300
1.2%	1.993	1.969	10	
-3.0%	3.217	3.316	15	
-0.8%	4.949	4.989	20	
4.8%	1.141	1.089	5	400
-2.5%	2.564	2.63	10	
1.5%	4.495	4.429	15	
0.7%	6.713	6.666	20	

برای تمرین مهندسی ، جدول ۳ نشان می دهد که مدل اجزای محدود به اندازه کافی دقیق است تا بتواند تنش های انقباضی در روسازی را شبیه سازی کند ، زیرا حداکثر خطای نسبی کمتر از ۵٪ است. از آنجا که استحکام کششی کلی بتن غلتکی 2.9MPa است ، طول صفحات کنترل پیش بینی شده برای ضریب انقباض  $200 \times 10^6\%$  ،  $300 \times 10^6\%$  و  $400 \times 10^6\%$

## هشتمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

به ترتیب 18.2 متر و 13.4 متر و 10.7 متر است. فاصله ترک های انقباضی عرضی در روسازی اغلب بین ۱۰ تا ۲۰ متر برای بتن غلتکی است (Yu et al, 1997). بنابراین، ثابت شده است که نتایج شبیه سازی با عملکرد واقعی روسازی مطابقت دارد.

### ۶- نتیجه گیری

از بررسی آزمون های آزمایشگاهی و میدانی سنگدانه های تثبیت شده با سیمان، مقاومت فشاری ۷ روز که به راحتی در آزمایشگاه بدست می آید، با سایر پارامترها همبستگی خوبی دارد و می توان از آن برای پیش بینی استحکام و خاصیت انقباض به عنوان یک متغیر واسطه استفاده کرد. از تجزیه و تحلیل اجزای محدود، مشخص شده است که تنشهای انقباضی بیشتر در قشر اساس با طول بیشتر رخ می دهد. بنابراین، در ترکیبی از تنش شکست، روابط طول روسازی و تنشهای انقباضی برای پیش بینی فاصله ترک خوردگی انقباضی در قشر اساس تثبیت شده با سیمان معرفی می شود. نتایج تحقیق در روسازی بتن غلتکی بیان می کند که، مدل پیشنهادی ابزاری دقیق برای شبیه سازی رفتار انقباضی در روسازی است.

### مراجع

- Dowson, D., (2003). *History of Tribology*, Longman Ltd, London.
- George, K.P. (1968). "Final Report on the Study of Criteria for Strength and Shrinkage Control of Cement-Treated Bases", *University of Mississippi*, Oxford.
- Ni, F.J., LI, Q., GU, X.Y., and LI, Z.X. (2008). "Prediction Model for Shrinkage Cracking Spacing of Cement Stabilized Base" in *Transportation Research Board 2008 Annual Meeting*, Washington, D.C., Paper 08-0716.
- Sebesta, S. (2005). "Use of Microcracking to Reduce Shrinkage Cracking in Cement Treated Bases", in *Transportation Research Board 2005 Annual Meeting*, Washington, D.C., Paper 05-0805.
- Shi, W.M. and Jiang, Z.S. (2004). "Research on the Calculation Method of Temperature Stress of Cement Treated Crushed Stone Base and the Method of Controlling Temperature Shrinkage Crack". *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 21(4) 23-27.
- Sun, T.B. and Cong, L. (2003). "A Study on Drying Shrinkage Procedure of Semi-rigid Base Coarse during Construction", *Highway* 712(3) 111-115.
- Wu, G.C., and Zhang, G.S. (1996). "Thermal Stress Intensity Factor Analysis for Asphalt Concrete Pavement", *China Journal of Highway and Transport*. 9(1) 37-44.
- Yu, J.R and Chen, R.S. (1997). "Plane Size of Roller-compacted Concrete Pavement Plate with Asphalt Overlay", *China Civil Engineering Journal*. 30(2) 56-62.
- Zhu, Z.H., Wang, B.G. and Guo, D.Z. (1985). *Pavement mechanics calculation*, China Communications Press, Beijing.