

## مدل سازی المان محدود تاثیر نوع سنگ دانه های بتن در بازشدگی درز در روسازی های بتنی

علی منصور خاکی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

[mkhaki@iust.ac.ir](mailto:mkhaki@iust.ac.ir)

احسان آزادروش

دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده:

مدل سه بعدی المان محدود برای بررسی تاثیر نوع سنگ دانه ها در میزان نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز در روسازی های بتنی، با استفاده از برنامه شبیه ساز Abaqus همراه با جزئیات روش مدل سازی ارائه شده است. برای مدل سازی داول و بتن از المان های نوع Solid آجری دارای ۸ گره، استفاده شده است. شبیه سازی رفتار پلاستیک بتن با استفاده از مدل Concrete Damage Plasticity انجام شده است. تماس بین سطح خارجی داول و بتن اطراف آن از نوع تماس سطح با سطح در حالت سخت مدل شده است. آنالیز در حالت Explicit انجام گرفته است. اثر سنگ دانه ها با در نظر گرفتن تأثیر آن ها در ضریب انبساط حرارتی بتن مد نظر است. مدل اصلی شامل یک بلوک بتنی و یک داول است که داول از درون آن بیرون کشیده می شود. انقباض بتن در مرحله گیرش با تعریف یک فیلد حرارتی منفی برای بتن مدل سازی شده است. در مورد هر نوع سنگ دانه مدل با ضریب انبساط حرارتی مربوطه آنالیز شده و نیروی کشنده لازم و فشار تماسی وارد شده از بتن به داول محاسبه شده است. یافته های به دست آمده از این مقایسه و اعتبارسنجی آن ها با نتایج آزمایشگاهی یک تحقیق اخیر، نشان می دهد که مدل ارائه شده به خوبی می تواند تغییرات فشار تماسی ناشی از اثر نوع سنگ دانه های مخلوط بتن در روسازی های بتنی را پیش بینی کند. نتایج نشان می دهد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن با تغییر نوع سنگ دانه ها، نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: روسازی بتنی، داول، مدل سازی المان محدود، ضریب انبساط حرارتی، Abaqus

**مقدمه:**

روسازی‌های بتنی در زردار غیر مسلح یکی از پرکاربردترین انواع روسازی در آمریکا و کشورهای اروپایی هستند. تمام روسازی‌های بتنی غیر مسلح باید در فواصل معینی دارای درز انقباض باشند. دال‌ها یا فقل وبست دانه‌ای وسیله‌ای برای انتقال بار از یک دال به دال دیگر در محل درز هستند. بسته به نوع روسازی، آب‌وهوا و تجربه، فاصله درزها بین ۴/۶ تا ۹ متر متغیر است [۱]. عبور بارهای ترافیکی از روی دال سبب ایجاد تنش در دال می‌شود. وظیفه اصلی دال‌ها انتقال بار از یک دال به دال دیگر می‌باشد تا این مقدار بار بین دو دال تقسیم شده و سبب کاهش تمرکز تنش در یک طرف درز شود. عدم استفاده از دال سبب کاهش ظرفیت باربری در یک طرف دال شده و در صورت نفوذ آب به درز، عمل مکش بین دال و بستر یا اساس اتفاق می‌افتد. نتیجه‌ی این امر ایجاد ناهمواری در محل درز است. استفاده از دال کارایی روسازی‌های بتنی در درازمدت را افزایش می‌دهد [۲]. از آن‌جا که محل ایجاد تنش‌های ناشی از عبور ترافیک از روی درز در بالا و پایین دال در محل درز قرار دارد، شکل و جنس دال تأثیر بسزایی در چگونگی توزیع این تنش‌ها دارد. در حالی که متداول‌ترین نوع دال، دال‌های فولادی با مقطع دایره‌ای هستند، سایر شکل‌ها و مواد ممکن است تأثیر بهتری در پخش این تنش‌ها داشته باشند [۳]. دال‌ها در وسط ضخامت دال در فواصل ۳۰/۴۸ سانتی‌متری (۱۲ اینچ) از یکدیگر قرار می‌گیرند. به عنوان یک قانون کلی قطر دال باید در حدود یک‌هشتم ضخامت دال باشد [۴]. اداره کل راه‌های فدرال برای بزرگراه‌ها دال با قطر ۳/۱۷۵ سانتی‌متر (۱/۲۵ اینچ) را پیشنهاد می‌دهد. طول کل دال معمولاً ۴۵/۷۲ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) است که نصف این طول در داخل هر یک از دال‌ها قرار می‌گیرد. دال‌ها پس از ریختن بتن با استفاده از ماشین‌های مخصوص در داخل بتن تازه قرار می‌گیرند یا از قبل به صورت مجموعه‌ای از دال‌ها که به بستر محکم شده‌اند، آماده قرارگیری بتن روی آنها می‌شوند. در حالی که وظیفه اصلی دال‌ها انتقال بار بین دو دال است، نباید در حرکت آزاد دال‌ها در اثر انقباض و انبساط، ممانعتی ایجاد کند. وجود اصطکاک بین دال و دال سبب ایجاد نیروهای محوری شده که می‌تواند سبب ترک خوردگی وسط دال شود. یافته‌های به دست آمده از نتایج

آزمایشگاهی در زمینه رفتار دال در بتن نشان می‌دهد که رفتار نیروی کشنده در مقابل بازشدگی درز در دال‌های بتنی شامل دو مرحله است. مرحله اول که در آن دال کاملاً به بتن چسبیده و مرحله دوم که مرحله جداسازی و لغزش دال در بتن است [۵]. مرحله اول گیرش بتن شامل انقباض آن است. دال درگیر در بتن در مقابل تغییر شکل داخلی بتن در اثر انقباض مقاومت کرده و بنابراین یک فشار تماسی از طرف بتن به دال وارد می‌شود. این فشار تماسی سبب ایجاد نیروهای اصطکاکی شده و مانع از حرکات آزادانه دال‌های بتنی می‌گردد [۶]. مقدار این نیروهای تماسی به فشار شعاعی وارد شده از طرف بتن به دال دارد. بنابراین بررسی انقباض بتن اطراف دال برای شناخت تأثیر این نیروها در مقدار نیروی محوری ایجاد شده در دال برای حرکت دال، لازم است. از طرفی بررسی انقباض بتن مستلزم در نظر گرفتن ضریب انبساط حرارتی آن است و نوع سنگ‌دانه‌ها مهمترین عامل در مقدار این ضریب می‌باشد [۷]. در این مقاله سعی می‌شود با استفاده از برنامه المان محدود Abaqus تأثیر نوع سنگ‌دانه‌ها در میزان نیروی محوری ایجاد شده در اثر حرکات افقی دال‌های بتنی در روسازی‌های بتنی بررسی گردد.

**مدل‌سازی کامپیوتری رفتار دال در بتن:****۱. انتخاب ابعاد مدل و نوع المان‌ها:**

برای بررسی رفتار دال در بتن یک بلوک بتنی به ابعاد ۳۰/۴۸ در ۲۷/۹۴ سانتی‌متر (۱۲ در ۱۱ اینچ) به ضخامت ۲۵/۴ سانتی‌متر (۱۰ اینچ) در نظر گرفته شده است. از آن‌جا که ضخامت دال‌ها در روسازی‌های بتنی معمولاً بین ۲۰/۳۲ تا ۳۰/۴۸ سانتی‌متر (۸ تا ۱۲ اینچ) متغیر است، انتخاب میانگین این دو عدد برای ضخامت بلوک بتنی در مدل، منطقی به نظر می‌رسد. دال فولادی به قطر ۳/۱۷۵ سانتی‌متر (۱/۲۵ اینچ) و طول ۲۷/۹۴ سانتی‌متر (۱۱ اینچ) به طوری که تنها ۲۲/۸۶ سانتی‌متر (۹ اینچ) آن در داخل بتن قرار گرفته، در نظر گرفته شده است. بلوک بتنی در جای خود ثابت نگه داشته شده و دال به اندازه ۰/۶۳۵ سانتی‌متر (۰/۲۵ اینچ) به طرف خارج از بلوک بتنی، بیرون کشیده می‌شود. در شکل ۱ مدل المان محدود ارائه شده نشان داده شده است.

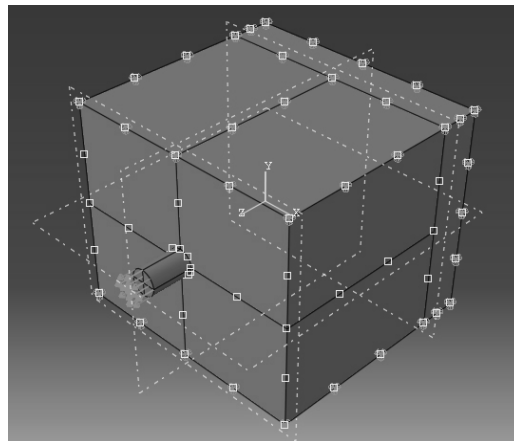
در این مقاله از مدل سوم برای تعریف رفتار تنش- کرنش بتن و خواص پلاستیک آن استفاده شده است. چراکه برای انواع بارگذاری‌های یکنواخت، دینامیکی و دوره‌ای مناسب بوده و قادر است خرابی بتن را در دو حالت ترک خوردگی در کشش و پکیدگی در فشار مدل‌سازی کند. پارامترهای لازم برای تعریف مدل پلاستیک بتن شامل  $\epsilon_c$ ،  $f_b/f_c$  و  $K$  به ترتیب برابر ۳۸ درجه، ۱، ۱/۱۲ و ۰/۶۶۶ در نظر گرفته شده‌اند [۹].

برای تعریف خواص فولاد از مواد الاستیک ایزوتروپیک استفاده شده است. در جدول ۱ پارامترهای مربوط به تعریف مواد آمده است. پارامترهای ورودی برای مدل پلاستیسیته بتن در جدول ۲ آمده است. ضریب انبساط حرارتی بتن با توجه به نوع سنگ‌دانه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

Abaqus دارای یک کتابخانه بزرگ از انواع المان‌ها برای حل بسیاری از مسائل المان محدود می‌باشد. برای مدل‌سازی داول و بلوک بتنی از المان‌های سه‌بعدی نوع solid دارای ۸ گره و ۶ وجه، (C3D8R-Bricks) استفاده شد. این المان‌ها برای آنالیزهای خطی، غیرخطی پیچیده، مسائل تماسی و پلاستیسیته همراه با تغییر شکل‌های بزرگ مناسب هستند [۸].

## ۱- مواد:

Abaqus دارای سه مدل برای تعریف بتن شامل Concrete Cracking Model for Smeared Cracking و Concrete Damage Plasticity می‌باشد.



شکل ۱: مدل المان محدود

جدول ۱: معرفی خواص مواد

ماده	پارامتر	مقدار
بتن	چگالی جرمی	2400(kg/m <sup>3</sup> )
	مدول الاستیسیته	19.7(GPa)
	ضریب پواسون	0.19
فولاد	چگالی جرمی	7830(kg/m <sup>3</sup> )
	مدول الاستیسیته	200(GPa)
	ضریب پواسون	0.3

جدول ۲ پارامترهای ورودی برای مدل پلاستیسیته بتن [۹]

Material's parameters	B50	The parameters of CDP model	
		$\beta$	$38^\circ$
Concrete elasticity		$m$	1
$E$ [GPa]	19.7	$f=f_{50}/f_c$	1.12
$\nu$	0.19	$\gamma$	0.666
Concrete compression hardening		Concrete compression damage	
Stress [MPa]	Crushing strain [-]	DamageC [-]	Crushing strain [-]
15.0	0.0	0.0	0.0
20.197804	0.0000747307	0.0	0.0000747307
30.000609	0.0000988479	0.0	0.0000988479
40.303781	0.000154123	0.0	0.000154123
50.007692	0.000761538	0.0	0.000761538
40.236090	0.002557559	0.195402	0.002557559
20.236090	0.005675431	0.596382	0.005675431
5.257557	0.011733119	0.894865	0.011733119
Concrete tension stiffening		Concrete tension damage	
Stress [MPa]	Cracking strain [-]	DamageT [-]	Cracking strain [-]
1.99893	0.0	0.0	0.0
2.842	0.00003333	0.0	0.00003333
1.86981	0.000160427	0.406411	0.000160427
0.862723	0.000279763	0.69638	0.000279763
0.226254	0.000684593	0.920389	0.000684593
0.056576	0.00108673	0.980093	0.00108673

جدول ۳ ضریب متوسط حرارتی بتن [۷]

نوع سنگ‌دانه	ضریب متوسط حرارتی بتن ( $1/^\circ\text{C}$ )
مرمر (Marble)	۵/۵
سنگ آهک (Limestone)	۶
بازالت (Basalt)	۷
دولومیت (Dolomite)	۷/۵
گرانیت (Granite)	۸
ماسه سنگ (Sandstone)	۱۱/۵
کراتز (Quartzite)	۱۲

## ۲. روش آنالیز:

Abaqus یک برنامه شبیه‌ساز قوی مهندسی است که اساس آن روش المان محدود است. این برنامه قادر به حل مسائل مختلفی از ساده خطی تا غیرخطی پیچیده می‌باشد. Abaqus دارای دو روش اصلی آنالیز شامل روش استاندارد و Explicit می‌باشد. حالت استاندارد بیش تر برای بررسی پدیده‌های فیزیکی آرام مثل مسائل استاتیکی و شبه‌استاتیکی مناسب است در حالی که روش Explicit برای حل پدیده‌های بسیار سریع مثل مسائل دینامیکی کاربرد دارد. هرچند روش Explicit برای بررسی پدیده‌های

### ۳- بارگذاری، شرایط مرزی و مراحل آنالیز:

آنالیز در حالت Explicit در سه مرحله قابل انجام شده است. در این روش آنالیز، ابتدا بلوک بتنی در جای خود مقید شده و پس از آن که فیلد حرارتی و وزن تعریف شدند، داوول به اندازه ۰/۶۳۵ سانتی متر (۰/۲۵ اینچ) از داخل بتن بیرون کشیده می‌شود. برای آن که اثرات نامطلوب اینرسی در حالت آنالیز Explicit به حداقل برسد و از طرفی سرعت انجام آنالیز افزایش یابد، از توابع smooth برای تعریف فیلد حرارتی، وزن و جابجایی داوول استفاده شده است. برای آن که برهم‌کنش داوول و بتن در محل اتصال به خوبی مدل‌سازی شود، از یک مش‌بندی ریز در بتن اطراف داوول استفاده شده است. به این ترتیب تعداد ۳۹ گره برای بتن در اطراف داوول در نظر گرفته شده است.

### نتایج آنالیز:

#### ۱- بررسی اثر اینرسی در آنالیز Explicit:

برای بررسی صحت نتایج روش Explicit و اطمینان از کم بودن مقادیر اینرسی در محاسبات نرم‌افزار، کافی است نمودار تغییرات انرژی جنبشی برحسب زمان را در طول زمان انجام آنالیز بررسی کنیم. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر انرژی جنبشی مدل نسبت به کار خارجی و انرژی تلف شده توسط اصطکاک بسیار پایین بوده و این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر اینرسی در مدل قابل صرف‌نظر کردن است.

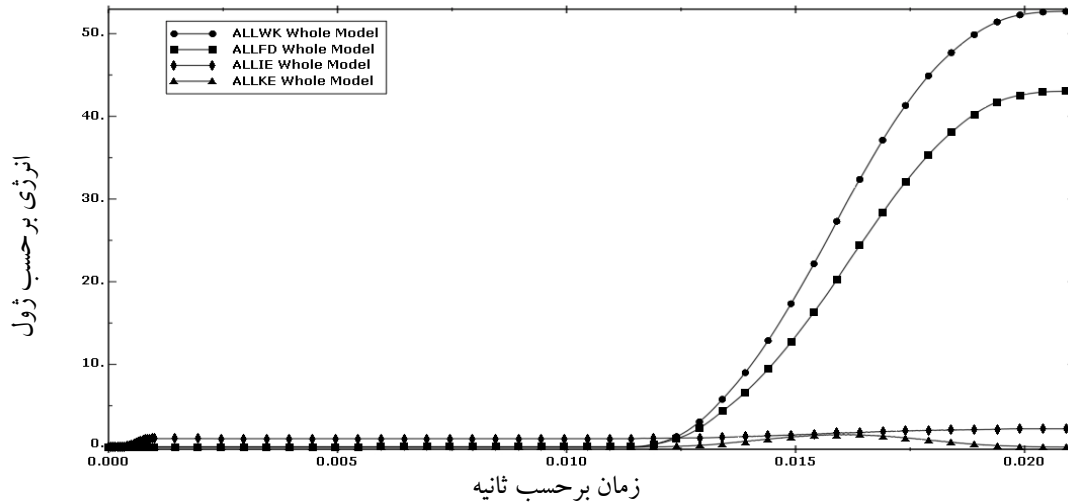
#### ۲- میزان نیروی کشنده و فشار تماسی:

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقدار نیروی متوسط لازم برای بیرون کشیدن داوول از نمونه بتنی و فشار تماسی متوسط، برای هر کدام از انواع سنگ‌دانه‌ها را نشان می‌دهد. میزان نیروی کشنده مجموع تنش‌های برشی منتقل شده بین داوول و بتن بوده و با ضرب شدن در مساحت جانبی داوول نمایانگر نیروی محوری است که در اثر حرکات افقی دال به وجود می‌آید. مقدار حداکثر نیروی کشنده بسته به نوع مدل بین ۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰ نیوتن (۱۱۲۴ تا ۱۵۷۴ پوند) متغیر است [۵]. این مطلب نیز به نوبه خود نشان‌دهنده صحت مدل ارائه شده در این جا می‌باشد.

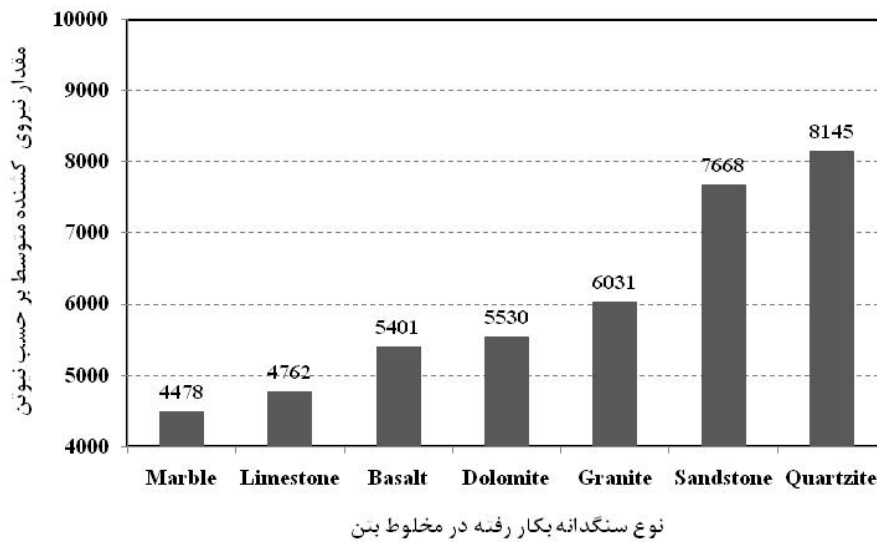
دینامیکی توسعه داده شده است ولی تجربیات نشان می‌دهد که این روش مسائل شبه‌استاتیکی را به ویژه زمانی که مدل دارای حالت‌های پیچیده تماسی بوده و شدیداً غیرخطی است، آسانتر و سریعتر از حالت استاندارد حل می‌کند [۸]. در مقاله حاضر روش Explicit برای تحلیل رفتار داوول در بتن استفاده شده است. آن‌جا که راه حل استاتیکی یک راه حل با زمان بالاست، حل این مسائل در حالت دینامیکی بسیار وقت‌گیر خواهد بود. بنابراین باید به گونه‌ای آنالیز را شتاب‌دار کرد، ولی مقدار این شتاب نباید به اندازه‌ای باشد که مقادیر نیروهای اینرسی را قابل ملاحظه کند. چراکه در مسایل استاتیکی مقدار این نیروها صفر است. هدف آن است که کوتاه‌ترین مدت زمانی پیدا شود که نیروهای اینرسی در آن قابل صرف‌نظر کردن باشند. این کار از طریق آزمون و خطا با آنالیز مدل در زمان‌های متفاوتی انجام شد و زمان مربوطه ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است بررسی مقادیر انرژی جنبشی مدل یک روش مناسب برای مقدار نیروهای اینرسی می‌باشد. در بخش نتایج آنالیز این مورد بررسی و نشان داده شده است.

#### ۲- مدل تماسی داوول و بتن:

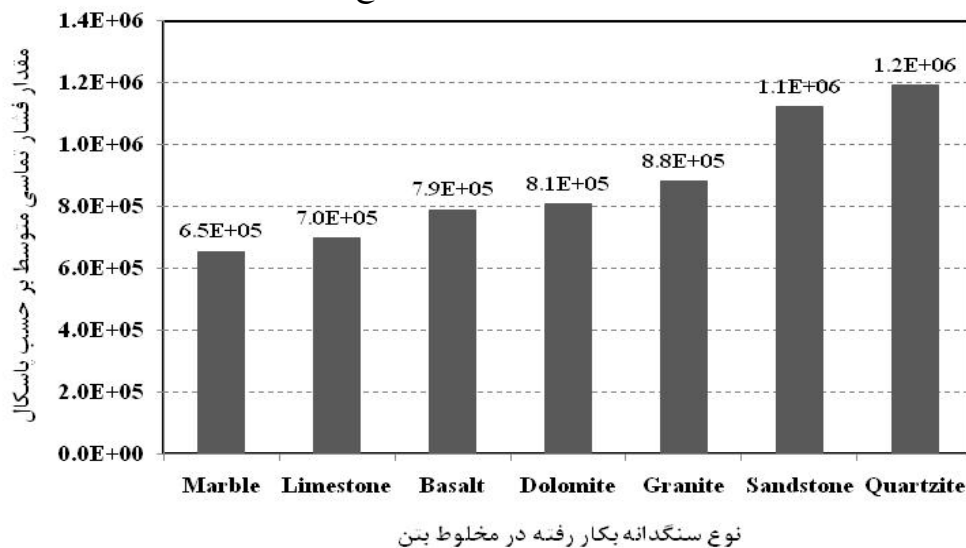
برای تعریف تماس دو سطح برای تعریف تماس در حالت آنالیز Explicit از الگوریتم جفت‌های تماسی (contact pair) استفاده شده است. سطح داوول به عنوان سطح slave و سطح داخلی حفره بتن به عنوان سطح master انتخاب شده است. برای مدل‌سازی رفتار تماسی و لغزشی دو سطح از مدل اصطکاک کلمب استفاده شده است. در این مدل لغزش زمانی آغاز می‌شود که تنش برشی ایجاد شده بین دو سطح از حاصلضرب ضریب اصطکاک در فشار تماسی بیش‌تر شود. مقدار ضریب اصطکاک ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی انقباض بتن یک فیلد حرارتی منفی برای بلوک بتنی با ضرایب انبساط حرارتی متفاوت، در نظر گرفته شده است. قیدهای تماسی از نوع kinematic و در حالت Hard تعریف شده‌اند. ضریب وزنی سطوح  $f=0.5$  در نظر گرفته شده است تا تداخل دو سطح در یکدیگر به حداقل ممکن برسد.



شکل ۲: تغییرات کار خارجی (ALLWK)، انرژی تلف شده توسط اصطکاک (ALLFD)، تغییرات انرژی داخلی (ALLIE) و تغییرات انرژی جنبشی (ALLKE) بر حسب ژول در برابر زمان بر حسب ثانیه در مدت آنالیز Explicit



شکل ۳ میزان نیروی کشنده متوسط برای انواع مختلف سنگدانه



شکل ۴ میزان فشار تماسی متوسط برای انواع مختلف سنگدانه

## نتیجه گیری:

Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, 2004.

[3]. Porter, M.L., Guinn, R.J., "Assessment of Dowel Bar Research," Iowa Department of Transportation, 2002.

[4]. AASHTO, "Guide For Design of Pavement Structures," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.

[5]. Prabhu, M.L., "Effects of Dowel Misalignment on Concrete Pavement Joint Opening Behavior," PHD Dissertation, Michigan State University, 2007.

[6]. Motamarri, S.V., "Dowel-Concrete Contact Characteristics," M.S. Thesis, West Virginia University, 2003.

[7]. Al-Ostaz, A., "Effect of Moisture Content on The Coefficient of Thermal Expansion of Concrete," Department of Civil Engineering The University of Mississippi, Final Report, 2007.

[8]. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc. ABAQUS, Finite Element Computer Program. Version 6.7, 2007.

[9]. Jankowiak, T., Lodygowski, T., "Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model," Poznan University of Technology, Institute of Structural Engineering (ISE), Poland, 2005.

همان طور که قابل پیش بینی بود هرچه مقدار ضریب انبساط حرارتی بتن بیش تر می شود، مقدار فشار تماسی وارد شده از بتن به داول به دلیل انقباض بتن، نیز افزایش می یابد. افزایش فشار تماسی سبب افزایش نیروی محوری لازم برای بیرون کشیدن داول از بتن می گردد. این نیروی محوری در حدود نیروی محوری ایجاد شده در داول در هنگام حرکات افقی دال ها می باشد. افزایش این نیرو در مراحل اولیه گیرش بتن می تواند سبب ترک خوردگی زودهنگام بتن گردد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل المان محدود ارائه شده به خوبی می تواند تغییرات فشار تماسی ناشی از تغییرات ضریب انبساط حرارتی بتن را که تا حدود زیادی به نوع سنگ دانه های مصرفی بستگی دارد پیش بینی کند، به این ترتیب که با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن با تغییر نوع سنگ دانه ها، نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز افزایش می یابد.

## مراجع:

[1]. Huang, Y.H., "Pavement Analysis & Design," Prentice Hall, New Jersey, pp.16-17, 1993.

[2]. Lofsjogar, M., "A Laboratory Investigation on Bonding Properties of Dowels in Concrete Roads,"