مجلهٔ تحقیقات بتن
تابستان۸۹ ،سال سوم، شمارهٔ۱
ص۹۵-۸۹
تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲
تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۲۱

مدل‌سازی المان‌محدود تاثیر نوع سنگ‌دانه‌های بتن در بازشدگی درز در روسازی‌های بتنی

علی منصورخاکی
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم‌وصنعت ایران
mkhaki@iust.ac.ir
احسان آزادروش
دانشجوی کارشناسی ارشد راه‌وترابری، دانشکدهٔ عمران دانشگاه علم‌وصنعت ایران

چکیده:
مدل سه‌بعدی المان‌محدود برای بررسی تاثیر نوع سنگ‌دانه‌ها در میزان نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز در روسازی‌های بتنی، با استفاده از برنامهٔ شبیه‌ساز Abaqus همراه با جزئیات روش مدل‌سازی ارائه شده است. برای مدل‌سازی داول و بتن از المان‌های نوع Solid آجری دارای ۸ گره، استفاده شده است. شبیه‌سازی 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 سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها 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 می‌شود. انقباض بتن در مرحلهٔ گیرش با تعریف یک فیلد حرارتی منفی برای بتن مدل‌سازی شده است. در مورد هر نوع سنگ‌دانه مدل با ضریب انبساط حرارتی مربوطه آنالیز شده و نیروی کشندهٔ لازم و فشار تماسی وارد شده از بتن به داول محاسبه شده است. یافته‌های به دست آمده از این مقایسه و اعتبارسنجی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی یک تحقیق اخیر، نشان می‌دهد که مدل ارائه شده به خوبی می‌تواند تغییرات فشار تماسی ناشی از اثر نوع سنگ‌دانه‌های مخلوط بتن در روسازی‌های بتنی را پیش‌بینی کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن با تغییر نوع سنگ‌دانه‌ها، نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: **روسازی بتنی، داول، مدل‌سازی المان‌محدود، ضریب انبساط حرارتی، Abaqus**

مقدمه:

روسازی‌های بتنی درزدار غیرمسلح یکی از پرکاربردترین انواع روسازی در آمریکا و کشورهای اروپایی هستند. تمام روسازی‌های بتنی غیرمسلح باید در فواصل معینی دارای درز انقباض باشند. داول‌ها یا قفل‌وبست دانه‌ای وسیله‌ای برای انتقال بار از یک دال به دال دیگر در محل درز هستند. بسته به نوع روسازی، آب‌وهوا و تجربه، فاصلهٔ درزها بین ۴/۶ تا ۹ متر متغیر است[۱]. عبور بارهای ترافیکی از روی دال سبب ایجاد تنش در دال می‌شود. وظیفهٔ اصلی داول‌ها 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 داول 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 داول 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 داول در محل درز قرار دارد، شکل و جنس داول تأثیر بسزایی در چگونگی توزیع این تنش‌ها دارد. در حالی که متداول‌ترین نوع داول، داول‌های فولادی با مقطع دایره‌ای هستند، سایر شکل‌ها و مواد ممکن است تأثیر بهتری در پخش این تنش‌ها داشته باشند[۳]. داول‌ها در وسط ضخامت دال در فواصل ۳۰/۴۸ سانتی‌متری(۱۲ اینچ) از یکدیگر قرار می‌گیرند. به عنوان یک قانون کلی قطر داول باید در حدود یک‌هشتم ضخامت دال باشد[۴]. ادارهٔ کل راه‌های فدرال برای بزرگراه‌ها داول با قطر ۳/۱۷۵ سانتی‌متر(۱/۲۵ اینچ) را پیشنهاد می‌دهد. طول کل داول معمولاً ۴۵/۷۲ سانتی‌متر(۱۸ اینچ) است که نصف این طول در داخل هریک از دال‌ها قرار می‌گیرد. داول‌ها پس از ریختن بتن با استفاده از ماشین‌های مخصوص در داخل بتن تازه قرار می‌گیرند یا از قبل به صورت مجموعه‌ای از داول‌ها که به بستر محکم شده‌اند، آمادهٔ قرارگیری بتن روی آنها می‌شوند. در حالی که وظیفهٔ اصلی داول‌ها انتقال بار بین دو دال است، نباید در حرکت آزاد دال‌ها در اثر انقباض و انبساط، ممانعتی ایجاد کند. وجود اصطکاک بین داول و دال سبب ایجاد نیروهای محوری شده که می‌تواند سبب ترک‌خوردگی وسط دال شود. یافته‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی در زمینهٔ رفتار داول در بتن نشان می‌دهد که رفتار نیروی کشنده در مقابل بازشدگی درز در دال‌های بتنی شامل دو مرحله است. مرحلهٔ اول که در آن داول کاملا به بتن چسبیده و مرحلهٔ دوم که مرحلهٔ جداشدگی و لغزش داول در بتن است[۵]. مرحلهٔاول گیرش بتن شامل انقباض آن است. داول درگیر در بتن در مقابل تغییرشکل داخلی بتن در اثر انقباض مقاومت کرده و بنابراین یک فشار تماسی از طرف بتن به داول وارد می‌شود. این فشار تماسی سبب ایجاد نیروهای اصطکاکی شده و مانع از حرکات آزادانهٔ دال‌های بتنی می‌گردد[۶]. مقدار این نیروهای تماسی به فشار شعاعی وارد شده از طرف بتن به داول دارد. بنابراین بررسی انقباض بتن اطراف داول برای شناخت تأثیر این نیروها در مقدار نیروی محوری ایجاد شده در داول 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 برنامهٔ المان‌محدود Abaqus تأثیر نوع سنگ‌دانه‌ها در میزان نیروی محوری ایجاد شده در اثر حرکات افقی دال‌های بتنی در روسازی‌های بتنی بررسی گردد.

مدل‌سازی کامپیوتری رفتار داول در بتن:

۱. انتخاب ابعاد مدل و نوع المان‌ها:

برای بررسی رفتار داول در بتن یک بلوک بتنی به ابعاد ۳۰/۴۸ در ۲۷/۹۴ سانتی‌متر(۱۲در۱۱ 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.

داول 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 داول به اندازهٔ 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.

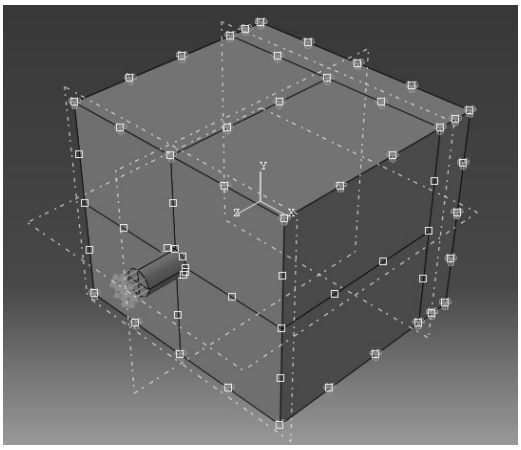
Abaqus دارای یک کتابخانهٔ بزرگ از انواع المان‌ها برای حل بسیاری از مسایل المان محدود می‌باشد. برای مدل‌سازی داول و بلوک بتنی از المان‌های سه‌بعدی نوع solid دارای ۸ گره و ۶ وجه، (C3D8R-Bricks) استفاده شد. این المان‌ها برای آنالیزهای خطی، غیرخطی پیچیده، مسائل تماسی و پلاستیسیتهٔ همراه با تغییرشکل‌های بزرگ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

۱- مواد:

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

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 ترک‌خوردگی در کشش و پکیدگی در فشار مدل‌سازی کند. پارامترهای لازم برای تعریف مدل پلاستیک بتن شامل ψ، ε، fb/fc 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 پلاستیسیتهٔ بتن در جدول ۲ آمده است. ضریب انبساط حرارتی بتن با توجه به نوع سنگ‌دانه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل المان محدود

جدول ۱: معرفی خواص مواد

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

جدول۲ پارامترهای ورودی برای مدل پلاستیسیتهٔ بتن[۹]

Material's parameters	B50	The parameters of CDP model	
		β	38°
Concrete elasticity		m	1
E[GPa]	19.7	$f=f_{b0}/f_c$	1.12
ν	0.19	γ	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

جدول۳ ضریب متوسط حرارتی بتن[۷]

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

۲. روش آنالیز:

Abaqus یک برنامهٔ شبیه‌ساز قوی مهندسی است که اساس آن روش المان محدود است. این برنامه قادر به حل مسائل مختلفی از سادهٔ خطی تا غیرخطی پیچیده می‌باشد. Abaqus دارای دو روش اصلی آنالیز شامل روش استاندارد و Explicit می‌باشد.

حالت استاندارد بیش‌تر 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

دینامیکی توسعه داده شده است ولی تجربیات نشان می‌دهد که این روش مسائل شبه‌استاتیکی را به ویژه زمانی که مدل دارای حالت‌های پیچیدهٔ تماسی بوده و شدیداً غیرخطی است، آسانتر و سریعتر از حالت استاندارد حل می‌کند[۸]. در مقالهٔ حاضر روش Explicit برای تحلیل رفتار داول در بتن استفاده شده است. از 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 داول و بتن:

برای تعریف تماس دو سطح برای تعریف تماس در حالت آنالیز Explicit از الگوریتم جفت‌های تماسی(contact pair) استفاده شده است. سطح داول به عنوان سطح slave و سطح داخلی حفرهٔ بتن به عنوان سطح master انتخاب شده است. برای مدل‌سازی رفتار مماسی و لغزشی دو سطح از مدل اصطکاکی 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.

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 آن‌که فیلد حرارتی و وزن تعریف شدند، داول به اندازهٔ ۰/۶۳۵ سانتی‌متر (۰/۲۵ اینچ) از داخل بتن بیرون کشیده می‌شود. برای آن‌که 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 داول استفاده شده است. برای آن‌که برهم‌کنش داول و بتن در محل اتصال به خوبی مدل‌سازی شود، از یک مش‌بندی ریز در بتن اطراف داول استفاده شده است. به این ترتیب تعداد ۳۹ گره برای بتن در اطراف داول در نظر گرفته شده است.

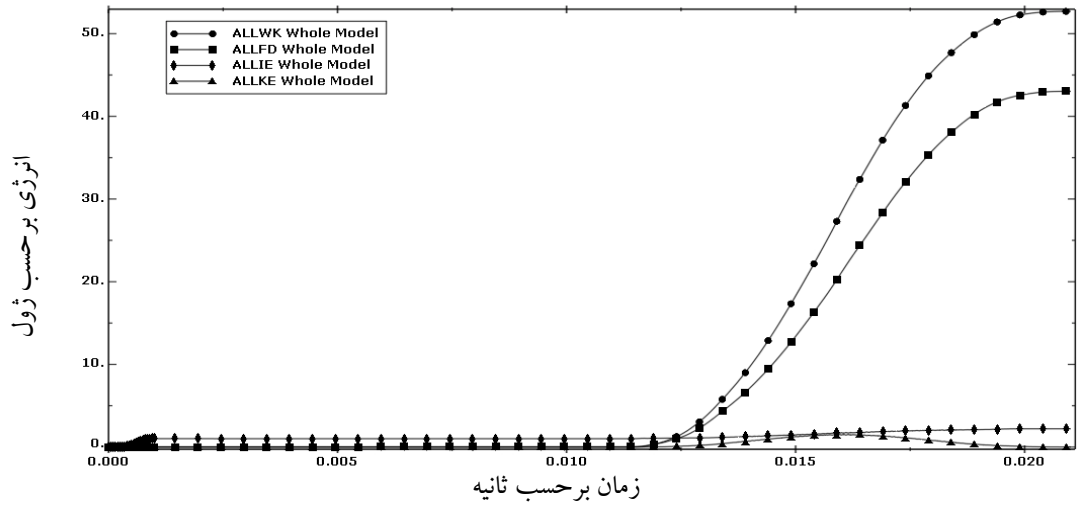
نتایج آنالیز:

۱- بررسی اثر اینرسی در آنالیز Explicit:

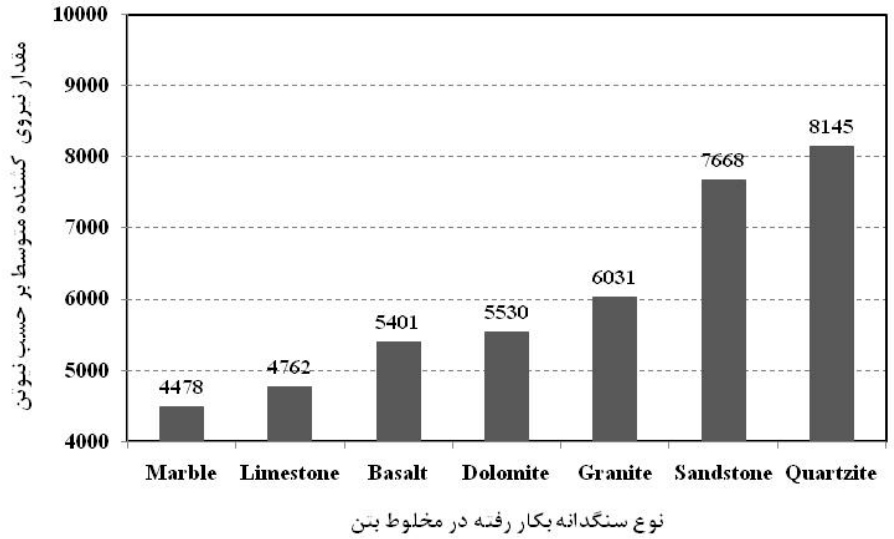
برای بررسی صحت نتایج روش Explicit و اطمینان از کم بودن مقادیر اینرسی در محاسبات نرم‌افزار، کافی است نمودار تغییرات انرژی جنبشی برحسب زمان را در طول زمان انجام آنالیز بررسی کنیم. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر انرژی جنبشی مدل نسبت به کار خارجی و انرژی تلف شده توسط اصطکاک بسیار پایین بوده و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

۲- میزان نیروی کشنده و فشار تماسی:

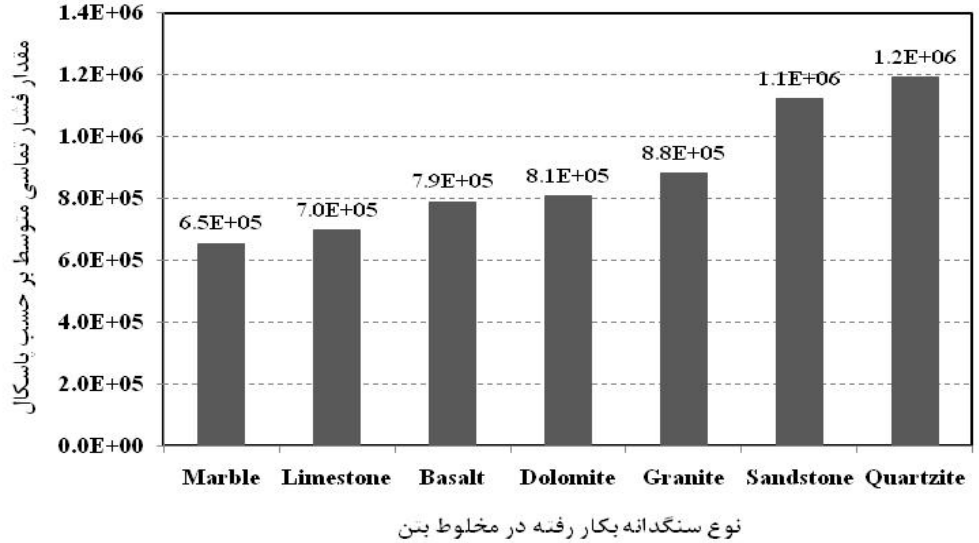
شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقدار نیروی متوسط لازم برای بیرون کشیدن داول از نمونهٔ بتنی و فشار تماسی متوسط، برای هر کدام از انواع سنگ‌دانه‌ها را نشان می‌دهد. میزان نیروی کشنده مجموع تنش‌های برشی منتقل شده بین داول و بتن بوده و با ضرب شدن در مساحت جانبی داول نمایانگر نیروی محوری است که در اثر حرکات افقی دال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



شکل ۲: تغییرات کار خارجی(ALLWK)، انرژی تلف شده توسط اصطکاک(ALLFD)، تغییرات انرژی داخلی(ALLIE) و تغییرات انرژی جنبشی(ALLKE) برحسب ژول در برابر زمان برحسب 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

نتیجه‌گیری:

همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود هرچه مقدار ضریب انبساط حرارتی بتن بیش‌تر می‌شود، مقدار فشار تماسی وارد شده از بتن به داول به دلیل انقباض بتن، نیز افزایش می‌یابد. افزایش فشار تماسی سبب افزایش نیروی محوری لازم برای بیرون کشیدن داول از بتن می‌گردد. این نیروی محوری در حدود نیروی محوری ایجاد شده در داول در هنگام حرکات افقی دال‌ها می‌باشد. افزایش این نیرو در مراحل اولیهٔ گیرش بتن می‌تواند سبب ترک‌خوردگی زودهنگام بتن گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل المان‌محدود ارائه شده به خوبی می‌تواند تغییرات فشار تماسی ناشی از تغییرات ضریب انبساط حرارتی بتن را که تا حدود زیادی به نوع سنگ‌دانه‌های مصرفی بستگی دارد پیش‌بینی کند، به این ترتیب که با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن با تغییر نوع سنگ‌دانه‌ها، نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز افزایش می‌یابد.

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," 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 SateUniversity, 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.