

بررسی رفتار مصالح بتن آسفالتی برای کاربرد در سدهای خاکی و سنگریزه‌یی

سیامک فیضی‌خانکندی (دکتری)

عباس اصغر میرقاسمی (دانشیار)

عباس قلندرزاده (استادیار)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

کاره هوک (استاد)

دانشگاه اسلو و مؤسسه‌ی ژئوتکنیک NGI

در نوشتار حاضر، رفتار استاتیکی و دینامیکی مصالح بتن آسفالتی به‌منزله‌ی یک عنصر آب‌بند در سدهای خاکی و سنگریزه‌یی مطالعه شده است. بدین‌منظور تعداد زیادی از آزمایش‌های مونوتونیک و دوره‌یی با استفاده از دستگاه دینامیکی MTS موجود در مؤسسه‌ی تحقیقاتی نروژ^۱ NGI انجام شد. آزمایش‌ها در درجه‌ی حرارت، تنش‌های همه‌جانبه، ناهمسانی و سرعت بارگذاری‌های مختلف انجام شده است. تعیین پارامترهای دینامیکی و نوع رفتار مصالح بتن آسفالتی در زمان اعمال بارهای دوره‌یی و تأثیر پارامترهای مختلف نظیر دما، تنش، ناهمسانی و سرعت بارگذاری از اهداف این مطالعه بوده است. برای مطالعه‌ی رفتار این مصالح، تعدادی آزمایش مونوتونیک بلافاصله بعد از آزمایش دوره‌یی بر روی تعدادی از نمونه‌ها انجام و منحنی‌های رفتاری نمونه‌ها قبل و بعد از بارگذاری مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده حاکی از رفتار مناسب مصالح بتن آسفالتی در برابر بارهای دینامیکی است و حتی پس از هزاران دوره‌ی بارگذاری کاهش قابل‌توجهی در مقاومت این مصالح مشاهده نمی‌شود.

sfeizi@ut.ac.ir
aghasemi@ut.ac.ir
aghaland@ut.ac.ir
kaare.hoeg@ngi.no

واژگان کلیدی: سدخاکی و سنگریزه‌یی، بتن آسفالتی، آزمایش‌های دوره‌یی، آزمایش‌های مونوتونیک.

مقدمه

کم‌اطلاعی از رفتار دینامیکی مصالح بتن آسفالتی و نیز نامشخص بودن رفتار توأم آن در یک رخداد زلزله با سایر قسمت‌های سد است. در واقع مطالعه‌ی دقیق رفتار دینامیکی مصالح بتن آسفالتی در محدوده‌ی کرنش‌های کوچک تا متوسط برای ارائه‌ی مدل مناسب رفتار غیرخطی آن و بررسی رفتار این مصالح در تغییرشکل‌های بزرگ برای مطالعه‌ی رفتار خودترمیمی آن ضروری است. از طرف دیگر با توجه به طبیعت چسبندگی این مصالح، رفتار آن در بارگذاری‌های سریع و به عبارت دیگر تأثیر سرعت و بسامد بارگذاری بر رفتار آن باید به‌دقت مطالعه شود. محصول این مطالعه که به‌صورت آزمایش‌های المان‌تست انجام می‌شود، اطلاعات مناسبی در مورد نحوه‌ی انتخاب مدل مناسب رفتاری و انتخاب صحیح پارامترهای ورودی برای تحلیل‌های عددی را فراهم می‌کند.

بررسی رفتار سدهای خاکی شامل دو قسمت اساسی است: بخش اول مربوط به تحلیل‌های عددی و بخش دیگر مربوط به کارهای آزمایشگاهی است که این مسئله خصوصاً در نواحی لرزه‌خیز اهمیت بیشتری دارد. لذا مطالعات جامعی برای بررسی رفتار لرزه‌یی این سدها شروع شده است که در نوشتار حاضر، بخش آزمایش‌های المان‌تست ارائه می‌شود.

هسته‌ی بتن آسفالتی، در ۱۹۴۸ برای اولین بار به‌منزله‌ی عنصر آب‌بند در سدهای سنگریزه‌یی استفاده شد. این نوع هسته با نفوذپذیری بسیار کم و خاصیت انعطاف‌پذیری بالا است و تراکم‌پذیری خوبی دارد که امکان ساخت بدون درزه‌ی هسته را میسر می‌سازد.^[۱]

یکی از بهترین مزایای این نوع هسته، تابع نبودن ساخت آن نسبت به شرایط آب و هوایی است. ساخت این نوع سدها در نواحی مرطوب و پرباران نظیر مناطق شمالی و غربی ساده‌تر و مشکلات و مسائل هسته‌ی رسی چون کنترل درصد رطوبت بهینه را ندارد. مناطق شمالی و غربی ایران پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارند و به این دلیل رفتار دینامیکی این نوع سدها باید کاملاً بررسی و در صورت داشتن رفتار مناسب در طرح‌های ملی در نظر گرفته شود. با توجه به این که ایران در منطقه‌ی لرزه‌خیزی بالایی قرار دارد، توجه به رفتار دینامیکی این نوع سدها اهمیت زیادی دارد.

مشکل اصلی در مطالعه‌ی رفتار سدهای سنگریزه‌یی با هسته‌ی آسفالتی،

مروری بر تحقیقات گذشته

اولین بار در سال ۱۹۷۳ در آلمان، مطالعاتی روی هسته‌های بتن آسفالتی آغاز شد.^[۱] با به کارگیری روش تحلیل تیر برشی (روش مارتین و سید)، تنش‌های برشی دینامیکی در مرکز هسته‌ی عمودی ۱۸۰ متری یک سد بتن آسفالتی که در معرض مؤلفه‌ی افقی N-S طیف El-Centro قرار داشت محاسبه شد. سپس با طرح دستگاهی، نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی را شبیه‌سازی کردند. در خانمه نتیجه گرفتند که تا ۲۰۰ دور، تغییرات ساختاری و مقاومتی چندانی در هسته‌ی آسفالتی رخ نمی‌دهد. تغییر مکان‌ها به صورت خطی و متناسب با بار برشی اعمالی است و در موقع باربرداری به صفر میل می‌کند.

در دانشگاه صنعتی شریف (بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۰)، تحقیقاتی در زمینه مصالح آسفالتی، آثار سنگ‌دانه و درصد قیر با انجام آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری، بیشتر در بررسی اثر دانه‌بندی و شکل سنگ‌دانه‌ها، نوع قیر و درصد آن با استناد به آزمایش‌های مارشال و به‌منزله‌ی تأییدی بر استفاده از منحنی فولر انجام شده است. در این منحنی دانه‌بندی، بعد بیشینه‌ی سنگ‌دانه‌ها ۱۹ میلی‌متر است.^[۳-۱]

در سال ۲۰۰۲ در ژاپن نیز کارهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های به دست آمده از سد Higashifuji با رویه‌ی آسفالتی که تحت زلزله‌ی ۱۹۹۶ قرار گرفت انجام شد.^[۵] این زلزله در ۱۵ کیلومتری شمال سد رخ داد که مطابق گزارش اداری لرزه‌نگاری ژاپن، مقادیر شتاب ثبت شده در سنگ بستر و تاج سد به ترتیب، ۰/۸۵ و ۰/۳۸، شتاب جاذبه بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده، پارامتری به نام کرنش جاری شدن دینامیکی (حد ترک خوردگی مصالح) را به‌منزله‌ی معیار ترک خوردگی بتن آسفالتی تعریف کرده‌اند که البته بسیار محافظه‌کارانه است.

در سال ۲۰۰۴ در چین آزمایش‌های دوره‌ی بر روی نمونه‌های ۴ سد با هسته‌ی آسفالتی انجام شد.^[۶] و کرنش‌های دینامیکی محوری، در محدوده‌ی کشسانی باقی ماندند و هیچ نشانه‌ی از ترک در نمونه‌های ساخته شده دیده نشد که حاکی از رفتار مطلوب این نوع مصالح است. در اکثر تحقیقات انجام شده، نوع بارگذاری دوره‌ی به صورت یک طرفه بوده است که نمی‌توانست بارگذاری زلزله را به درستی شبیه‌سازی کند. در این پژوهش، با اصلاح دستگاه موجود در آزمایشگاه NGI نروژ، امکان اعمال بارگذاری دوسویه با بسامدهای مختلف برای شبیه‌سازی بیشتر، با انجام طیف وسیعی از آزمایش‌های دوره‌ی وجود داشته است و همچنین نمونه‌های بتن آسفالتی با روش ساخت ارائه شده در بخش ۳ آماده شدند. ابتدا تعدادی از نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند و نتایج آزمایش ثبت شد. سپس نمونه‌های دیگر تحت بارگذاری دوره‌ی قرار گرفتند و منحنی هیستریزس نمونه‌ها به دست آمد که بر اساس نتایج آزمایش‌ها، پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مصالح محاسبه شد.

طرز تهیه نمونه‌های سه محوری

در تحقیق جاری، روش کار به این صورت بود که ابتدا بر اساس منحنی فولر، پوش دانه‌بندی مناسب تعیین و بر اساس آن مقادیر قیر، فیلر و سنگ‌دانه مشخص شدند. مصالح طبق مشخصات به دست آمده وزن و داخل کوره قرار گرفتند.

با توجه به توصیه‌ی اداره‌ی روسازی ایالات متحده^[۷] (در مورد درجه‌ی حرارت مصالح و مخلوط بتن آسفالتی، زمان و درجه‌ی حرارت لازم برای ترکیب اجزاء)، درجه‌ی حرارت سنگ‌دانه‌ها و قیر قبل از مخلوط شدن باید به حدود ۱۵۰ درجه‌ی

سانتی‌گراد رسیده باشد. مصالح حدود ۶ ساعت داخل کوره قرار گرفتند و پس از رسیدن به دمای مورد نظر، داخل میکسر و به مدت ۳ دقیقه کاملاً مخلوط شدند. با توجه به توصیه‌ی اداره‌ی روسازی امریکا، دمای بهینه برای انجام عمل تراکم به نوع قیر بستگی دارد و در مورد قیر B۶۰ که در تحقیق جاری استفاده شده است، دمای ۱۴۲-۱۳۲ درجه توصیه شده است. ساخت نمونه‌های اصلی (با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر)، در ۴ لایه (به ضخامت تقریبی ۶ سانتی‌متر در هر لایه) انجام و برای انجام عمل تراکم از چکش استاندارد به وزن ۴/۵ کیلوگرم و با ارتفاع سقوط ۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. در هر لایه به تعداد ۳۰ ضربه و در کل نمونه ۱۲۰ ضربه برای تراکم مورد نیاز بود.

پس از ساخت نمونه‌ها و سرد شدن آن‌ها، آزمایش‌های تکمیلی چگالی و مقدار حفره‌ها به عمل آمد که این درصد باید به عدد زیر ۱٪ می‌رسید.^[۸]

آزمایش‌های سه محوری مونوتونیک

تمامی نمونه‌های ساخته شده در اتاق با درجه‌ی حرارت ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد (به دلیل شرایط مشابه با سایت سد) قرار گرفتند. ۶ آزمایش مونوتونیک برای بررسی رفتار استاتیک مصالح بتن آسفالتی پیش‌بینی شد. فشارهای هم‌جانبه تا ۱۰۰۰ کیلوپاسکال تا حد گسیختگی (با اعمال فشار انحرافی) و رسیدن به نقطه‌ی نهایی که در برخی نمونه‌ها کرنش ۲۰٪ را می‌طلبید، اعمال شد. روش کار بدین صورت بود که نمونه‌ها با ممبرین (غشای لاستیکی) پوشانیده شدند و داخل سلول دستگاه سه‌محوری و سپس کل دستگاه در سلول بزرگ دیگری که نقش تنظیم درجه‌ی حرارت را داشت، قرار گرفتند و سپس فشارهای هم‌جانبه مطابق برنامه اعمال شد. پس از گذشت ۱۲ ساعت و ثابت شدن مقادیر تغییر مکان و درجه‌ی حرارت، بارهای محوری تا حد گسیختگی نمونه اعمال و آزمایش‌ها به صورت کرنش-کنترل و با سرعت ۲٪ در ساعت انجام شد. با استفاده از حس‌گرهای الکتریکی موجود، مقادیر نیرو، تغییر مکان و تغییرات حجم با دقت بسیار بالا ثبت شد. برای اطمینان از نتایج، دو تست مشابه در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی یکسان طراحی شده بود. جدول ۱ مختصراً مشخصات پارامترهای آزمایش را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش‌های سه محوری مونوتونیک

با توجه به انجام آزمایش‌ها تا محدوده‌ی کرنش‌های ۲۰٪، نمونه‌ها شکل خمربهی به خود گرفتند و ترک‌های جدی در سطح آن‌ها مشاهده شد. برای اینکه منحنی کامل رفتاری نمونه‌ی بتن آسفالتی (منحنی $\sigma_d - \epsilon$) ترسیم شود بایستی آزمایش تا

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های سه محوری مونوتونیک.

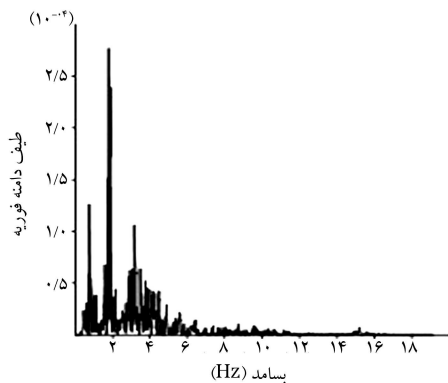
| شماره آزمایش | σ_r (kPa) | E (Mpa) (%) | $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa) | درجه حرارت (C°) | کرنش محوری در لحظه گسیختگی (%) |
|--------------|------------------|-------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|
| T۱ | ۲۵۰ | ۱۳۵ | ۲۵۲۲ | ۵ | ۵/۵ |
| T۲ | ۲۵۰ | ۱۱۰ | ۲۱۹۷ | ۵ | ۵/۵ |
| T۳ | ۵۰۰ | ۱۵۰ | ۳۱۲۹ | ۵ | ۶ |
| T۴ | ۵۰۰ | ۱۶۵ | ۳۳۳۲ | ۵ | ۶ |
| T۵ | ۱۰۰۰ | ۱۶۰ | ۳۸۷۹ | ۵ | ۱۵ |
| T۶ | ۱۰۰۰ | ۱۵۰ | ۳۷۹۳ | ۵ | ۱۵ |

فشارهای همه‌جانبه) برنامه‌ریزی آزمایش‌ها به انجام رسید. پارامترهای مؤثری که آثار قابل‌توجهی بر رفتار مصالح آسفالتی دارند، نظیر درجه‌ی حرارت، سرعت بارگذاری دوره‌ی، بسامد بارگذاری، تعداد دوره‌ی اعمالی، ناهمسانی و فشار همه‌جانبه در برنامه‌ریزی آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت. دستگاه MTS موجود در شرکت NGI نروژ (شکل ۲) برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد.

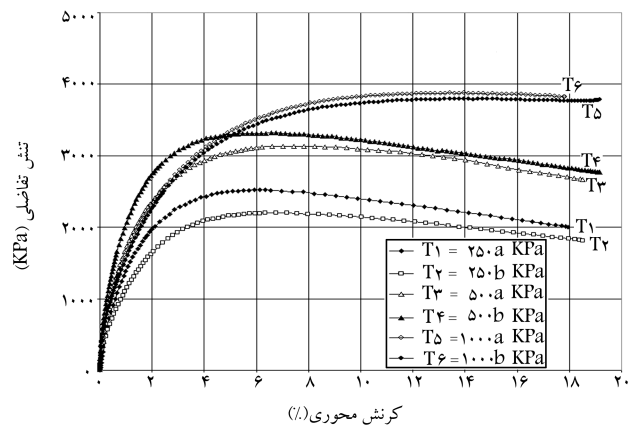
برای شروع آزمایش، نمونه‌ها از اتاق با درجه‌ی حرارت ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به درون سلول آزمایش منتقل شدند. در انتخاب محدوده‌ی پارامترهای مورد آزمایش از تحلیل‌های عددی، ادبیات فنی و تجارب پژوهشگران مختلف استفاده شده است. [۱۱-۱۳] مثلاً تغییرات درجه‌ی حرارت با استناد به شرایط آب و هوایی مناطق ساخت این نوع سدها و رفتارنگاری و نتایج ابزار حرارتی نصب‌شده در داخل هسته‌ها انتخاب شدند (درجه‌ی حرارت بین ۵ تا ۱۸ درجه‌ی سانتی‌گراد که دو سطح دمای پایین و دمای بالا را نشان می‌دهد). در مورد میزان فشارهای همه‌جانبه و بیشتر بودن پتانسیل آسیب‌پذیری نقاط نزدیک به تاج سد در زمان زلزله، از فشار بیشینه‌ی همه‌جانبه‌ی ۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. بر اساس تحلیل‌های عددی و با استناد به تحلیل‌های فوریه که انرژی زلزله‌ی بیشینه را در حدود بسامدهای ۲ تا ۴ نشان می‌داد (شکل ۳)، مقادیر بسامدهای بارگذاری بین ۲ تا ۱۰ هرتز انتخاب شدند. تعداد دوره‌های بارگذاری عموماً ۵۰ سیکل بوده است. انتخاب عدد ۵۰ به دلیل مشابهت آن با زلزله‌ی حدود ۷/۵ ریشتر است که از لحاظ تعداد دوره‌های معادل بارگذاری، تقریباً یکسان هستند. [۱۳، ۱۴] در برخی از آزمایش‌ها و برای بررسی رفتار خستگی از تعداد دوره‌های ۱۰۰۰۰ نیز استفاده شد که اطلاعات ارزشمندی از افت مقاومت مصالح را ارائه می‌دهند. آزمایش‌ها در دو حالت همسان (Isotropic) و ناهمسان (Anisotropic) انجام شده است.



شکل ۲. نمایی از دستگاه سه محوری دوره‌ی مؤسسه‌ی NGI.



شکل ۳. نمودار دامنه‌ی موج با بسامد بر حسب تبدیل فوریه.



شکل ۱. نمودار تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری.

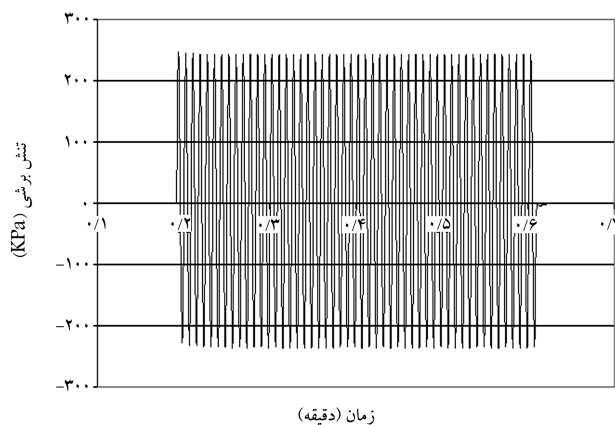
کرنش‌های بسیار بالا ادامه پیدا کند. بدیهی است در چنین کرنش‌هایی که نمونه کاملاً به حالت گسیختگی رسیده و شکل آن از حالت استوانه‌یی به خمربندی تغییر یافته است، وجود ترک‌های عمیق اجتناب‌ناپذیر است. خلاصه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مونوتونیک در جدول ۱ آمده است. شکل ۱ مقادیر تنش‌های تفاضلی $(\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3)$ را برای فشارهای همه‌جانبه ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در مقابل کرنش محوری نشان می‌دهند. شکل‌های ارائه‌شده برای فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف، نشان از ساخت همگن نمونه‌های بتن آسفالتی دارد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش فشارهای همه‌جانبه، مقاومت نهایی بیشتری هم در نمونه‌ها دیده می‌شود. یکی از دلایل آن رفتار سخت‌تر مصالح آسفالتی با افزایش فشار همه‌جانبه است. مقادیر کرنش‌های محوری در نقاط بیشینه برای فشارهای همه‌جانبه ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب ۵، ۶ و ۱۵ درصد است و نشان می‌دهد که افزایش فشارهای همه‌جانبه باعث گسیختگی نمونه‌ها در کرنش‌های بالاتر می‌شود. پارامتر دیگری که می‌توان با توجه به شکل‌های ارائه‌شده استخراج کرد، مدول کشسانی نمونه‌های بتن آسفالتی در حدود کرنش‌های ۱٪ است. برای محاسبه‌ی مدول کشسانی، از رابطه‌ی $E = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d}$ استفاده شد که در این رابطه σ_d معرف تنش تفاضلی و ϵ_d معرف کرنش محوری است. مقدار متوسط مدول کشسانی به دست آمده برای فشارهای همه‌جانبه ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، حدود ۱۵۰ مگاپاسکال بود و تا حدود کرنش‌های ۱٪ (کرنش مهندسی)، تغییرات قابل‌توجهی در منحنی‌های ارائه‌شده دیده نشد. در کرنش‌های بالاتر، آثار فشار همه‌جانبه بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته‌شده نمود بیشتری پیدا می‌کند که اختلاف تنش انحرافی بین فشارهای ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در کرنش مثلاً بالای ۳٪ کاملاً مشخص است.

آزمایش‌های سه محوری دوره‌ی

انجام آزمایش‌های سه محوری دوره‌ی در تعیین پارامترهای دینامیکی مصالح، بسیار متداول است. در این آزمایش‌ها، اختلاف تنش‌های محوری و همه‌جانبه به صورت دوره‌ی به نمونه اعمال می‌شود. در شرایط کنترل کرنش و تنش، مشابه آزمایش‌های سه محوری استاتیکی، آزمایش‌های دوره‌ی در شرایط همسان و ناهمسان می‌تواند انجام شود. تنش‌ها و کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده در این آزمایش‌ها، برای محاسبه‌ی مدول برشی و ضرایب میرایی مصالح کاربرد دارد. براساس تحلیل‌های عددی انجام‌شده و با استفاده از داده‌های آن (از لحاظ مقادیر بسامدی، ناهمسانی،

تعریف شرایط بارگذاری

برای اعمال بارگذاری دوطرفه که تنش تفاضلی بر خلاف بارگذاری یک‌سویه، به نزدیک صفر هم می‌رسد، قسمت بالایی میله‌ی بارگذاری MTS اصلاح شد. برای مثال بارگذاری اعمالی برای حالت همسان و $\sigma_3 = 500 \text{ KPa}$ در شکل ۴ نشان داده



شکل ۴. منحنی بارگذاری در برابر زمان برای $\sigma_3 = 500 \text{ KPa}$ و $K_c = 170$ (Type A)

شده است. محوراقتی زمان بارگذاری و محور عمودی تنش‌های برشی است. اعمال بار دوطرفه‌ی دوره‌ی یکی از مهم‌ترین مزایای تحقیق جاری است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های بتن آسفالتی به ۳ صورت بوده که در ذیل و در جدول ۲ نیز به آن اشاره شده است:

بارگذاری نوع A: حالت همسان با بارگذاری دوطرفه‌ی متقارن برای $(K_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 170)$ ؛

بارگذاری نوع B: حالت ناهمسان با بارگذاری دوطرفه‌ی نامتقارن برای $(K_c = 270, 370)$ ؛

بارگذاری نوع C: حالت ناهمسان با بارگذاری یک‌طرفه.

شناخت رفتار مصالح، میزان کاهش مقاومت، ترک‌خوردگی و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی برای استفاده در تحلیل‌های عددی در حکم اهداف انجام آزمایش‌های دوره‌ی بوده است که به بررسی آنها می‌پردازیم.

ارائه‌ی نتایج

شکل‌های ارائه‌شده مقادیر تنش‌های برشی در مقابل کرنش محوری را نشان می‌دهد (مثلاً شکل‌های ۵ تا ۷). در این شکل‌ها منحنی هیستریزس برای دور اول و سایر دورها به‌صورت جداگانه آورده شده است تا براساس شکل حلقه‌های موجود و شیب آنها در دوره‌های ابتدایی و نهایی در مورد افت مقاومت، پارامترهای ژئوتکنیکی، میرایی

جدول ۲. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های دوره‌ی.

| شماره آزمایش | σ_3 (kPa) | K_c | T °C | بسامد (Hz) | تعداد دوره | مدول برشی (MPa) | نوع بارگذاری |
|--------------|------------------|-------|------|------------|------------------------|-----------------|--------------|
| F1 | 500 | 1 | 5 | 2 | 50 | 1780 | A |
| F2 | 500 | 1 | 5 | 2 | 50 | 1775 | A |
| F3 | 500 | 2 | 5 | 2 | 50 | 2750 | B |
| F4 | 500 | 2 | 5 | 2 | 50 | 2300 | B |
| T5 | 250 | 1 | 5 | 2 | 50 | 1740 | A |
| T6 | 250 | 2 | 5 | 2 | 50 | 1767 | B |
| T7 | 250 | 3 | 5 | 2 | 50 | 1770 | B |
| T8 | 250 | 2 | 5 | 2 | 50 | 1772 | B and C |
| F9 | 500 | 1 | 5 | 2 | 50, 400, 50 | 2700 | A |
| F11 | 500 | 3 | 5 | 2 | 10000, 50 | 3775 | B |
| E12 | 85 | 1 | 5 | 10 و 2 | 50, 2000, 50 | 1730 | A |
| E13 | 85 | 2 | 5 | 10 و 2 | 50, 10000, 10000, 50 | 1733 | B |
| F14 | 500 | 2 | 5 | 10 و 2 | 50, 10000, 10000, 50 | 3720 | B |
| F15 | 500 | 3 | 5 | 10 و 2 | 5000, 10000, 10000, 50 | 4700 | B |
| T16 | 250 | 2 | 5 | 10 و 2 | 50, 10000, 10000, 50 | 176 | B |
| F17 | 500 | 3 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 1775 | B and C |
| T18 | 250 | 3 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 1725 | B |
| E19 | 85 | 1 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 785 | A |
| T20 | 250 | 1 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 792 | A |
| F21 | 500 | 1 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 1700 | A |
| T22 | 250 | 3 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 1780 | B |
| E23 | 85 | 1 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 775 | A |
| F24 | 500 | 3 | 18 | 10 و 5.2 | 50, 50, 50, 50 | 1790 | B |

در نمونه‌های بتن آسفالتی نشده است. این نتیجه از روی شیب متوسط منحنی در دوره‌های مختلف و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر به دست می‌آید. مقدار مدول برشی حدود (۳-۱۷۵) گیگاپاسکال در دوره‌های اول است که کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مقاومت در سیکل ۵۰ نشان از رفتار مناسب مصالح بتن آسفالتی دارد.

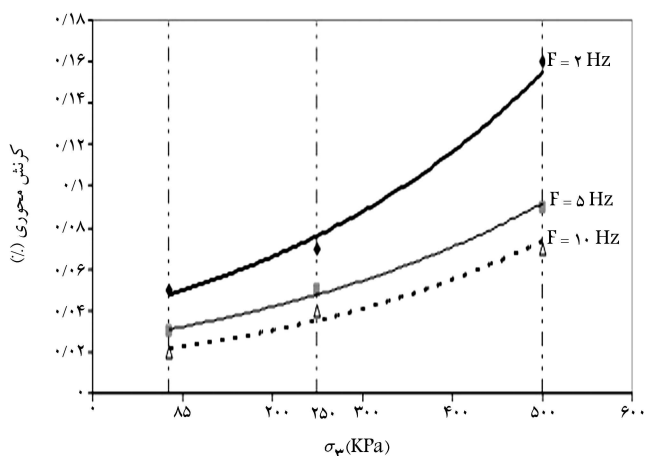
بررسی کمی پارامترهای دینامیکی

پارامتر مهمی که از شکل‌ها قابل استخراج است، میزان کرنش‌های دوره‌ی ایجاد شده در نمونه‌هاست. مقادیر کرنش در محدوده‌ی بسیار کوچکی بود که بدون استفاده از حس‌گرهای ویژه امکان ثبت آنها وجود نداشت. در شکل ۸ مقادیر کرنش‌های به دست آمده در آزمایش‌های ۳ محوری دوره‌ی در تمام شرایط (از لحاظ درجه‌ی حرارت، بسامد و مقدار ناهمسان) به صورت شماتیک تحت مقادیر مختلف فشارهای همه‌جانبه ارائه شده است.

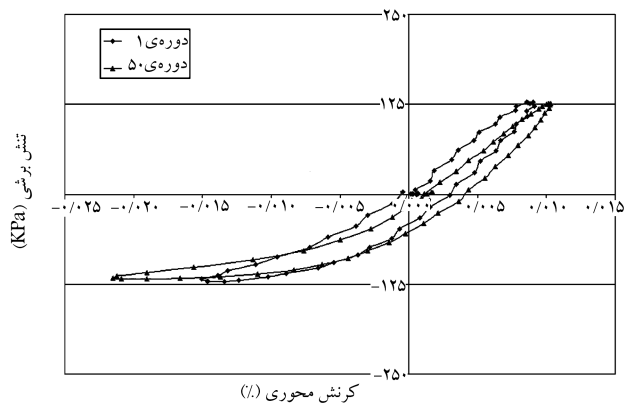
یکی از دلایل کوچک بودن مقادیر کرنش ایجاد شده تحت بارگذاری دوره‌ی، تراکم خوب و استفاده از روش مناسب و توصیه شده‌ی مارشال است. افزایش فشارهای همه‌جانبه و اعمال بارهای دوره‌ی باعث ایجاد کرنش‌های بزرگ‌تر می‌شود. بیشترین مقادیر کرنش در درجه‌ی حرارت ۱۸ و بسامد بارگذاری ۲ هرتز بوده است. اعداد به دست آمده برای بسامدهای ۵ و ۱۰ هرتز و نیز درجه‌ی حرارت پایین‌تر، کمتر از مقادیر بالا بوده است.

بلافاصله پس از انجام آزمایش‌ها که بعضاً تا حدود هزاران دور نیز ادامه پیدا می‌کرد، سطوح نمونه‌ها با چشم مسلح و غیرمسلح بازرسی می‌شد که در برخی از موارد بررسی سطح نمونه‌ها با استفاده از بزرگ‌نماهای دیجیتالی که قابل اتصال به رایانه بودند انجام شد. تعدادی از نمونه‌ها برش داده شد تا مقطع داخلی آنها نیز در دسترس باشد. لیکن هیچ نشانه‌ی از وجود عیب یا ترکی جدی که حاکی از تأثیر بارگذاری دوره‌ی باشد دیده نشد که نشان از مقاومت خوب و قابل قبول مصالح تحت بارگذاری دوره‌ی بوده است. انعطاف‌پذیری مصالح بتن آسفالتی به دلیل درصد بالای قیر بهینه (و در اصطلاح نمونه Rich) دلیل دیگر نبود ترک‌های جدی در نمونه‌های مورد آزمایش بود.

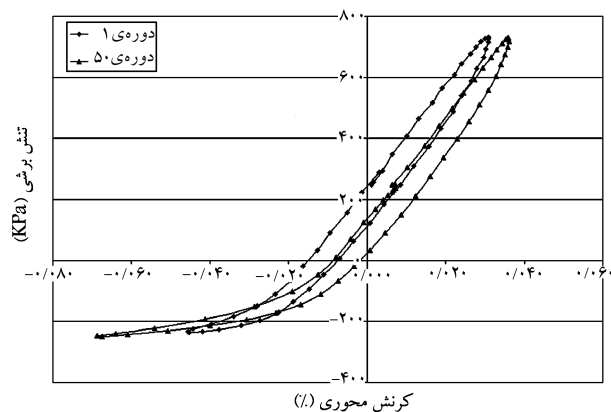
از روی شیب متوسط، نمودارهای مقدار مدول برشی در حالت همسان حدود 175 GPa و در حالت ناهمسان ۲ و ۳ در حدود 3 GPa به دست می‌آید (جدول ۲). در محاسبه‌ی اعداد ارائه شده، از متوسط شیب حلقه‌های هیستریزس در دوره‌های مختلف استفاده شده است. البته مقادیر ارائه شده برای دمای ۵ درجه است. چه در



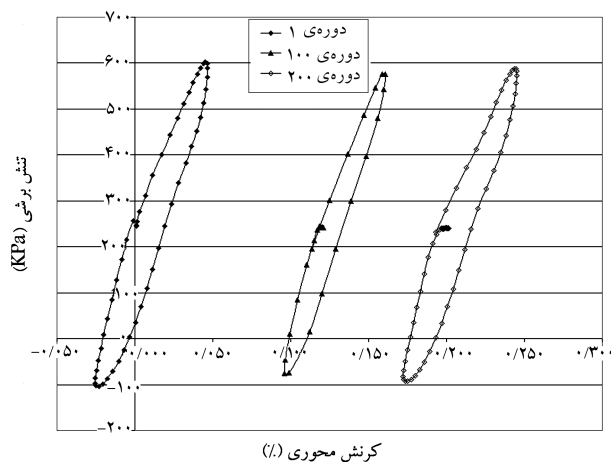
شکل ۸. منحنی تنش-کرنش در بسامدهای مختلف.



شکل ۵. منحنی هیستریزس برای تست T5.



شکل ۶. منحنی هیستریزس برای تست F4.



شکل ۷. منحنی هیستریزس برای تست T18.

و مسائل دیگر بحث کرد. نتایج ارائه شده در ۳ بخش بررسی می‌شود:

۱. حالت همسان با $Kc=1$ (در درجه‌ی حرارت‌های ۵ و ۱۸ درجه)؛
۲. حالت ناهمسان با $Kc=2$ (در درجه‌ی حرارت ۵ درجه)؛
۳. حالت ناهمسان با $Kc=3$ (در درجه‌ی حرارت‌های ۵ و ۱۸ درجه).

نوع منحنی هیستریزس و شیب متوسط آن معیار مناسبی برای بررسی میزان افت مقاومت مصالح بتن آسفالتی است. آنچه که از این شکل‌ها می‌توان در نظر اول برداشت کرد این است که اعمال بارهای دوره‌ی سبب افت محسوس مقاومت

حالت همسان و چه در حالت ناهمسان، تأثیر فشارهای همه‌جانبه بر مقادیر این مدول کم است. البته با افزایش مقدار ناهمسانی تا عدد ۳، تا حدودی اختلاف بین مقادیر مدول برشی در فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف دیده می‌شود. همان‌گونه هم که انتظار می‌رود بیشترین مقدار آن در دمای ۵ درجه متعلق به حالت با ناهمسانی ۳ و فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ kPa است. مقادیر مدول برشی برای درجه‌ی حرارت ۱۸ درجه‌ی سانتی‌گراد، حدود نصف مقادیر بالاست. پارامتر دیگری که حائز اهمیت است مقدار میرایی است. رابطه‌ی مورد استفاده با توجه به روابط دینامیک خاک عبارت است از:

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{Area of hysteresis loop}}{\text{Area of triangle}} \quad (1)$$

مساحت‌های مربوط به هر بخش با توجه به حلقه‌های هیستریزس ارائه شده، محاسبه شد. با توجه به آن، مقدار تغییرات میرایی بین ۰/۰۶۶ تا ۰/۳ بود. مقادیر فشارهای همه‌جانبه، تأثیر زیادی بر روی مقدار میرایی نداشت. با این همه با افزایش مقدار ناهمسانی، مقدار میرایی کاهش پیدا می‌کند. بیشترین مقدار میرایی در درجه‌ی حرارت ۱۸ درجه سانتی‌گراد با مقدار ناهمسان ۳ رخ داده است.

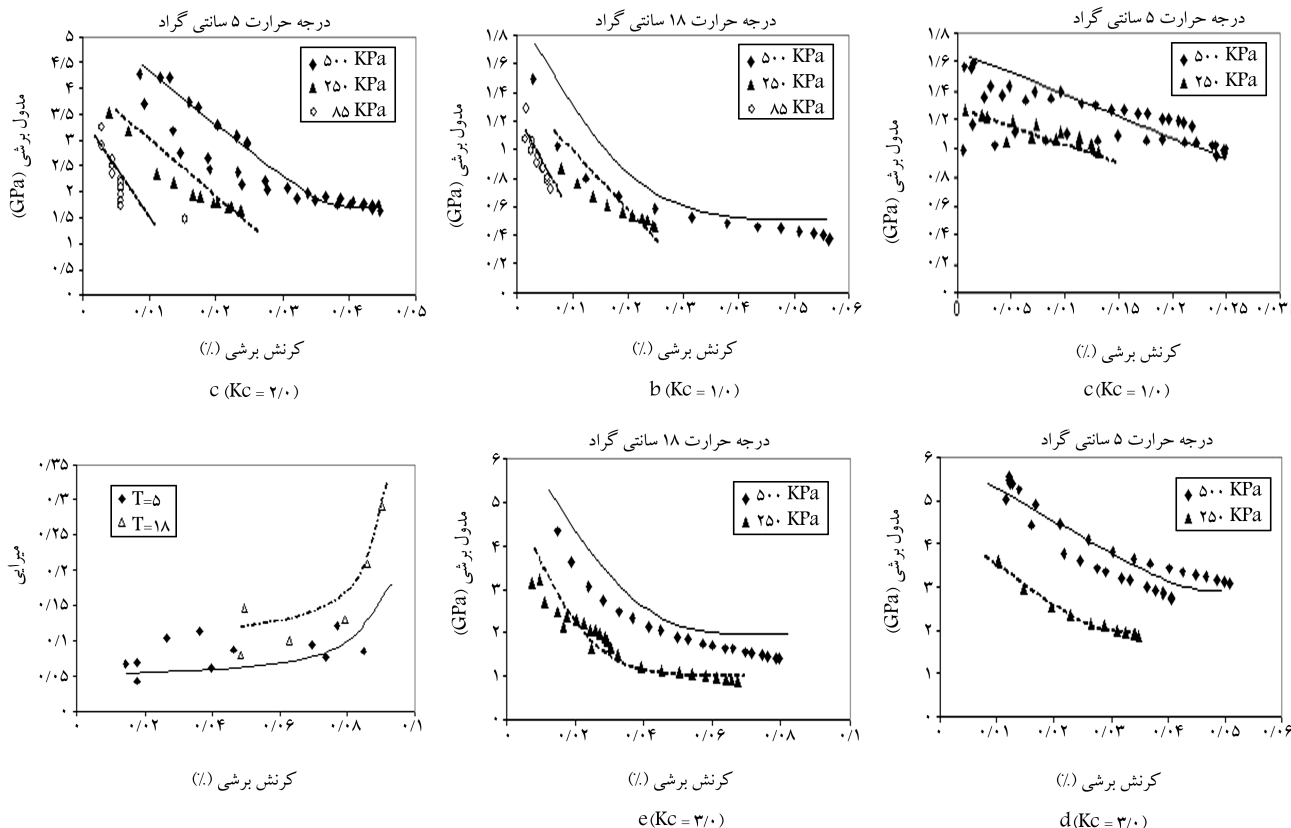
بررسی دقیق‌تر پارامترهای مختلف بر خواص دینامیکی مصالح آسفالتی

بررسی آثار ناهمسانی و درجه حرارت

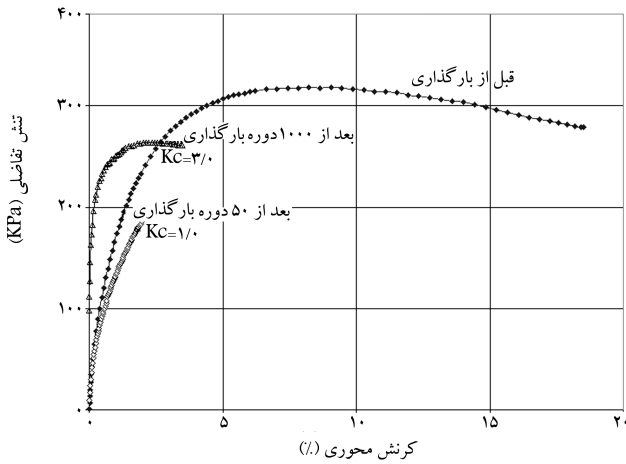
شکل ۹، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر تنش همه‌جانبه، ناهمسانی و درجه حرارت را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که میزان مدول برشی به شدت به مقدار

بررسی تأثیر تعداد دوره‌های بارگذاری

شکل ۱۰، تأثیر تعداد دوره‌های بارگذاری را روی مدول برشی نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ و برای توضیح بهتر، مقادیر مدول برشی در دوره‌های یکم و پنجاهم ارائه شده



شکل ۹. تأثیر تنش همه‌جانبه و ناهمسانی در وابستگی مدول برشی و میرایی به سطح کرنش در درجه‌ی حرارت ۵ و ۱۸ درجه‌ی سانتی‌گراد.

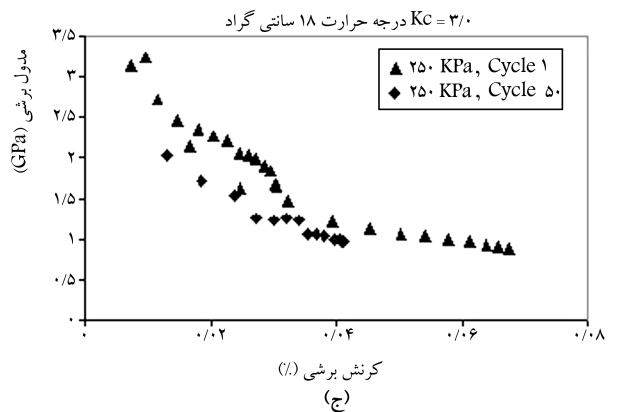
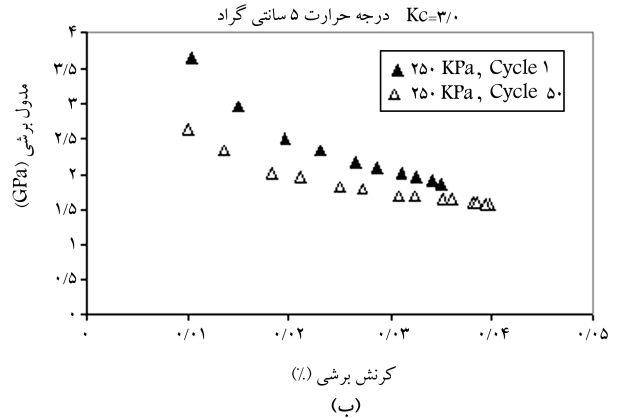
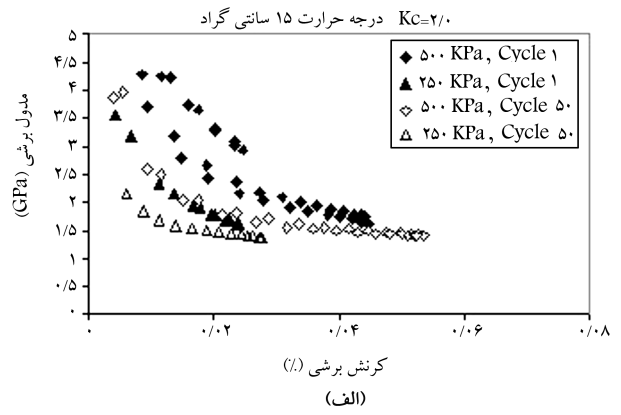


شکل ۱۱. رفتار پس از بارگذاری دوره‌بی.

مقاومتی نمونه‌ها بعد از شوک وارده، تعدادی از این نمونه‌ها بلافاصله بعد از بارگذاری دوره‌بی تحت آزمایش‌های مونوتونیک قرار گرفتند تا با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از آن، بتوان به تخمینی از کاهش مقاومت دست یافت. در حقیقت رفتار پس از بارگذاری دوره‌بی (Post-cyclic behavior) در این قسمت ارائه می‌شود. شکل ۱۱ نتایج آزمایش مونوتونیک پیش از بارگذاری و پس از بارگذاری دوره‌بی را برای یک نمونه نشان می‌دهد. دو آزمایش مونوتونیک برای نمونه‌هایی که تحت بارگذاری همسان و ناهمسان (درجه‌ی ناهمسانی ۳) قرار داشته‌اند، انجام شده است. درجه‌ی حرارت آزمایش ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال انتخاب شده‌اند. نمونه‌ی همسان تحت ۵۰ دور بارگذاری $\pm 500 \text{ KPa}$ و نمونه‌ی ناهمسان تحت هزاران دور بارگذاری $\pm 150 \text{ KPa}$ بوده است. اعمال هزاران دور بارگذاری در نمونه‌ی ناهمسان، به دلیل بررسی اثر دامنه‌ی بارگذاری بالا روی ترک‌خوردگی مصالح بتن آسفالتی بوده است. میتوان مشاهده کرد که منحنی رفتار کلی تغییر چندانی نکرده است و فقط نقطه‌ی بیشینه‌ی آن حدود ۱۰٪ افت مقاومت را نشان می‌دهد. این کاهش مقاومت نگران‌کننده نیست چرا که افزایش نفوذپذیری در مصالح بتن آسفالتی در زمان افت مقاومت ۶۰٪ به بالا محسوس است.^[۴]

نتیجه‌گیری

- در اکثر آزمایش‌ها تعداد دوره‌های اعمالی ۵۰ دور بوده است که معادل با زلزله‌یی با بزرگی ۷٫۵ در مقیاس ریشتر است. در برخی از آزمایش‌ها، تعداد دورها تا هزاران دور ادامه پیدا کرد. با این همه کاهش مقاومتی محسوسی در طول آزمایش‌ها دیده نشد. مقایسه‌ی مقادیر مدول برشی در طول دوره‌های مختلف، این مسئله را نشان می‌دهد.
- بعد از انجام آزمایش‌ها، سطح نمونه‌ها به دقت بررسی شد ولی هیچ اثری از وجود ترک مشاهده نشد.
- فشارهای همه‌جانبه در مقدار مدول برشی تأثیر چندانی نداشت و مقدار آن از حدود $1/5 \text{ GPa}$ برای حالت آزمایش همسان تا 3 GPa برای آزمایش با ناهمسانی ۳ در حال تغییر بود. البته مقادیر ارائه شده برای دمای ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است و در دمای ۱۸ درجه‌ی سانتی‌گراد به نصف کاهش پیدا می‌کند. مقدار میرایی نیز مشابه مدول برشی، وابستگی چندانی به فشارهای همه‌جانبه ندارد. با این همه، افزایش درجه حرارت باعث افزایش مقدار میرایی می‌شود.



شکل ۱۰. تأثیر تعداد دور در مدول برشی.

است. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد دورها، سبب کاهش سطح مدول برشی می‌شود که کاملاً طبیعی است. ولی سطح این افت، خیلی قابل توجه نیست. تأثیر تعداد دورها در کاهش مقاومت مصالح آسفالتی، در تنش‌های همه‌جانبه‌ی کم نمود بیشتری پیدا نمی‌کند. علاوه بر این، با افزایش میزان ضریب ناهمسانی و کاهش درجه حرارت، تأثیر تعداد دوره‌های اعمال شده در نمونه‌ها، کمتر می‌شود.

بررسی رفتار بعد از بارگذاری دوره‌بی^۲

در بخش‌های قبلی، نتایج آزمایش‌های مونوتونیک و دوره‌بی برای نمونه‌های بتن آسفالتی ارائه شد. برای بررسی آثار بارگذاری دینامیک و تخمینی از کاهش سطح

آسفالتی در زمان افت مقاومت ۶۰٪ به بالا محسوس است. از طرف دیگر طبق نتایج به دست آمده از ابزار در سدهای خاکی، دمای هسته به ندرت از ۱۵ درجه سانتیگراد فراتر می‌رود. بنابراین نگرانی خاصی در مورد افت مقاومت بعد از بارگذاری زلزله وجود ندارد.

• نتایج به دست آمده حاکی از رفتار مناسب مصالح بتن آسفالتی در مقابل رویداد زلزله است. این پاسخ مناسب خصوصاً در نواحی سردسیر و بارانی با متوسط درجه حرارت سالیانه‌ی پایین محسوس‌تر است.

تشکر و قدردانی

انجام این تحقیق با حمایت شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، بخش معاونت پژوهش‌ها، شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس و شرکت نروژی Kolo-Veidekke انجام شد که جای تشکر و سپاس فراوان دارد.

• مقادیر کرنش برشی در حالت پیشینه به ۰/۱۵٪ می‌رسد. حتی با افزایش دورها، افزایش چندانی در مقادیر کرنش‌ها مشاهده نمی‌شود. افزایش سرعت بارگذاری، مقادیر کرنش کمتری را نتیجه می‌دهد. چون مصالح بتن آسفالتی در بسامدهای بالا (نظیر ۵ و ۱۰ هرتز) نمی‌توانند خاصیت انعطاف‌پذیری خود را به خوبی نشان دهند و همین عامل باعث ایجاد کرنش‌های کوچک‌تر در سرعت‌های بالای بارگذاری می‌شود.

• بعد از انجام آزمایش‌های دوره‌ی، تعدادی از نمونه‌ها مجدداً تحت بارگذاری یکنواخت قرار گرفتند تا منحنی رفتاری آن‌ها با حالت نمونه‌های بدون بارگذاری دوره‌ی مقایسه و مقدار افت مقاومتی معلوم شود. مشخص شد که منحنی رفتار کلی تغییر چندانی نکرده است و فقط نقطه‌ی پیشینه‌ی آن حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد افت مقاومت را در دمای ۵ و ۱۸ درجه‌ی سانتیگراد نشان می‌دهد. این کاهش مقاومت نگران‌کننده نیست چرا که افزایش نفوذپذیری در مصالح بتن

پانویس

1. Norwegian Geotechnical Institute
2. Post-cyclic behavior

منابع

1. Creegan, P., and Monismith, C., "Asphaltic concrete water barriers for embankment dams", *ASCE Press* (1996).
2. Breth, H., and Schawab, H.H., "Zur Eignung des asphaltbetons für die innendichtung von staudammen", *Wasswirtschaft* 69, Heft 11, Stuttgart, Germany, pp. 348-351 (1973).
3. فتحی، عباس، «بررسی عملکرد سدهای سنگریزه‌ی با هسته آسفالتی»، پایان نامه، دانشگاه صنعتی شریف (بهمن ۱۳۸۰).
4. زریباف زاده، احمدرضا، «بررسی رفتار سدهای خاکی و سنگریزه‌ی با هسته بتن آسفالتی»، پایان نامه، دانشگاه صنعتی شریف (دی ۱۳۷۵).
5. Ohne, Y., Nakamura, Y., Okumura, T., and Narita, K., "Earthquake damage and its remedial measure for earth dams with asphalt facing", *3. US-Japan workshop on earthquake engineering for dams, Japan*, pp.15-26 (2002).
6. Wang, W., "Cyclic tests on asphalt concrete", *Xi'an University Press China* (2004).
7. American road organization press, "Standard Industrial Classifications (SIC) Index", USA (2005).
8. Saxegard, H., "Asphalt core dams: Increased productivity to improve speed of construction", *Journal of Hydropower and dams*, 6, pp.72-74 (2002).
9. Hoeg, K., "Asphaltic concrete cores for embankment dams", *Norwegian Geotechnical Institute of Technology, Oslo, Norway* (1993).
10. Nakamura, Y.; Okumura, T.; Narita, K., and Ohne, Y., "Improvement of impervious asphalt mixture for high ductility against earthquake", *4th international conference on dam engineering, China*, pp.18-20 (2004).
11. ICOLD Press, "Bituminous cores for earth and rockfill dams", *Bulletin 42& 84* (1982 & 1992).
12. Kramer, S., "Geotechnical earthquake engineering", USA (1996).
13. Ishihara, K., "Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis", *Geomechanical modeling in engineering practice, Netherland* (1986).