

## Study of the impact of the shear rate on strength characteristics of the soil materials-asphalt concrete interface

Ashkan Gholipoor noroozi<sup>1</sup>, Rasoul Ajalloeian<sup>2</sup>, Meysam Bayat<sup>3</sup>

1- Phd student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

### ABSTRACT

Soil shear strength is affected by various factors such as grading, compaction percent of materials, vertical load level, shear rate and other factors. When placing soil and other material in the vicinity, the interaction problem is discussed. Such conditions are observed in embankment dams with asphalt concrete cores, in which determining the mechanical performance of the interfacing materials has great importance. In this research, a laboratory study has been conducted to characterize the interface behavior of soil materials of filter and asphalt concrete in the core, through the direct shear test, under different shear rates and determined the friction angle of the soil material and the interface of the soil material and asphaltic concrete. In order to compare these two angles, the parameter of the interaction ratio is defined as the interface frictional angle to the frictional angle of the soil materials ratio. In the first step, specimens containing soil materials from classes GC and GP at the same relative density were tested under different shear rates and the strength parameters, as well as the interaction ratio were determined. Then, according to the impact of the relative density of the materials on strength characteristics, specimens containing materials from GP class at both medium and high relative densities were tested at different shear rates and the desired parameters were determined. Based on the results, in GC interface materials, the interaction ratio has diminished at small shear rates and increased at elevated shear rates. The amount of increase and decrease of the interaction ratio was equal to 2.36 percent. In GP interface materials, the ratio of interaction has increased by 2.3% with a higher shear rate. Also, for constant shear rates, increasing the compaction percent of materials from GP class in the interface, from medium to high level, has resulted to reduced interaction ratio. Increasing the shear rate in materials with moderate and high relative density also followed, respectively, the increase and decrease of the interaction ratio. By determining the variation of interaction ratio against the shear rate for the soil material in the interface with asphaltic concrete, these results may be used to design of structures such as the embankment dam or pavement; because in many soil - structure interaction issues, the friction of the interface between the soil and structure should be estimated.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 24 June 2022

Revise Date: 24 August 2022

Accept Date: 12 September 2022

### Keywords:

embankment dam;  
asphalt concrete;  
interface element;  
direct shear apparatus;  
shear rate;  
relative density

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.347296.2853>

\*Corresponding author: Rasoul Ajalloeian  
Email address: [rasajl@sci.ui.ac.ir](mailto:rasajl@sci.ui.ac.ir)

## بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومتی فصل مشترک مصالح خاکی - بتن آسفالتی

اشکان قلی پورنوروزی<sup>۱</sup>، رسول اجل لوئیان<sup>۲\*</sup>، میثم بیات<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- استاد، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

### چکیده

مقاومت برشی خاک، تحت تأثیر عوامل مختلفی چون دانه بندی، درصد تراکم مصالح، سطح تنش نرمال، سرعت بارگذاری و عوامل دیگر است. در صورت قرارگیری خاک و مصالح دیگر در مجاورت هم، مسئله‌ی اندرکنش مطرح می‌گردد. چنین شرایطی در سدهای خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی مشاهده می‌شود که در آن، تعیین عملکرد مکانیکی مصالح فصل مشترک از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، یک بررسی آزمایشگاهی برای تعیین رفتار فصل مشترک مصالح خاکی فیلتر و بتن آسفالتی هسته تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، با استفاده از دستگاه برش مستقیم انجام شده و زاویه‌ی اصطکاک مصالح خاکی و فصل مشترک بین مصالح خاکی و بتن آسفالتی تعیین گردیده است. به منظور مقایسه‌ی این دو زاویه با یکدیگر، پارامتر نسبت اندرکنش به صورت نسبت زاویه‌ی اصطکاک فصل مشترک به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح خاکی تعریف شده است. در مرحله‌ی اول، نمونه‌های حاوی مصالح خاکی از طبقات GC و GP در تراکم نسبی یکسان، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و پارامترهای مقاومتی، همچنین نسبت اندرکنش مشخص شده‌اند. پس از آن، با توجه به تأثیر تراکم نسبی مصالح بر مشخصه‌های مقاومتی، نمونه‌های حاوی مصالح خاکی GP در دو تراکم نسبی متوسط و بالا، در سرعت‌های بارگذاری مختلف آزمایش شده و پارامترهای مورد نظر تعیین گردیده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت‌های بارگذاری پایین، کاهش نسبت اندرکنش و در سرعت‌های بالا، افزایش نسبت اندرکنش مشاهده شده است. میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش، معادل ۲/۳۶ درصد بوده است. در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، نسبت اندرکنش، افزایشی معادل ۲/۳ درصد داشته است. همچنین، در سرعت بارگذاری ثابت، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، از تراکم نسبی متوسط به تراکم نسبی بالا، منجر به کاهش نسبت اندرکنش شده است. از طرفی، افزایش سرعت بارگذاری در مصالح با تراکم نسبی متوسط و بالا، به ترتیب، افزایش و کاهش نسبت اندرکنش را به دنبال داشته است. با تعیین تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل سرعت بارگذاری برای مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، می‌توان از این نتایج، در طراحی سازه‌هایی چون سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی یا روسازی بهره برد؛ چرا که در بسیاری از مسائل اندرکنش خاک - سازه، بایستی اصطکاک فصل مشترک بین خاک و سازه برآورد گردد.

کلمات کلیدی: سد خاکی، بتن آسفالتی، فصل مشترک، دستگاه برش مستقیم، سرعت بارگذاری، تراکم نسبی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.347296.2853">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.347296.2853</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.347296.2853	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۰۶/۲۱	۱۴۰۱/۰۶/۲۱	۱۴۰۱/۰۶/۰۲	۱۴۰۱/۰۴/۰۳
			رسول اجل لوئیان rasajl@sci.ui.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در سدهای خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی، اندرکنش بین بتن آسفالتی و مصالح خاکی فیلتر، نقشی مهم و حیاتی در رابطه با عملکرد این نوع سدها ایفا می‌کند. در واقع، فصل مشترک بین هسته‌ی آسفالتی و نواحی انتقالی، نقش مهمی برای انتقال تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در طول ساخت سد و آبگیری مخزن دارد [۱]. به‌طور کلی، وقتی دو نوع مصالح متفاوت در مجاورت با یکدیگر قرار می‌گیرند، رفتار مصالح در سطح تماس بین آن‌ها، به دلیل تغییر ماهیت مکانیکی دچار تغییر می‌شود. حال، اگر یکی از این دو مصالح را مصالح انعطاف‌پذیری مانند خاک تشکیل دهد، به دلیل اثراتی همچون تغییرات تنش در خاک، رطوبت خاک، نوع دانه‌بندی، اندازه و شکل ظاهری دانه‌ها، مسئله‌ی اندرکنش پیچیدگی‌های خاص خود را پیدا می‌کند و رفتار در سطح مشترک این مصالح، نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. به‌عنوان مثال، وقتی از شمع‌ها در پی‌سازی استفاده می‌شود، به دلیل تفاوت در نوع مصالح شمع نسبت به خاک، بحث اندرکنش خاک-سازه مطرح می‌شود؛ یا وقتی از سپری‌ها در زیر سدهای خاکی و بنادر استفاده می‌شود، مسئله‌ی اندرکنش آب-خاک-سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲]. در صورتی که به جای مصالح انعطاف‌پذیری مانند خاک در تماس با بتن آسفالتی که صلبیت بیشتری نسبت به خاک دارد، از مصالح صلب در تماس با بتن آسفالتی استفاده شود، با توجه به تغییرات ناچیز نسبت اندرکنش در مقابل تغییرات پارامترهایی چون تنش، رطوبت و ... متغیرهای زیادی جهت بررسی مسئله‌ی اندرکنش مطرح نمی‌باشد.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مهندسی برای طراحی و عملکرد سازه‌هایی که داخل خاک، یا بر روی آن ساخته می‌شوند، مقاومت خاک است که معمولاً با عنوان "مقاومت برشی" شناخته می‌شود، زیرا خاک تمایل به گسیختگی در برش دارد [۳]. از سوی دیگر، درک اثرات سرعت بارگذاری بر رفتار مقاومتی خاک، برای تفسیر دقیق و استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، همچنین به دلیل نیاز به سرعت بخشیدن به روش‌های آزمون جهت کاهش هزینه‌ها، بسیار مهم و ضروری است [۴]. در مکانیک خاک و سنگ، بررسی‌های بسیاری بر روی این پارامتر خاص متمرکز شده‌اند.

شوالیه<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) [۵]، با بررسی مقاومت برشی خاک‌های درشت‌دانه‌ی شنی با انجام آزمایش برش مستقیم، در محدوده‌ی سرعت بارگذاری ۰/۰۱ تا ۰/۱۶ میلی‌متر بر ثانیه، به این نتیجه رسیده‌اند که سرعت بارگذاری در محدوده‌ی مورد آزمایش، تأثیری بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها ندارد. چای<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) [۶]، با ارزیابی اثر سرعت بارگذاری در محدوده‌ی ۰/۱-۲/۴ میلی‌متر بر دقیقه، بر مقاومت ماسه‌ی آهکی، با استفاده از دستگاه برش مستقیم در حالت خشک، نتیجه گرفته‌اند که با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۱ به ۲/۴ میلی‌متر بر دقیقه، مقاومت برشی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، در ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش یافته‌اند. سرعت بارگذاری بحرانی در این مطالعه، معادل ۱/۶ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شده است. حامد<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰) [۷]، با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاک آلی خالص در پنج سرعت بارگذاری، شامل ۰/۰۲، ۰/۰۶۵، ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و بر روی نمونه‌های خاک-فولاد، خاک-چوب و خاک-بتن، در سرعت ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک آلی را با افزایش سرعت بارگذاری نتیجه‌گیری نموده‌اند.

پرن<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰) [۸]، با بررسی اثر سرعت‌های بارگذاری در مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲، ۴ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه در آزمایش‌های برش مستقیم، بر تغییرات ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های ماسه، مشاهده نموده‌اند که با افزایش سرعت بارگذاری، به‌ویژه برای سرعت‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی حداکثر، افزایش یافته و مقادیر چسبندگی کاهش یافته‌اند. در مطالعه‌ی ژانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰) [۹]، عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی فصل مشترک شمع-خاک رس، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف (۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر بر دقیقه)، با انجام آزمایش برش مستقیم بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج، سرعت بارگذاری در این محدوده، تأثیر اندکی بر مشخصه‌های مکانیکی فصل مشترک شمع-خاک داشته است. غفاری<sup>۶</sup> و بینی (۲۰۲۱) [۱۰]، اثر

<sup>1</sup> Chevalier

<sup>2</sup> Chai

<sup>3</sup> Hamed

<sup>4</sup> Beren

<sup>5</sup> Zhang

<sup>6</sup> Ghaffari

سرعت‌های بارگذاری را در مقادیر ۰/۱، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه، بر رفتار برشی مخلوط‌های رس- ماسه، با استفاده از آزمایش سه‌محوری، تحت ۳ مقدار فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده‌اند که تأثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت نمونه‌ها در درصد‌های مختلف رس و ماسه، به مقدار فشار همه‌جانبه وابسته بوده است. راج بیهت<sup>۲</sup> (۲۰۲۲) [۱۱]، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش حلقه را برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت باقیمانده‌ی خاک‌های رس با پلاستیسیته‌ی کم، متوسط و بالا، در شرایط زهکشی شده انجام داده است. نتایج نشان داده‌اند که سرعت‌های بارگذاری پایین از ۰/۰۷۳ تا ۰/۱۶۲ میلی‌متر بر دقیقه، تأثیر چندانی بر مقاومت باقیمانده نداشته و در سرعت‌های بالاتر، از ۰/۲۳۳ تا ۰/۵۸۶ میلی‌متر بر دقیقه، اثر مثبت سرعت بارگذاری بر مقاومت باقیمانده اثبات شده است.

با بررسی تحقیقات پیشین، چنین نتیجه می‌شود که در اکثر این تحقیقات، با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی خاک‌های درشت‌دانه در محدوده‌های مختلف سرعت بارگذاری و با مقادیر کمتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی شده است. در تحقیقات اندکی که در محدوده‌ی سرعت‌های بارگذاری بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده‌اند، بر افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی حداکثر، همچنین، کاهش چسبندگی در سرعت‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه تأکید شده است. البته در برخی تحقیقات نیز اشاره گردیده که اعمال سرعت بارگذاری در مقادیر کمتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه، اثری بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها نداشته است. از سوی دیگر، با وجود انجام کارهای تحقیقاتی قابل توجه برای بررسی رفتار خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، همچنین، انجام تحقیقات راجع به تأثیر سرعت بارگذاری بر رفتار اندرکنش خاک و مصالحی به‌جز بتن آسفالتی، در ادبیات فنی، مطالعه‌ی خاصی در رابطه با اثرات سرعت بارگذاری بر نسبت اندرکنش و پارامترهای فصل مشترک بین بتن آسفالتی و مصالح خاکی در دسترس نیست. لذا، در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی تأثیر سرعت بارگذاری بر رفتار مکانیکی فصل مشترک بتن آسفالتی- مصالح خاکی، نمونه‌هایی شامل مصالح خاکی و نمونه‌هایی حاوی بتن آسفالتی و مصالح خاکی، در شرایط خشک و در ۴ سرعت بارگذاری مختلف، در دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، به روش UU و در شرایط کنترل کرنش، تحت سرعت‌های بارگذاری در محدوده‌ی ۳-۵ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شده‌اند. لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها، از دو نوع مصالح خاکی درشت‌دانه استفاده شده و نتایج حاصل با هم مقایسه شده است. همچنین، با در نظر گرفتن این موضوع که در تحقیقات قبلی، تأثیر تراکم نسبی مصالح بر رفتار نمونه‌ها در سرعت‌های بارگذاری مختلف چندان مورد توجه قرار نگرفته است، در این تحقیق، نمونه‌هایی متشکل از مصالح خاکی در دو حالت تراکم نسبی متوسط و متراکم و بتن آسفالتی ساخته شده و تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا بدین‌وسیله، تأثیر سرعت بارگذاری بر نمونه‌های با تراکم مختلف نیز مشخص گردد. در مجموع، با توجه به تنوع مصالح مورد استفاده و محدوده‌های مختلف سرعت بارگذاری مورد آزمایش در هر تحقیق، نمی‌توان به نتایج مطالعات قبلی استناد نمود.

## ۲- مصالح و روش‌ها

هدف اصلی این تحقیق، تعیین رفتار مکانیکی فصل مشترک مصالح خاکی- هسته‌ی بتن آسفالتی، با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس بوده است. به‌منظور دستیابی به این هدف، آزمایشات اولیه بر روی مصالح مورد استفاده در هسته‌ی بتن آسفالتی و فیلتر سد خاکی، همچنین، آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ‌مقیاس بر روی مصالح خاکی و فصل مشترک مصالح خاکی و بتن آسفالتی صورت گرفته است که نتایج این آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها در ادامه ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها، در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی استان تهران انجام شده و مصالح خاکی مورد استفاده، از شرکت آکام شن در تهران تهیه شده‌اند.

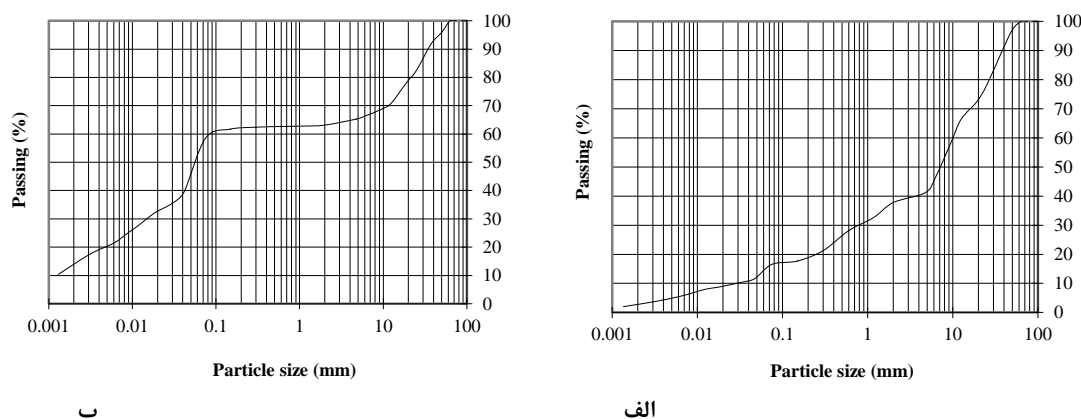
### ۲-۱- مصالح خاکی

مصالح خاکی مورد استفاده در این تحقیق، شامل ۲ نمونه‌ی شن تیزگوشه بوده‌اند که جهت تعیین مشخصات اولیه، تحت آزمایش‌های دانه‌بندی با الک (ASTM-D422) [۱۲]، آزمایش دانه‌بندی به روش هیدرومتری (ASTM-D422)، آزمایش تعیین حدود

<sup>1</sup> Binay

<sup>2</sup> Raj Bhat

آتربرگ (ASTM-D4318) [۱۳]، آزمایش تعیین وزن مخصوص حداکثر ( $\gamma_{d max}$ ) (ASTM-D1557) [۱۴] و آزمایش تعیین وزن مخصوص حداقل ( $\gamma_{d min}$ ) (ASTM-D4254) [۱۵] قرار گرفته‌اند. منحنی دانه‌بندی مصالح خاکی مورد استفاده، در شکل ۱ و نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مصالح خاکی مورد استفاده: الف) نمونه ۱ و ب) نمونه ۲.

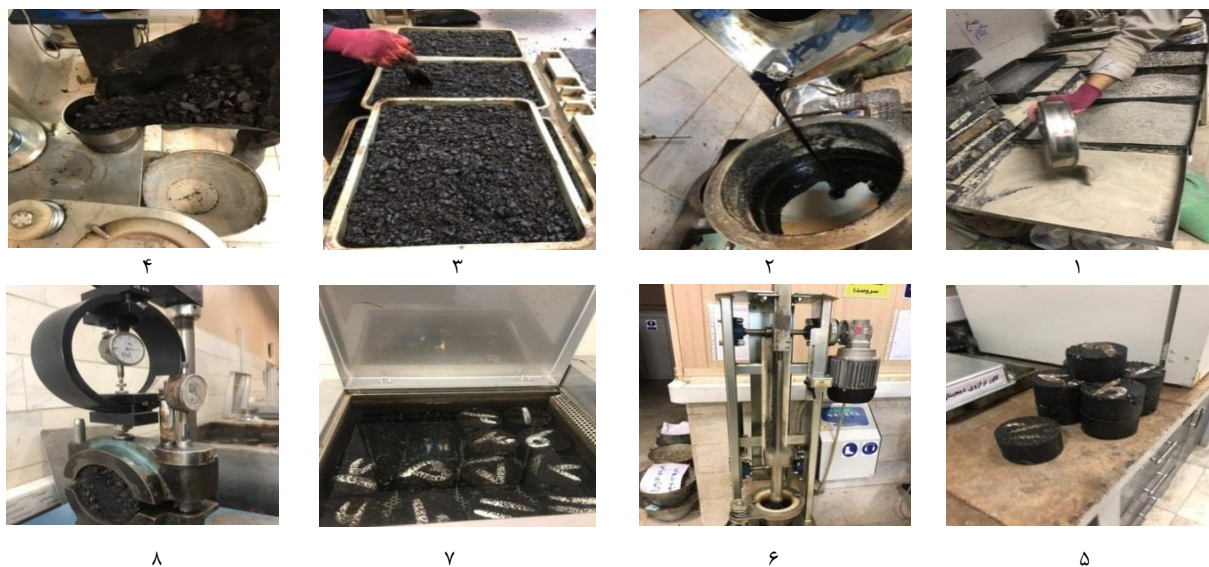
جدول ۱: نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح خاکی.

$\gamma_{d max}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{d min}$ ( $kN/m^3$ )	طبقه‌بندی بر اساس سیستم متحد	PI (%)	PL (%)	LL (%)	مصالح شنی
۲۱/۲۴	۱۶/۸۰	GP	۸	۱۰	۱۸	نمونه ۱
۱۹/۶۰	۱۴/۴۸	GC	۱۲	۱۸	۳۰	نمونه ۲

## ۲-۲- بتن آسفالتی

در این تحقیق، برای طرح اختلاط بتن آسفالتی، از روش اصلاح‌شده‌ی مارشال، مطابق استاندارد ASTM-D5581 [۱۶] استفاده شده است. مراحل انجام این آزمایش، در شکل ۲ نشان داده شده است. توزیع اندازه‌ی ذرات مصالح سنگی مورد استفاده، مطابق منحنی دانه‌بندی فولر (در محدوده‌ی ۰-۱۹ میلی‌متر) و محدوده‌ی دانه‌بندی پیشنهادی کمیته‌ی بین‌المللی سدهای بزرگ<sup>۱</sup> بوده است. قیر مصرفی، قیر ۶۰/۷۰ بوده است که از پالایشگاه تهران تهیه شده و در مقادیر ۳/۵، ۴/۰ و ۴/۵ درصد وزن کل بتن آسفالتی استفاده شده است. پس از انتخاب محدوده‌ی دانه‌بندی مناسب و تعیین طرح اختلاط مخلوط آسفالتی و درصد قیر مورد استفاده در مخلوط‌ها و همچنین، محاسبه‌ی وزن مصالح سنگی عبوری از هر الک برای تهیه‌ی نمونه‌های مارشال، با در نظر گرفتن این نکته که برای ساخت هر نمونه‌ی مارشال، حدود ۱۲۰۰ گرم مخلوط آسفالتی لازم است، نمونه‌ی مارشال تهیه شده و با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف آن، به واسطه‌ی چکش مارشال متراکم می‌شود. در مرحله‌ی بعد، برای تعیین پایداری مارشال در برابر تغییرشکل، نمونه‌های متراکم‌شده به مدت ۴۰-۳۰ دقیقه درون حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه‌ی سانتیگراد و پس‌از آن، در دستگاه مارشال تحت بار قرار گرفته و روانی و پایداری آن‌ها قرائت و ثبت می‌شود. استقامت (پایداری) مارشال، حداکثر باری است که نمونه بدون گسیختگی قادر به تحمل آن بوده و روانی، میزان تغییرشکل نمونه هنگام گسیختگی است. قالب ساخت نمونه‌های مارشال در روش اصلاح‌شده، دارای قطر ۶ اینچ و ارتفاع ۳/۷۵ اینچ و وزنه‌ی تراکم دارای وزن ۱۰/۲ کیلوگرم بوده است. دمای اختلاط و دمای تراکم برای مخلوط‌های آسفالتی نیز، به ترتیب، ۱۴۵ و ۱۳۵ درجه‌ی سانتیگراد بوده است.

<sup>1</sup> ICOLD



شکل ۲: مراحل مختلف آزمایش مارشال: ۱. مصالح سنگی؛ ۲. قیر؛ ۳. اختلاط مصالح؛ ۴. قالب‌گیری؛ ۵. ساخت نمونه؛ ۶. متراکم کننده‌ی (چکش) مارشال؛ ۷. حمام آب گرم و ۸. جک مارشال.

با توجه به نتایج و نمودارهای حاصل از آزمایش مارشال، مقدار قیر بهینه جهت تهیه‌ی نمونه‌های بتن آسفالتی، معادل ۴ درصد انتخاب شده است. تصاویر ساخت نمونه‌های بتن آسفالتی پس از تعیین مقدار قیر بهینه، در شکل ۳ نشان داده شده است.



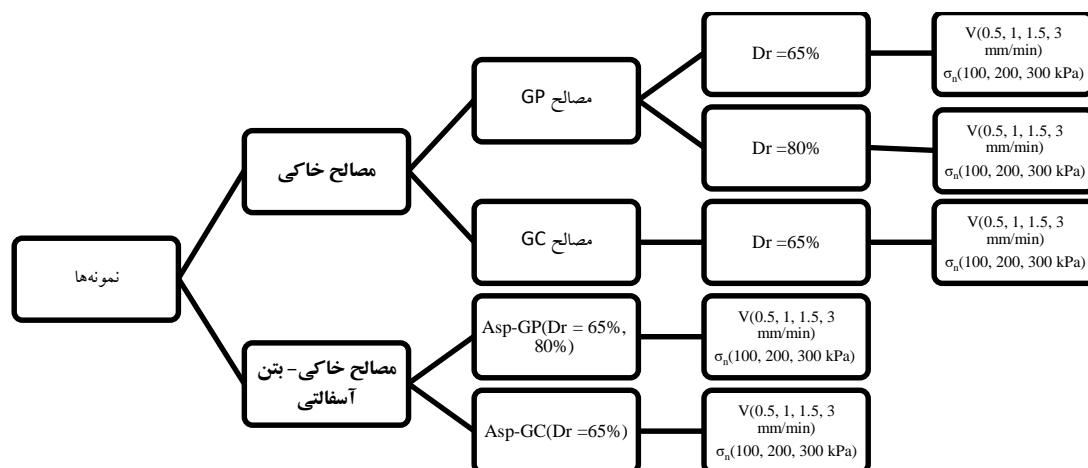
شکل ۳: مصالح و ساخت نمونه‌های بتن آسفالتی.

## ۲-۳- دستگاه و روش مورد استفاده

به منظور بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر اندرکنش بین بتن آسفالتی و مصالح خاکی، از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس (۱۵۰×۳۰×۳۰ میلی‌متر) استفاده شده است. تمامی آزمایش‌ها، تا کرنش محوری ۱۵ درصد ادامه یافته‌اند. ساخت نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش مستقیم، با استفاده از مقادیر وزن مخصوص حداقل و حداکثر حاصل و مقادیر تراکم نسبی موردنظر و با در نظر گرفتن ابعاد جعبه‌ی برش مستقیم صورت گرفته است. با توجه به ابعاد جعبه‌ی برش، وزن لازم برای حصول تراکم نسبی موردنظر محاسبه شده، نمونه‌ها در ۳ لایه ساخته شده و هر لایه، تا یک‌سوم ارتفاع جعبه‌ی برش متراکم گردیده است. کوپش لایه‌ها، به آرامی و با استفاده از چکش انجام شده است. فرمول مورد استفاده برای محاسبه‌ی وزن مخصوص خشک مصالح خاکی جهت ساخت نمونه، به صورت زیر بوده است:

$$D_r = \left[ \frac{(\gamma_d - \gamma_{d \min})}{(\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min})} \right] \left[ \gamma_{d \max} / \gamma_d \right] \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق،  $\gamma_d$ : وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتیمتر مکعب)؛  $\gamma_{d \min}$ : وزن مخصوص خشک حداقل (گرم بر سانتیمتر مکعب)؛ و  $\gamma_{d \max}$ : وزن مخصوص خشک حداکثر (گرم بر سانتیمتر مکعب). برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، به صورت شماتیک، در شکل ۴ نشان داده شده است.



توجه: در فلوجارت فوق، GP، ASP، GC، Dr، V و  $\sigma_n$  به ترتیب، به بتن آسفالتی، مصالح خاکی از طبقه GP، مصالح خاکی از طبقه GC، تراکم نسبی، سرعت بارگذاری و تنش نرمال اشاره دارند.

شکل ۴: فلوجارت آزمایش‌ها.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱ بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت قفل و بستنی

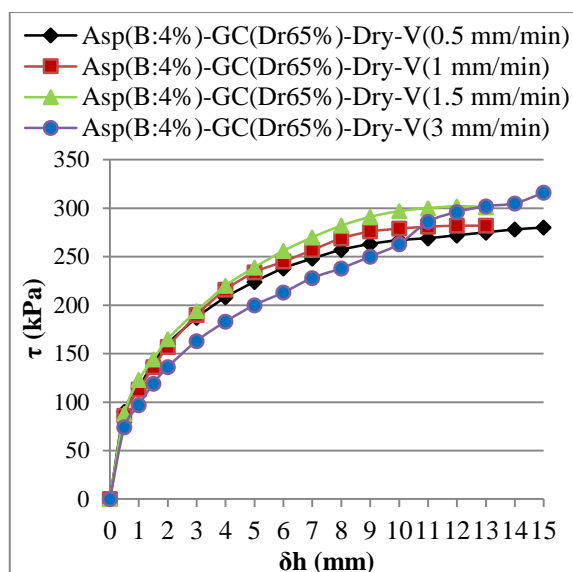
به منظور بررسی تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومتی فصل مشترک مصالح خاکی-بتن آسفالتی، ۱۶ نمونه آماده شده است. در این نمونه‌ها، متغیر مورد بررسی، سرعت بارگذاری بوده و تراکم نسبی مصالح، به صورت ثابت و معادل ۶۵ درصد در نظر گرفته شده است. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق، در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول، منظور از GP و GC، مصالح خاکی مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها؛ Dr، میزان تراکم نسبی مصالح؛ Dry، شرایط خشک؛ V، سرعت بارگذاری؛ Asp، بتن آسفالتی و B، درصد قیر است. در نمونه‌های حاوی مصالح خاکی و بتن آسفالتی، سطح برش، به عنوان فصل مشترک بتن آسفالتی- مصالح خاکی در نظر گرفته شده است. برای هر سرعت بارگذاری، آزمایش‌ها تحت سه مقدار تنش نرمال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام شده و تنش برشی و تغییرمکان‌های افقی و قائم اندازه‌گیری شده و زاویه‌ی اتساع، سختی برشی و نسبت اندرکنش محاسبه شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های ساخته شده جهت بررسی تأثیر سرعت بارگذاری.

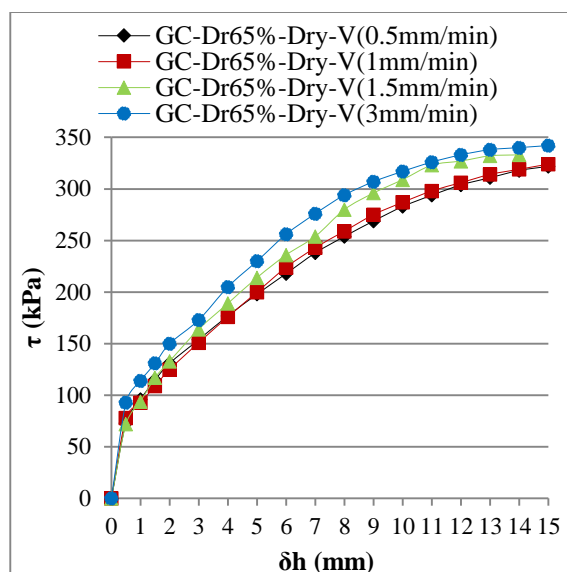
تعداد نمونه	نام نمونه
۴	GC-Dr65%-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	Asp(B:4%)-GC(Dr65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	GP-Dr65%-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	Asp(B:4%)-GP(Dr65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)

منحنی‌های تغییرات تنش برشی- تغییرمکان افقی حاصل از آزمایش برش مستقیم، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، برای نمونه‌های حاوی مصالح GC و GP، به ترتیب، در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



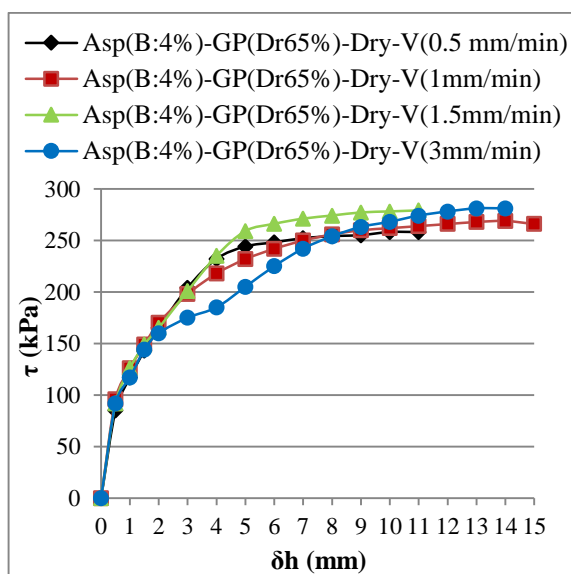


ب

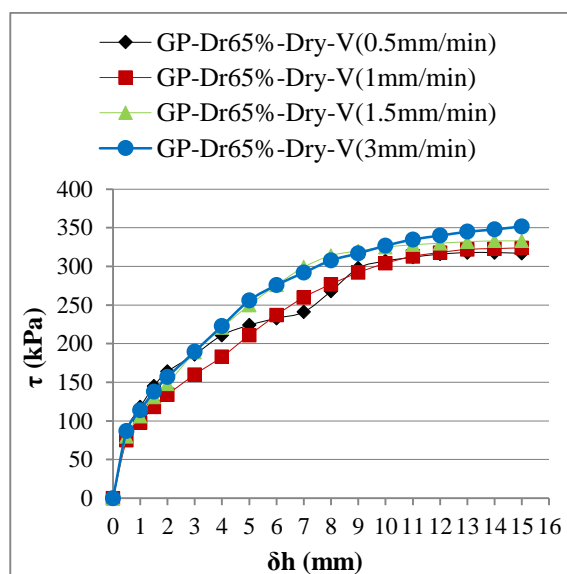


الف

شکل ۵: تغییرات تنش برشی - تغییر مکان افقی برای الف) مصالح خاکی GC و ب) مصالح خاکی GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک، سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ب



الف

شکل ۶: تغییرات تنش برشی - تغییر مکان افقی برای الف) مصالح خاکی GP و ب) مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک، سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

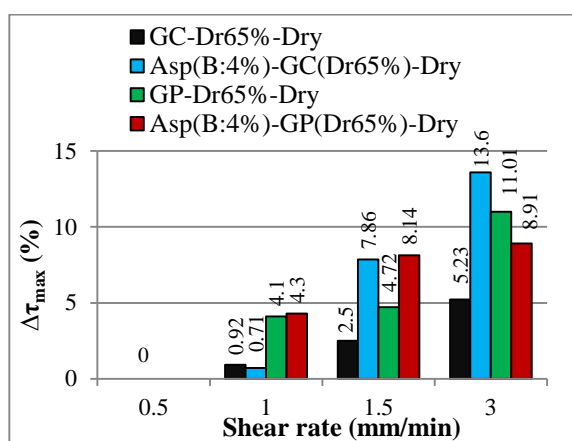
با بررسی نمودارهای تغییرات تنش برشی - تغییر مکان افقی برای نمونه‌ها، این موارد قابل مشاهده است: تحت سرعت بارگذاری ثابت، در هر دو دسته‌ی مصالح خاکی GC و GP و این مصالح در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش تغییر مکان افقی، تنش برشی افزایش یافته و به‌طور کلی، مقادیر تنش برشی تحت یک سرعت بارگذاری خاص، در مصالح خاکی GP و GC، بیشتر از مقادیر متناظر آن‌ها در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی بوده‌اند. افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش تنش برشی در هر دو دسته‌ی مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی شده است. افزایش تنش برشی و سخت‌شوندگی مصالح در نتیجه‌ی افزایش سرعت



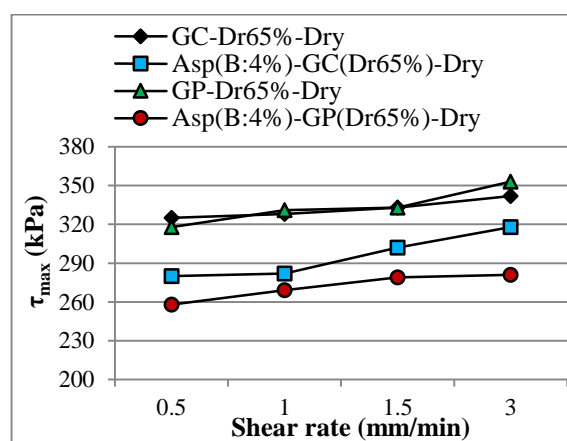
بارگذاری، در تغییر مکان های افقی بالاتر مشهودتر است. افزایش تنش برشی با افزایش سرعت بارگذاری، قبلاً توسط المهادیب (۲۰۰۵) و افزای و همکاران (۱۳۹۷) نیز گزارش شده است.

### ۳-۱-۱- تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای مقاومت برشی

پس از ترسیم منحنی های پوش گسیختگی نمونه ها، مقادیر پارامترهای مقاومت برشی (تنش برشی حداکثر، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) به دست آمده و روند و میزان تغییرات این پارامترها در سرعت های بارگذاری مختلف، نسبت به مقادیر آنها در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه، در شکل های ۷ تا ۹ نشان داده شده است.

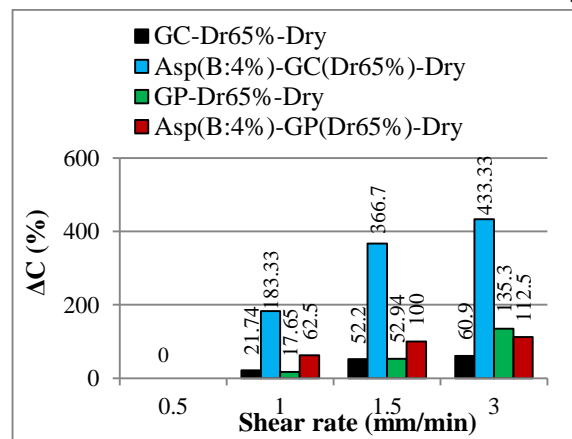


ب

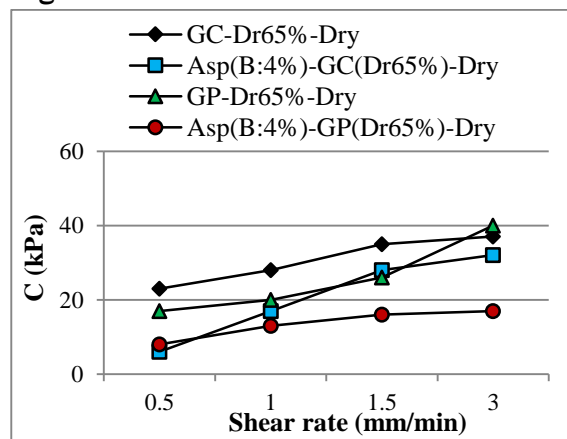


الف

شکل ۷: الف) روند و ب) میزان تغییرات تنش برشی حداکثر در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک.

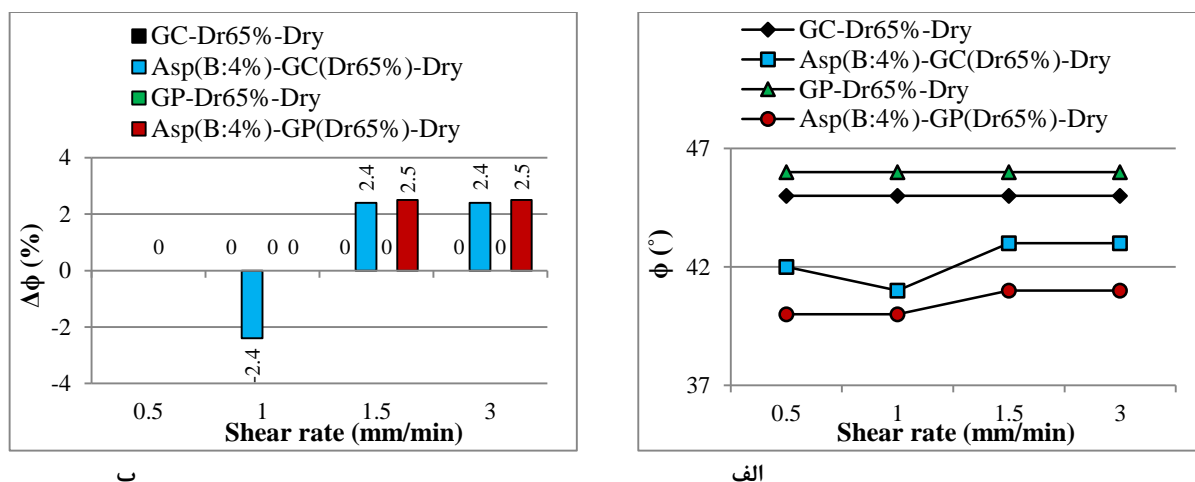


ب



الف

شکل ۸: الف) روند و ب) میزان تغییرات چسبندگی در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک.



شکل ۹: (الف) روند و (ب) میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک.

روند و میزان تغییرات تنش برشی حداکثر به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف در شکل ۷، حاکی از افزایش تنش برشی حداکثر یا مقاومت برشی نمونه‌ها در برابر گسیختگی، با افزایش سرعت بارگذاری در تمام نمونه‌های مورد آزمایش، شامل مصالح خاکی و مصالح خاکی- بتن آسفالتی بوده است. این افزایش را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در سرعت‌های برش پایین، نمونه فرصت و زمان کافی برای تغییر شکل داشته و اثر آن بر مقاومت محدودتر است. در سرعت‌های برش بالا، ذرات مصالح برای مدت زمان طولانی‌تری در تماس با یکدیگر بوده و خاک زمان کافی برای تغییر شکل ندارد و تغییر شکل آن به تأخیر می‌افتد. به بیان دیگر، در سرعت‌های برش بالا، زمان کمتری برای وقوع گسیختگی و بازآرایش ذرات مصالح وجود دارد. لذا برای تشکیل سطح برش، تمام این تماس‌های بین‌ذره‌ای بایستی تسلیم شوند که این موضوع، منجر به افزایش مقاومت برشی مصالح می‌شود. به‌طور کلی، در آزمایش‌های برش، نیروهای برشی اعمال شده، به‌واسطه‌ی رینگ‌های بار اندازه‌گیری می‌شوند. از آنجایی‌که این رینگ‌ها انعطاف‌پذیر بوده و هم‌زمان با اعمال نیروی برشی، انرژی کرنشی ذخیره می‌شود، پس از رسیدن مقاومت برشی نمونه به مقدار حدی خود، این انرژی کرنشی آزاد می‌شود. مقدار انرژی کرنشی آزاد شده، تابعی از سرعت بارگذاری است که مقاومت برشی اندازه‌گیری شده را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در هر دو دسته‌ی نمونه‌های حاوی مصالح GP و GC، مقادیر تنش برشی حداکثر در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به دلیل کاهش قفل و بست و تماس بین‌ذره‌ای مصالح، ناشی از وجود بتن آسفالتی و ماهیت انعطاف‌پذیر آن، کمتر از این مقادیر در مصالح خاکی به‌دست آمده است.

از سوی دیگر، با مشاهده‌ی روند تغییرات چسبندگی و میزان تغییرات آن در مقابل سرعت بارگذاری در شکل ۸، نسبت به مقادیر آن در سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، می‌توان دریافت که در تمام نمونه‌ها، اعم از مصالح خاکی و مصالح خاکی- بتن آسفالتی، صرف‌نظر از نوع مصالح خاکی (GC یا GP)، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش مقادیر چسبندگی شده است. همچنین، با افزایش سرعت بارگذاری، میزان افزایش چسبندگی نسبت به مقدار آن در سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر شده است. در سرعت بارگذاری پایین (۱ میلی‌متر بر دقیقه)، میزان افزایش چسبندگی در مصالح GC، بیش از میزان افزایش آن در مصالح GP بوده، اما با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ و ۳ میلی‌متر بر دقیقه، این روند برعکس شده است.

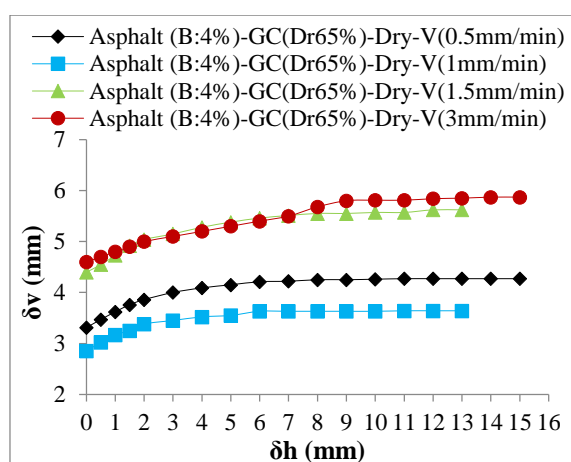
همچنین، روند و میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقابل سرعت بارگذاری در شکل ۹ نشان می‌دهد که در مصالح GC، افزایش سرعت بارگذاری، تأثیری بر مقدار زاویه اصطکاک داخلی نداشته و مقدار آن ثابت مانده است. در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، زاویه اصطکاک داخلی، در سرعت بارگذاری تا ۱ میلی‌متر بر دقیقه، روندی کاهشی و با افزایش سرعت بارگذاری، روندی افزایشی داشته است. همچنین، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار زاویه اصطکاک داخلی در مصالح GP ثابت مانده و در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی نیز، افزایش اندکی در مقدار زاویه اصطکاک داخلی رخ داده است. برن و همکاران (۲۰۲۰) [۸] نیز، در نتایج مطالعه‌ی خود، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش چسبندگی ماسه را با افزایش سرعت بارگذاری گزارش نموده‌اند. به‌طور کلی،

می‌توان گفت که در هر دو دسته‌ی مصالح خاکی و مصالح خاکی- بتن آسفالتی، تأثیر سرعت بارگذاری بر چسبندگی، بیش از تأثیر آن بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی بوده است.

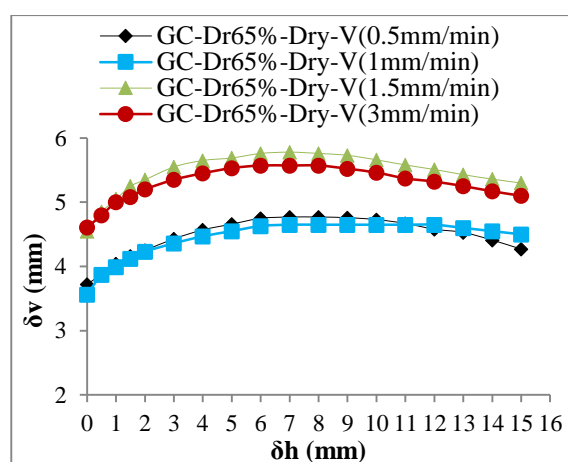
### ۳-۱-۲ تأثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای قفل و بستنی

#### ۳-۱-۲-۱ بررسی تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی

نمودارهای تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی برای نمونه‌های حاوی مصالح GC و GP، در سرعت‌های بارگذاری مختلف، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

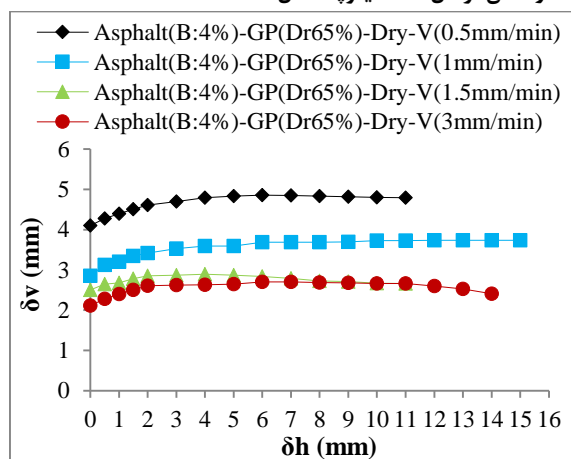


ب

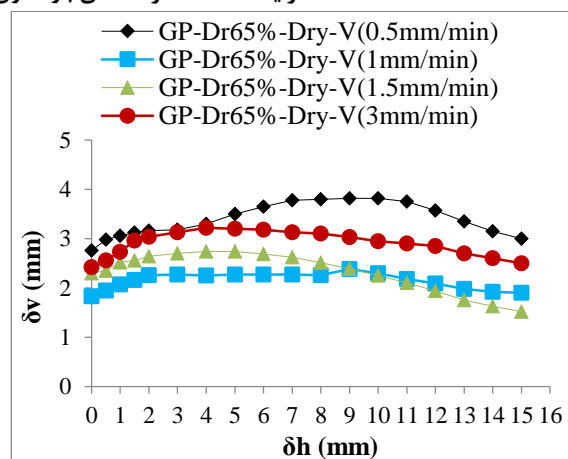


الف

شکل ۱۰: تغییرات تغییرمکان قائم- تغییرمکان افقی برای الف) مصالح خاکی GC و ب) مصالح خاکی GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک، سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ب



الف

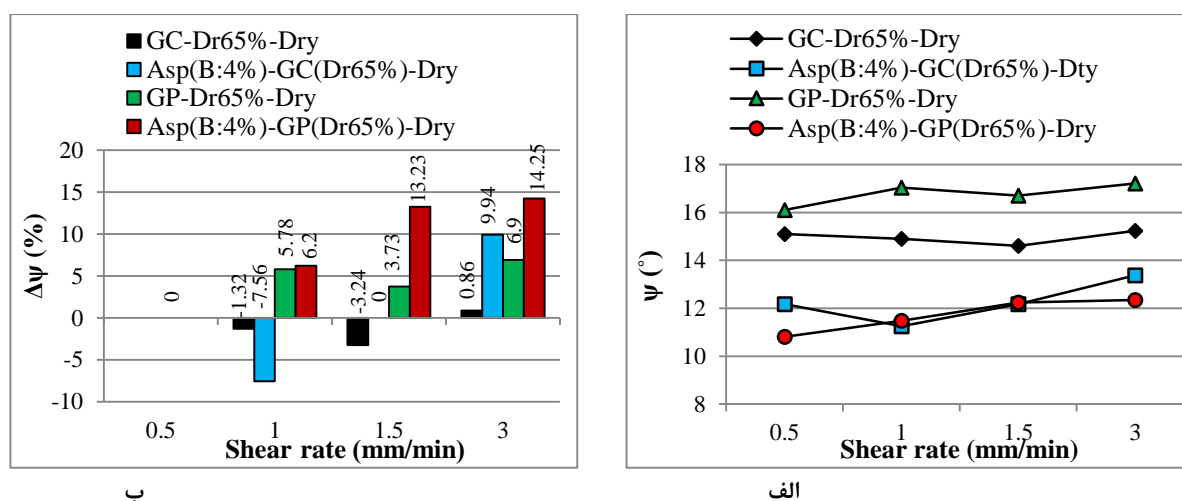
شکل ۱۱: تغییرات تغییرمکان قائم- تغییرمکان افقی برای الف) مصالح خاکی GP و ب) مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک، سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

بررسی نمودارهای تغییرات تغییرمکان قائم در برابر تغییرمکان افقی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نشانگر آن است که در مصالح GC، تا تغییرمکان افقی ۱۱ میلی‌متر، با افزایش تغییرمکان افقی، منجر به حصول روندی تقریباً نزولی در تغییرمکان قائم شده و در تغییرمکان‌های افقی بالاتر از ۱۱ میلی‌متر، این روند معکوس شده است. در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش

سرعت بارگذاری، افزایش تغییرمکان قائم را به دنبال داشته است. همچنین، در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش تغییرمکان افقی، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به کاهش تغییرمکان قائم شده است. در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، کاهش تغییرمکان قائم، با شیب نسبتاً ملایم و یکسانی رخ داده، ولی در مصالح GP، در تغییرمکان افقی ۸ میلی‌متر و بالاتر، کاهش تغییرمکان قائم با شیب بیشتری ادامه یافته است.

### ۳-۱-۲-۲- بررسی تغییرات زاویه اتساع

خط مماس بر نمودار تغییرمکان قائم نسبت به تغییرمکان افقی نمونه، در قسمت صعودی آن و بخصوص در بخشی که خاک بیشترین نرخ افزایش تغییرمکان قائم را نسبت به تغییرمکان افقی دارد، بیانگر زاویه اتساع خاک است. روند و میزان تغییرات زاویه اتساع در مقابل سرعت بارگذاری، برای نمونه‌های حاوی مصالح GC و GP، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



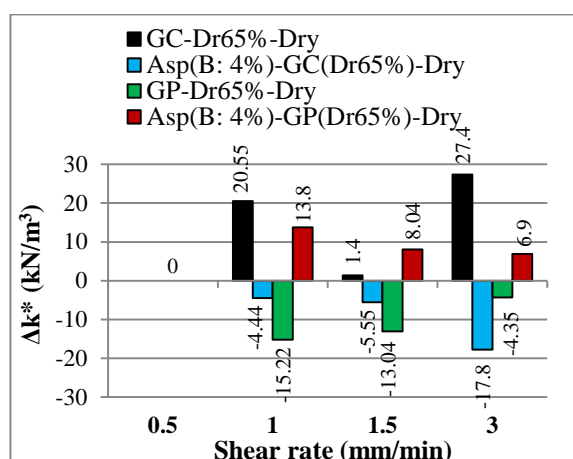
شکل ۱۲: الف) روند و ب) میزان تغییرات زاویه اتساع - سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

مشاهده‌ی روند و میزان تغییرات زاویه اتساع به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف در شکل ۱۲، حاکی از آن است که در مصالح GC، با افزایش سرعت از ۰/۵ به ۱ و سپس به ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش زاویه اتساع و با افزایش سرعت بارگذاری به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش زاویه اتساع نسبت به مقدار آن در سرعت اولیه رخ داده است. در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در ابتدا با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر بر دقیقه، اندکی کاهش و پس‌از آن، با افزایش سرعت بارگذاری به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش زاویه اتساع نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شده است.

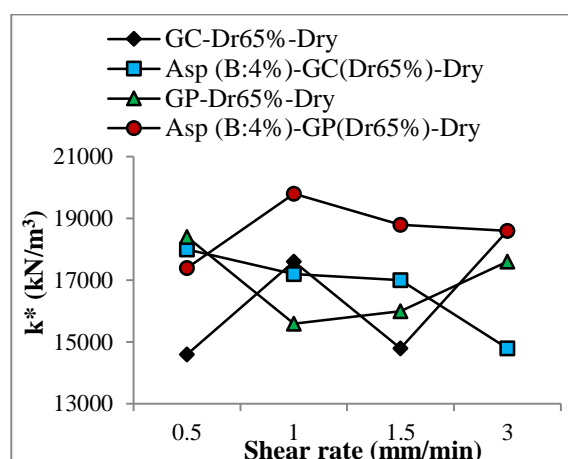
همچنین، افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش زاویه اتساع را در هر دو دسته‌ی مصالح GP و مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی را نسبت به مقدار آن در سرعت اولیه به دنبال داشته است.

### ۳-۱-۲-۳- بررسی تغییرات سختی برشی

سختی برشی، شیب خط مماس در نمودار تنش برشی بر حسب تغییرمکان افقی در مبدأ مختصات یا نقطه‌ی تغییرمکان افقی صفر است. روند و میزان تغییرات مقادیر سختی برشی به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



ب



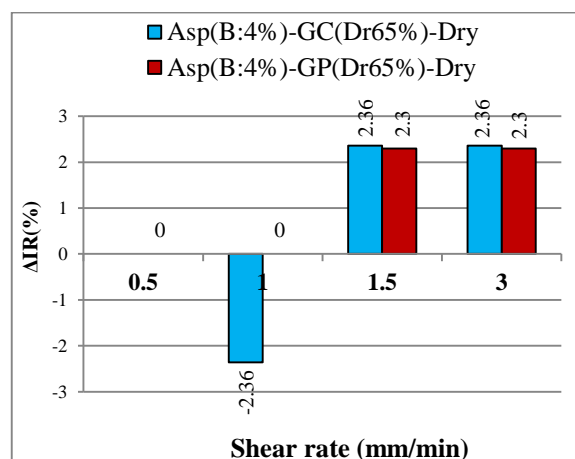
الف

شکل ۱۳: الف) روند و ب) میزان تغییرات سختی برشی - سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

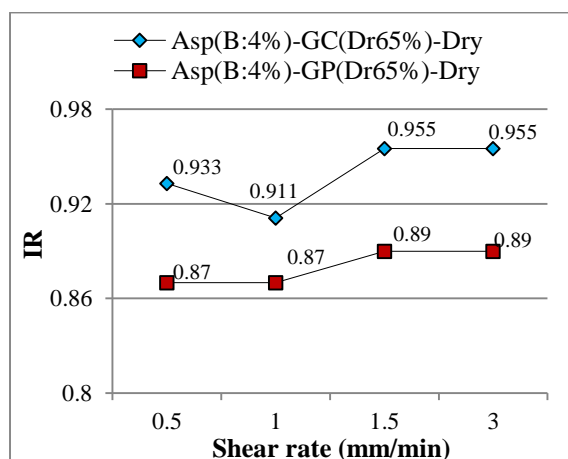
با بررسی مقادیر سختی برشی در نمونه‌های حاوی مصالح GC در سرعت‌های بارگذاری مختلف در شکل ۱۳، چنین نتیجه می‌شود که با افزایش سرعت بارگذاری، در مصالح GC، افزایش سختی برشی و در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، روندی تقریباً نزولی در سختی برشی، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شده است. در مورد نمونه‌های حاوی مصالح GP، این روند معکوس شده و افزایش سرعت بارگذاری، منجر به کاهش سختی برشی در مصالح GP و افزایش سختی برشی در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی شده است.

### ۳-۱-۲-۴ بررسی تغییرات نسبت اندرکنش

نسبت زاویه‌ی اصطکاک داخلی فصل مشترک به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح شنی ( $\delta/\phi$ )، نسبت اندرکنش نامیده می‌شود. تغییرات نسبت اندرکنش به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۱۴: الف) روند و ب) میزان تغییرات نسبت اندرکنش بر حسب سرعت بارگذاری برای مصالح GC و GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت شرایط خشک.

با مقایسه‌ی مقادیر نسبت اندرکنش تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف در شکل ۱۴، می‌توان دریافت که در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر بر دقیقه، نسبت اندرکنش کاهش یافته و با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ و سپس ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش یافته و به مقداری ثابت رسیده است. میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، معادل ۲/۳۶ درصد بوده است. در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر بر دقیقه، نسبت اندرکنش در مقدار ۰/۸۷ ثابت مانده و با افزایش سرعت بارگذاری به ۱/۵ و ۳ میلی‌متر بر دقیقه، نسبت اندرکنش، افزایشی معادل ۲/۳ درصد داشته و به مقدار ۰/۸۹ رسیده است.

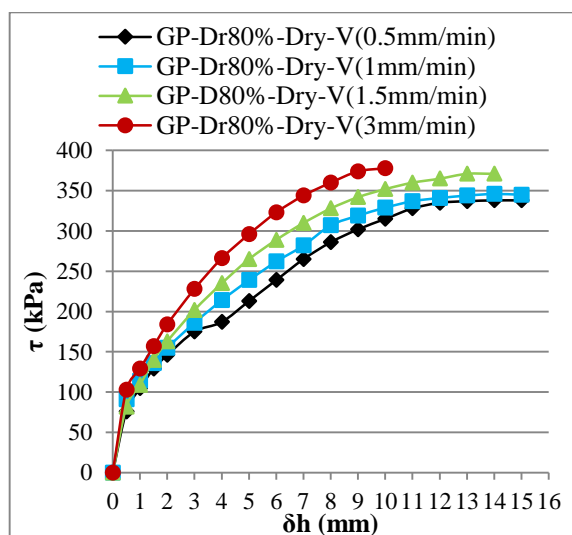
### ۳-۲- بررسی تأثیر تراکم نسبی مصالح بر رفتار نمونه‌ها در سرعت‌های بارگذاری مختلف

به‌منظور بررسی تأثیر تراکم نسبی مصالح خاکی در سرعت‌های بارگذاری مختلف، ۱۶ نمونه، مطابق جدول ۳، حاوی مصالح GP، با دو تراکم نسبی مختلف (تراکم نسبی متوسط و بالا) و بتن آسفالتی آماده شده و در دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس در سرعت‌های بارگذاری مختلف، تحت تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این آزمایشات نیز، سطح برش به‌عنوان فصل مشترک مصالح خاکی و بتن آسفالتی در نظر گرفته شده است.

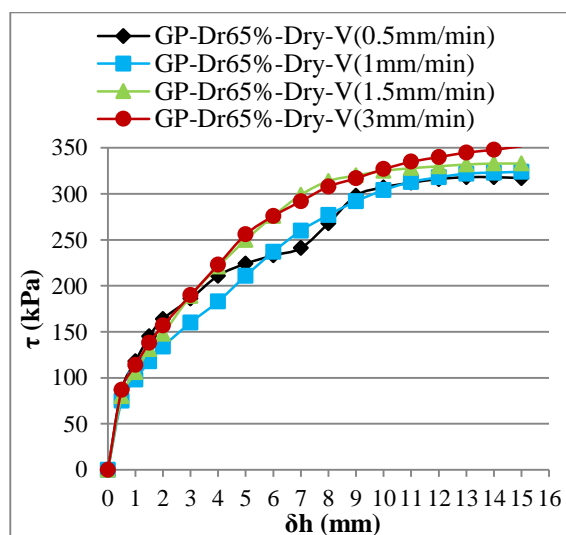
جدول ۳: مشخصات نمونه‌های ساخته شده جهت بررسی تأثیر تراکم نسبی مصالح خاکی در سرعت‌های بارگذاری مختلف.

تعداد نمونه	نام نمونه
۴	GP-Dr65%-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	Asp(B:4%)-GP(Dr65%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	GP-Dr80%-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)
۴	Asp(B:4%)-GP(Dr80%)-Dry-V(0.5, 1, 1.5, 3mm/min)

نمایش تصویری تغییرات تنش برشی - تغییرمکان افقی حاصل از آزمایش برش مستقیم برای مصالح خاکی GP و مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

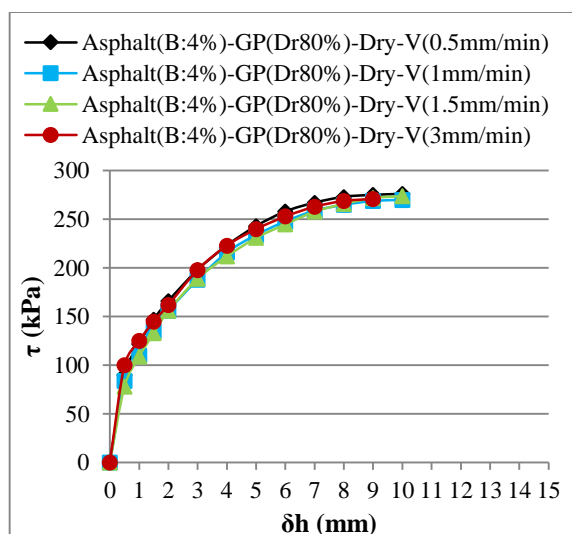


ب

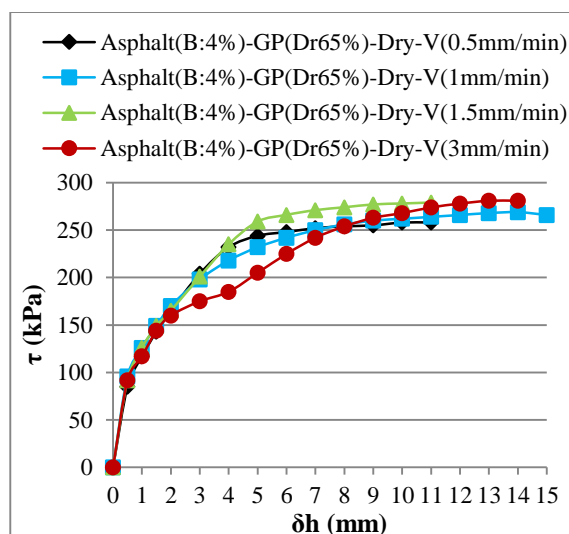


الف

شکل ۱۵: تغییرات تنش برشی - تغییرمکان افقی برای الف) مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد و ب) مصالح GP با تراکم نسبی ۸۰ درصد، در شرایط خشک، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ب



الف

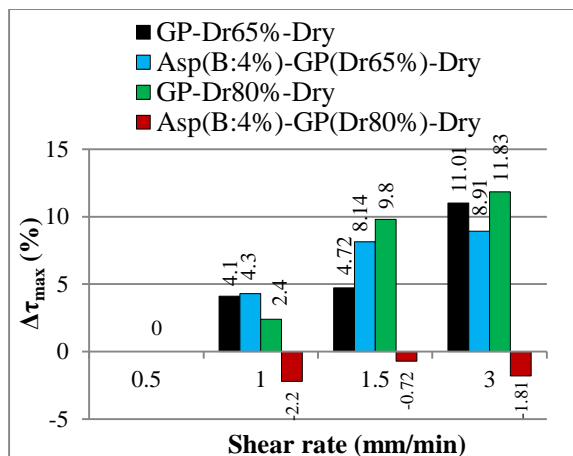
شکل ۱۶: تغییرات تنش برشی - تغییرمکان افقی برای الف) مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی و ب) مصالح GP با تراکم نسبی ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در شرایط خشک، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

بررسی نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که در سرعت بارگذاری ثابت، در مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش تراکم نسبی، منجر به افزایش تنش برشی شده است. به‌طور کلی، مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در مقایسه با مصالح خاکی، در تغییرمکان‌های افقی کوچک‌تری به گسیختگی رسیده‌اند. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد، با افزایش سرعت بارگذاری، در تغییرمکان‌های افقی کوچک (تا ۲ میلی‌متر)، کاهش تنش برشی و در تغییرمکان‌های بالاتر از ۲ میلی‌متر، افزایش تنش برشی مشاهده شده است. در مصالح با تراکم نسبی ۸۰ درصد، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش تنش برشی را به دنبال داشته است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش تنش برشی و در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، کاهش تنش برشی رخ داده است.

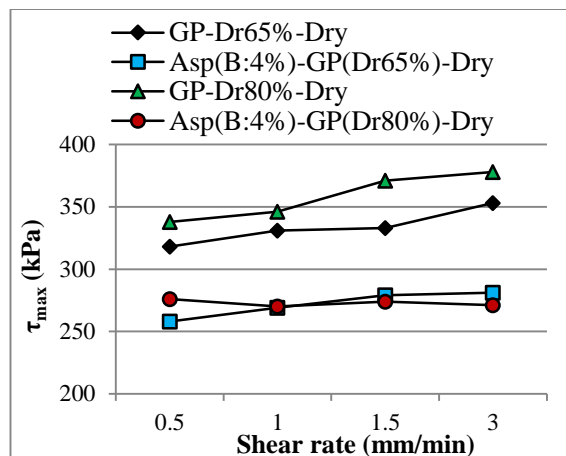
### ۳-۲-۱- تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای مقاومت برشی، در سرعت‌های بارگذاری مختلف

روند و میزان تغییرات پارامترهای مقاومت برشی حاصل از منحنی‌های پوش گسیختگی، برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده است.





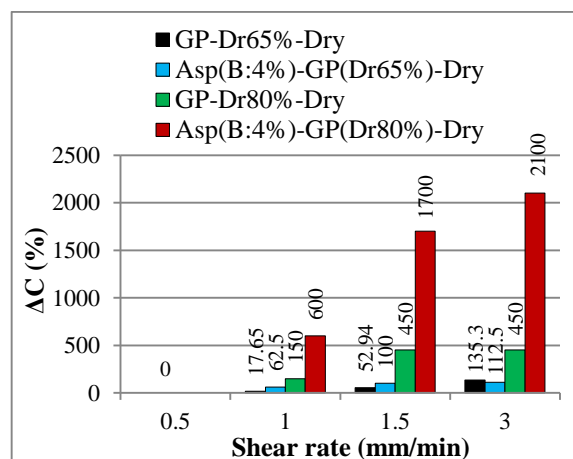
ب



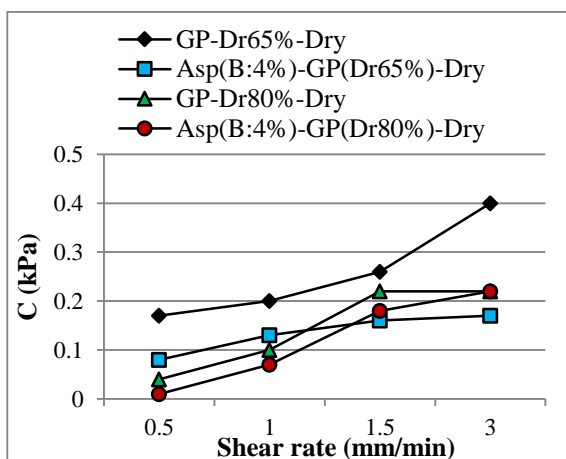
الف

شکل ۱۷: الف) روند و ب) میزان تغییرات تنش برشی حداکثر در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی GP و مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

نمودارهای تغییرات تنش برشی حداکثر برای مصالح خاکی با تراکم نسبی مختلف در شکل ۱۷، بیانگر آن هستند که در سرعت بارگذاری ثابت، با افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی از ۶۵ به ۸۰ درصد، تنش برشی حداکثر افزایش یافته است. در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی نیز، در سرعت بارگذاری ثابت تا ۱ میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، تنش برشی حداکثر روندی صعودی طی نموده و در سرعت‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه روندی نزولی داشته است. دلیل این کاهش، کاهش اصطکاک و قفل و بست بین‌دانه‌ای مصالح در فصل مشترک با بتن آسفالتی بوده است. افزایش تنش برشی حداکثر (مقاومت برشی در لحظه‌ی گسیختگی) با افزایش تراکم نسبی در مصالح خاکی را می‌توان به افزایش مقاومت ذرات شن موجود در سطح شکست در مقابل چرخش و واژگون شدن نسبت داد. همچنین، افزایش سرعت بارگذاری در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ و ۸۰ درصد، افزایش تنش برشی حداکثر را به دنبال داشته که میزان این افزایش در مصالح با تراکم بالاتر، بیشتر بوده است. در مصالح خاکی با تراکم ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، منجر به افزایش و کاهش تنش برشی حداکثر شده است.

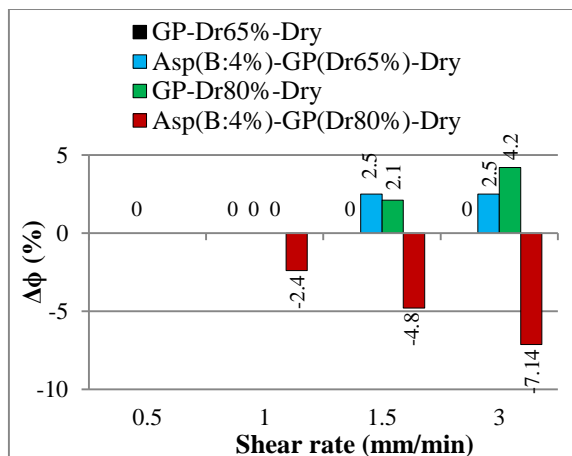


ب

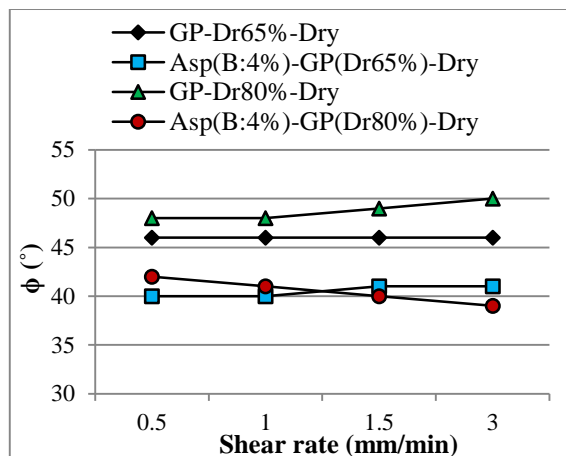


الف

شکل ۱۸: الف) روند و ب) میزان تغییرات چسبندگی در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی GP و مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ب



الف

شکل ۱۹: (الف) روند و (ب) میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در مقابل سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی GP و مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

با بررسی تغییرات چسبندگی مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح در شکل ۱۸، به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف می‌توان مشاهده نمود که در سرعت بارگذاری ثابت، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی از ۶۵ به ۸۰ درصد، منجر به کاهش مقدار چسبندگی در مصالح خاکی شده است. در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت بارگذاری ۱ تا ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، موجب کاهش مقدار چسبندگی و در سرعت‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه (۱/۵ و ۳ میلی‌متر بر دقیقه)، افزایش تراکم نسبی، افزایش مقدار چسبندگی را به دنبال داشته است. در هر دو دسته مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، صرف‌نظر از تراکم نسبی مصالح، افزایش سرعت بارگذاری، موجب افزایش چسبندگی نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه شده است. در مجموع، میزان افزایش چسبندگی حاصل از افزایش سرعت بارگذاری، در مصالح با تراکم نسبی بیشتر، بالاتر بوده است.

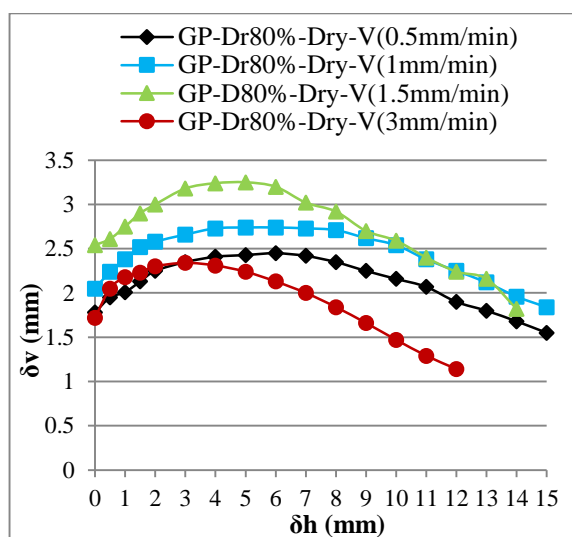
در رابطه با تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در سرعت بارگذاری ثابت، روند معکوسی نسبت به تغییرات چسبندگی مشاهده می‌شود. بدین مفهوم که در سرعت بارگذاری ثابت، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی در مصالح خاکی شده و در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت بارگذاری ثابت تا ۱ میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و در سرعت‌های بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش زاویه اصطکاک داخلی مشاهده گردیده است. افزایش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تراکم نسبی، برای خاک درشت‌دانه در دستگاه برش مستقیم، در تحقیقات صورت گرفته توسط کمک‌پناه و جنگلی (۱۳۹۱) و سزرا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) ارائه گردیده است. دلیل افزایش زاویه اصطکاک داخلی با افزایش تراکم نسبی، آن است که افزایش تراکم، نقش بسزایی در قفل و بست مصالح و افزایش اصطکاک بین ذره‌های مصالح دارد. به هر حال، همواره، تمایل به زاویه اصطکاک بزرگ‌تر برای خاک متراکم‌تر وجود دارد. از سوی دیگر، در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد، با افزایش سرعت بارگذاری، زاویه اصطکاک داخلی در مقدار ۴۶ درجه ثابت مانده و در این مصالح در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی، در نتیجه افزایش سرعت بارگذاری مشاهده شده است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد و در این مصالح در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، منجر به افزایش و کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است.

<sup>۱</sup> Sezer

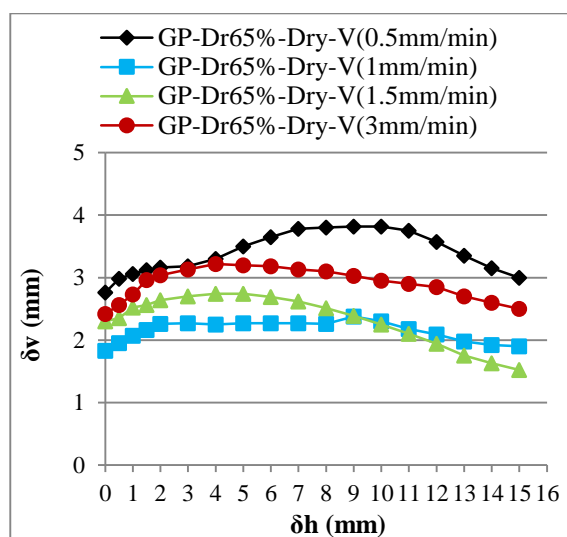
## ۳-۲-۲- تأثیر تراکم نسبی بر پارامترهای قفل و بستنی، در سرعت‌های بارگذاری مختلف

## ۳-۲-۲-۱- بررسی تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی

تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی برای مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، در سرعت‌های بارگذاری مختلف، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، به صورت تصویری، به ترتیب، در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است.

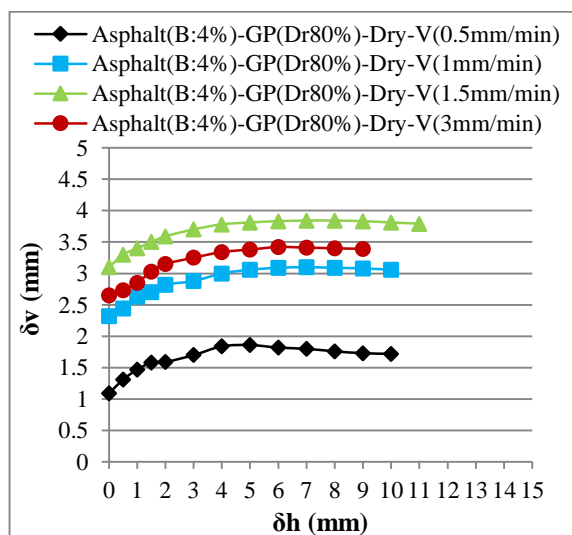


ب

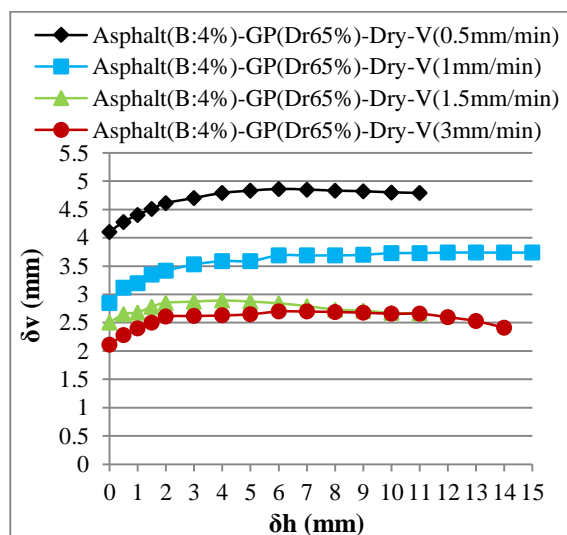


الف

شکل ۲۰: تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی برای الف) مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد و ب) مصالح GP با تراکم نسبی ۸۰ درصد، در شرایط خشک، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.



ب



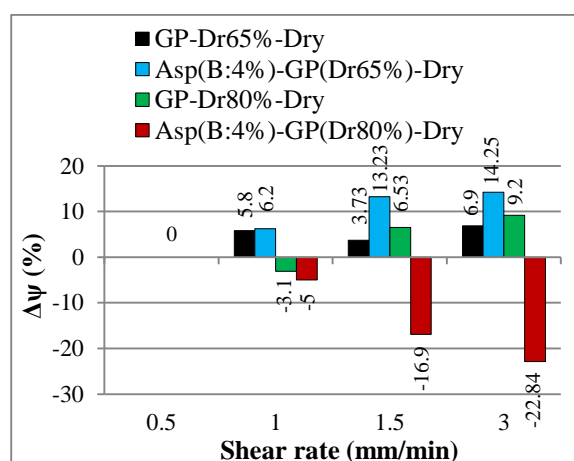
الف

شکل ۲۱: تغییرات تغییرمکان قائم-تغییرمکان افقی برای الف) مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی و ب) مصالح GP با تراکم نسبی ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در شرایط خشک، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

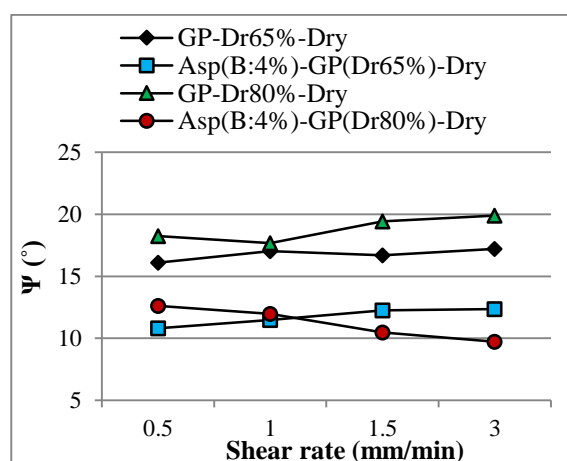
با مشاهده و بررسی تغییرات تغییرمکان قائم در برابر تغییرمکان افقی، چنین نتیجه می‌شود که در سرعت بارگذاری ثابت معادل ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش تراکم نسبی، تغییرمکان قائم کاهش یافته است. در سرعت‌های ثابت معادل ۱ و ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش تراکم نسبی، منجر به افزایش تغییرمکان قائم شده و در سرعت ثابت ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش تراکم نسبی، کاهش تغییرمکان قائم را به دنبال داشته است. در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت بارگذاری ثابت معادل ۰/۵ و ۱ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش تراکم نسبی، موجب کاهش تغییرمکان قائم و در سرعت‌های ثابت ۱/۵ و ۳ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش تراکم نسبی، منجر به افزایش تغییرمکان قائم شده است. در رابطه با تغییرات تغییرمکان قائم با افزایش سرعت بارگذاری، چنین مشاهده می‌شود که در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد، با افزایش سرعت بارگذاری، کاهش تغییرمکان قائم نسبت به مقدار آن در سرعت اولیه بارگذاری رخ داده است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد، تا تغییرمکان افقی ۳ میلی‌متر، افزایش سرعت از ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر بر دقیقه، باعث افزایش تغییرمکان قائم شده و در تغییرمکان‌های افقی بالاتر از ۳ میلی‌متر، افزایش سرعت از ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه و پس‌از آن، افزایش بیشتر سرعت به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، به ترتیب، منجر به افزایش و کاهش تغییرمکان قائم شده است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی نیز، افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، کاهش و افزایش تغییرمکان قائم را به دنبال داشته است.

### ۳-۲-۲-۲- بررسی تغییرات زاویه‌ی اتساع

روند و میزان تغییرات زاویه‌ی اتساع در مقابل سرعت بارگذاری، برای نمونه‌های حاوی مصالح GP با تراکم نسبی مختلف، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۲۲ نشان داده شده است.



ب



الف

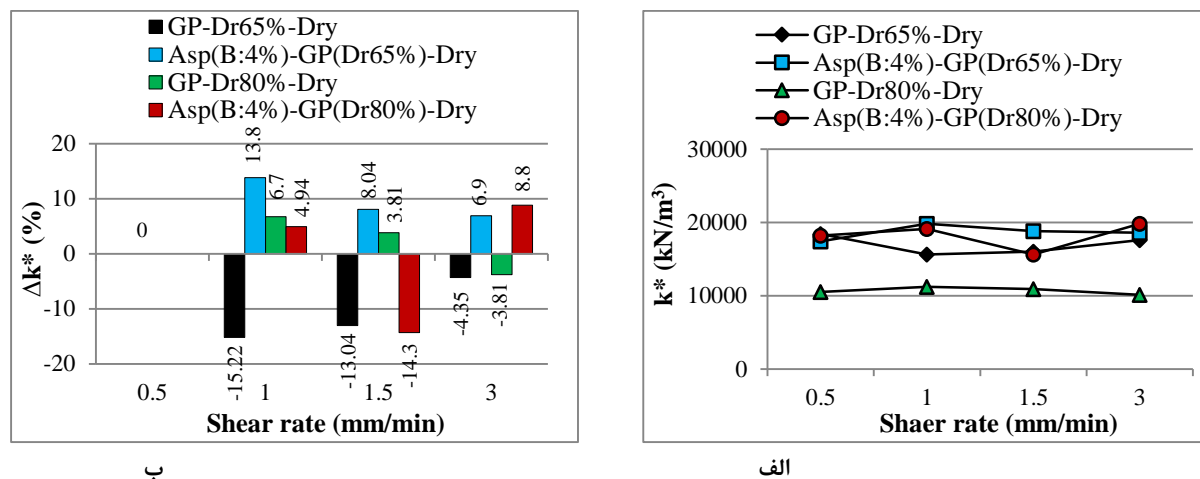
شکل ۲۲: الف) روند و ب) میزان تغییرات زاویه‌ی اتساع بر حسب سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی GP و مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

بررسی تأثیر میزان تراکم نسبی مصالح بر روند و میزان تغییرات زاویه‌ی اتساع در سرعت‌های بارگذاری مختلف، نشان‌دهنده‌ی آن است که در مصالح خاکی GP، در سرعت بارگذاری ثابت، با افزایش تراکم نسبی مصالح از ۶۵ به ۸۰ درصد، زاویه‌ی اتساع افزایش یافته است. در مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت بارگذاری ثابت معادل ۰/۵ و ۱ میلی‌متر بر دقیقه، با افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، افزایش زاویه‌ی اتساع و در سرعت‌های ثابت معادل ۱/۵ و ۳ میلی‌متر بر دقیقه، کاهش زاویه‌ی اتساع رخ داده است.

از سوی دیگر، در تراکم نسبی ثابت، افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۳ میلی‌متر بر دقیقه در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ و ۸۰ درصد، موجب افزایش زاویه‌ی اتساع شده است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، منجر به افزایش و کاهش زاویه‌ی اتساع شده است.

## ۳-۲-۲-۳- بررسی تغییرات سختی برشی

روند و میزان تغییرات سختی برشی در مقابل سرعت بارگذاری، برای نمونه‌های حاوی مصالح GP با تراکم نسبی مختلف، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



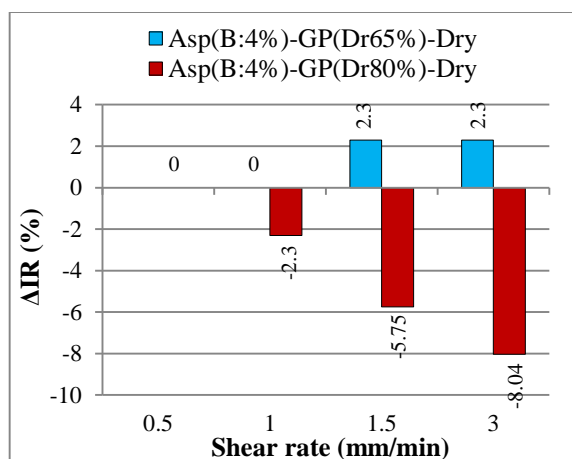
شکل ۲۳: الف) روند و ب) میزان تغییرات سختی برشی بر حسب سرعت بارگذاری، برای مصالح خاکی GP و مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

با مشاهده نمودارهای فوق، می‌توان دریافت که در سرعت بارگذاری ثابت، در مصالح خاکی، با افزایش تراکم نسبی، سختی برشی کاهش یافته است. در مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی نیز، با افزایش تراکم نسبی مصالح از ۶۵ به ۸۰ درصد، سختی برشی روندی تقریباً صعودی را طی کرده است. تنها در سرعت بارگذاری ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، اندکی کاهش در سختی برشی، نسبت به مقدار متناظر سختی برشی در مصالح با تراکم نسبی ۶۵ درصد در فصل مشترک رخ داده است.

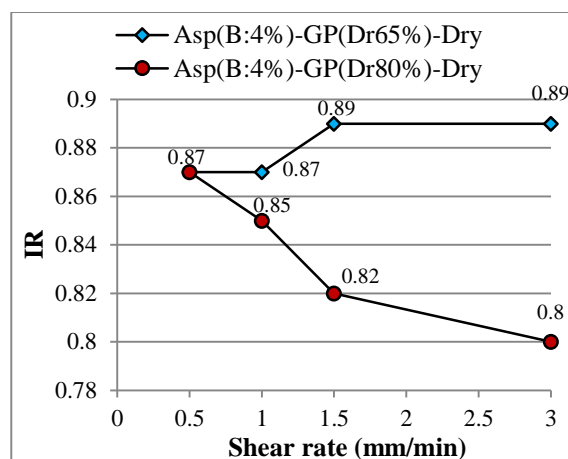
همچنین، با بررسی تغییرات سختی برشی در تراکم نسبی ثابت و با افزایش سرعت بارگذاری در سمت چپ شکل فوق، مشاهده می‌شود که در مصالح خاکی، در تراکم نسبی ثابت معادل ۶۵ درصد، با افزایش سرعت بارگذاری، سختی برشی، در مقایسه با مقدار آن در سرعت اولیه ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، روندی نزولی داشته است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد، افزایش سرعت بارگذاری تا ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، منجر به افزایش سختی برشی و با افزایش بیشتر سرعت به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، موجب کاهش سختی برشی نسبت به مقدار متناظر آن در سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه شده است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۶۵ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، افزایش سختی برشی را به دنبال داشته است. در مصالح خاکی با تراکم نسبی ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر، ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۳ میلی‌متر بر دقیقه، به ترتیب، موجب افزایش، کاهش و افزایش سختی برشی، نسبت به مقدار سختی برشی در سرعت اولیه شده است.

## ۳-۲-۲-۴- بررسی تغییرات نسبت اندرکنش

نسبت اندرکنش برای مصالح GP با تراکم نسبی مختلف در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به ازای مقادیر مختلف سرعت بارگذاری محاسبه شده و روند و میزان تغییرات آن، تحت تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال، در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۲۴: الف) روند و ب) میزان تغییرات نسبت اندرکنش بر حسب سرعت بارگذاری، برای مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با تراکم نسبی مختلف مصالح، تحت شرایط خشک و تنش نرمال ۳۰۰ کیلوپاسکال.

با مشاهده روند و میزان تغییرات نسبت اندرکنش می‌توان دریافت که در سرعت بارگذاری ثابت، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، منجر به کاهش نسبت اندرکنش شده است که با توجه به کاهش زاویه اصطکاک داخلی مصالح خاکی در فصل مشترک، در نتیجه افزایش تراکم نسبی، چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نیست. همچنین، با افزایش سرعت بارگذاری، در مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به ترتیب، افزایش و کاهش نسبت اندرکنش رخ داده است. بیشترین میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، به ترتیب، معادل ۲/۳ درصد و ۸/۰۴ درصد به دست آمده است.

#### ۴- جمع‌بندی نتایج

این مطالعه، با هدف تعیین پارامترهای مقاومتی فصل مشترک مصالح خاکی- بتن آسفالتی، با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، تحت سرعت‌های بارگذاری مختلف، همچنین با تغییر تراکم نسبی مصالح انجام شده است. یافته‌های حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

- در تمام نمونه‌ها، اعم از مصالح خاکی و مصالح خاکی در فصل مشترک با بتن آسفالتی، صرف‌نظر از نوع مصالح خاکی (GC یا GP)، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش تنش برشی حداکثر و افزایش مقادیر چسبندگی شده است. میزان افزایش تنش برشی حداکثر و چسبندگی در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به ترتیب، در محدوده‌ی ۱۳/۶-۰/۷۱ درصد و ۴۳۳/۳۳-۱۸۳/۳۳ درصد به دست آمده است. این میزان افزایش در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به ترتیب، در بازه‌ی ۴/۳-۸/۹۱ درصد و ۶۲/۵-۱۱۲/۵ درصد بوده است.
- در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، زاویه اصطکاک داخلی، در سرعت بارگذاری تا ۱ میلی‌متر بر دقیقه، روندی کاهشی و با افزایش بیشتر سرعت بارگذاری، روندی افزایشی، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه داشته است. در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی نیز، با افزایش سرعت بارگذاری، افزایش اندکی معادل ۲/۵ درصد در مقدار زاویه اصطکاک داخلی، نسبت به مقدار متناظر آن در سرعت بارگذاری اولیه رخ داده است.
- در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، سختی برشی و زاویه اتساع، به ترتیب، روندی تقریباً نزولی و صعودی را نسبت به مقادیر متناظر آن‌ها در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه طی نموده‌اند. در مورد مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، منجر به افزایش سختی برشی و زاویه اتساع شده است.

- در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری از ۰/۵ به ۱ میلی متر بر دقیقه، نسبت اندرکنش کاهش یافته و در سرعت های بالاتر، افزایش یافته و به مقداری ثابت رسیده است. میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه، معادل ۲/۳۶ درصد بوده است. در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، افزایش نسبت اندرکنش، جزئی و معادل ۲/۳ درصد بوده است.
- در مصالح GP با تراکم نسبی ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، منجر به افزایش (در محدوده ۴/۳-۸/۹۱ درصد) و کاهش (در محدوده ۰/۷۲-۲/۲ درصد) تنش برشی حداکثر، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه شده است.
- در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در سرعت بارگذاری ثابت تا ۱ میلی متر بر دقیقه، با افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و در سرعت های بالاتر از ۱ میلی متر بر دقیقه، کاهش زاویه اصطکاک داخلی مشاهده گردیده است.
- در مصالح GP با تراکم نسبی ثابت ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، افزایش (معادل ۲/۵ درصد) و کاهش (در محدوده ۲/۴-۷/۱۴ درصد) زاویه اصطکاک داخلی، نسبت به مقادیر متناظر آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه مشاهده شده است.
- در سرعت بارگذاری ثابت، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، از ۶۵ به ۸۰ درصد، منجر به کاهش نسبت اندرکنش شده است.
- در مصالح GP با تراکم نسبی ثابت ۶۵ درصد و ۸۰ درصد در فصل مشترک با بتن آسفالتی، با افزایش سرعت بارگذاری، به ترتیب، افزایش و کاهش نسبت اندرکنش رخ داده است. بیشترین میزان افزایش و کاهش نسبت اندرکنش، نسبت به مقدار آن در سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه، به ترتیب، معادل ۲/۳ درصد و ۸/۰۴ درصد به دست آمده است.
- در استاندارد مربوط به آزمایش برش مستقیم (ASTM-D3080)، چنین اشاره گردیده که محدوده تنش نرمال، سرعت برش و شرایط کلی آزمایش، بایستی متناسب با شرایط خاک مورد بررسی انتخاب گردد. در روش UU، به علت این که فاز اشباع وجود ندارد، انتخاب سرعت، تجربی بوده و انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس برای نمونه های خاک های دانه ای، معمولاً با سرعت بارگذاری معادل ۱ میلی متر بر دقیقه صورت می گیرد [۱۷]. لذا، با توجه به این مطلب و در نظر گرفتن نتایج حاصل از مطالعات قبلی انجام شده در مورد تأثیر سرعت بارگذاری و محدوده های سرعت های بارگذاری مورد بررسی در این مطالعات، در این تحقیق، سرعت انتخابی، در محدوده ۰/۵ تا ۳ میلی متر بر دقیقه انتخاب شده است. پیشنهاد می شود که تأثیر سرعت بارگذاری در مقادیری بالاتر از محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، بر پارامترهای مقاومت برشی المان سطح تماس مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، با توجه به تنوع مصالح خاکی مورداستفاده در سازه های مختلف، تأثیر تغییرات سرعت بارگذاری بر رفتار مکانیکی فصل مشترک سایر مصالح خاکی با دانه بندی های متفاوت و بتن آسفالتی بررسی گردد. در مجموع، با در نظر گرفتن این موضوع که تحقیقات بسیار کمی در رابطه با بررسی استاتیکی مسأله ای اندرکنش مصالح خاکی - بتن آسفالتی در سدهای خاکی و سنگریزه ای با هسته ای بتن آسفالتی انجام شده است، نیاز به انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می شود.
- با وجود معایب ذاتی آزمایش برش مستقیم مانند عدم توزیع یکنواخت تنش برشی بر روی صفحه ی گسیختگی، گسیختگی تحمیلی و اجباری خاک در فصل مشترک دو نیمه ی فوقانی و تحتانی جعبه ی برش، عدم امکان محاسبه ی وضعیت تنش ها در هر نقطه از نمونه و در هر مرحله از آزمایش، همچنین جداسازی سطح تماس جعبه ها از اواسط آزمون، پیشنهاد می شود که علاوه بر تکرارپذیری آزمایش ها جهت بررسی صحت سنجی دستگاه آزمایش برش مستقیم که در این تحقیق صورت گرفته است، مدل سازی و شبیه سازی آزمایش برش مستقیم نیز به منظور درستی سنجی نتایج حاصل از آزمون های آزمایشگاهی، با نرم افزارهایی نظیر FIA2D انجام شود.

## ۵- نتیجه گیری

نتایج کلی برگرفته از این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:



- (۱) در مصالح GC در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری در محدوده‌ی این مطالعه، یعنی از ۰/۵ به ۳ میلی‌متر بر دقیقه، در شرایط خشک، موجب افزایش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی، افزایش تغییر مکان قائم و کاهش سختی برشی شده است. همچنین، در سرعت‌های بارگذاری بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه در شرایط خشک، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، افزایش زاویه‌ی اتساع و افزایش نسبت اندرکنش رخ داده است.
- (۲) در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، افزایش سرعت بارگذاری تحت شرایط خشک، منجر به افزایش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی، کاهش تغییر مکان قائم، افزایش زاویه‌ی اتساع و افزایش سختی برشی شده است. همچنین، اعمال سرعت بارگذاری در مقادیر بالاتر از ۱ میلی‌متر بر دقیقه، موجب افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و افزایش نسبت اندرکنش شده است.
- (۳) در سرعت بارگذاری ثابت (محدوده‌ی ۳-۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه)، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، منجر به کاهش تنش برشی حداکثر، افزایش چسبندگی، کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی شده است.
- (۴) در سرعت بارگذاری ثابت (در محدوده‌ی این مطالعه)، افزایش تراکم نسبی مصالح خاکی در مصالح GP در فصل مشترک با بتن آسفالتی، کاهش زاویه‌ی اتساع، افزایش سختی برشی و کاهش نسبت اندرکنش را به دنبال داشته است.
- (۵) در واقع، می‌توان گفت که سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه که بر اساس تجربه، برای آزمایش برش مستقیم در مورد خاک دانه‌ای بدان استناد می‌شود، برای بررسی اندرکنش بین مصالح خاکی درشت‌دانه و بتن آسفالتی در دستگاه برش مستقیم نیز، یک سرعت بحرانی محسوب می‌شود.

## ۶- کاربرد یافته‌ها و نتایج حاصل از تحقیق در طراحی سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی

درک اثرات سرعت بارگذاری بر رفتار مقاومتی خاک، برای تفسیر دقیق و استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، تعیین احتمال وقوع پدیده‌ی اتساع، همچنین برای سرعت بخشیدن به روش‌های آزمون جهت کاهش هزینه‌ها، بسیار مهم و ضروری است. در کتاب "تحلیل و طراحی پی"، تألیف جوزف بولز [۱۸]، تغییرات نسبت اندرکنش در مقابل تراکم نسبی برای مصالح مختلف ترسیم شده است، به گونه‌ای که برای طراحی سازه‌هایی چون شمع‌های ورقه<sup>۱</sup> و دیوارهای حائل، نسبت اندرکنش بین ۰/۵-۰/۶۶ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک به دست آمده است. در مطالعه‌ی حاضر، نسبت اندرکنش برای نمونه‌های حاوی مصالح GC با تراکم نسبی متوسط در فصل مشترک با بتن آسفالتی، در مقابل مقادیر مختلف سرعت بارگذاری، در محدوده‌ی ۰/۹۵۵-۰/۹۱۱ و برای نمونه‌های حاوی مصالح GP با تراکم نسبی متوسط و بالا، در فصل مشترک با بتن آسفالتی، به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف، به ترتیب، در محدوده‌های ۰/۸۷۰-۰/۸۰۰ و ۰/۸۹۰-۰/۸۷۰ به دست آمده است که می‌توان در طراحی سازه‌هایی چون سد خاکی با هسته‌ی بتن آسفالتی یا روسازی، از این نتایج بهره برد. همچنین، تخمین پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی با نرم‌افزارهای مرتبط، بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم UU صورت می‌گیرد و هرچه نتایج آزمایشگاهی دقیق‌تر باشند، خروجی حاصل از تحلیل دینامیکی نیز از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. هرچند که با وجود تأثیرگذاری سرعت بارگذاری بر نتایج آزمایش برش مستقیم، این موضوع در مطالعات قبلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

## سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارکنان شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی استان تهران که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

## مراجع

- [1] Wang, Weibiao.; Feng, Shan.; & Zhang, Yingbo. (2017). Investigation of asphalt core-plinth connection in embankment dams. *Case Studies in Construction Materials*, 7(2017), Pages: 305-316. doi:10.1016/j.cscm.2017.09.002
- [2] Tajdini, M.; Rezaei Arjroudi, A. and Mahpoor, A.R. (2019). Investigation of shear strength parameters of sand and asphalt in the contact surface element. *Scientific Journal of Transportation*, Vol. 16, Issue 59, Pages: 189-198 (in Persian).
- [3] Nicholson, Peter G. (2015). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann publications (Elsevier Inc.).

<sup>۱</sup> Sheet Piles

- [4] Li, Y., Chan, L. S., Yeung, A. T., & Xiang, X. (2013). Effects of test conditions on shear behaviour of composite soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 166(3), Pages: 310–320. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00013>
- [5] Chevalier, B.; Baudouin, G.; Godi, G.; Bacconnet, C. & Breul, P. (2016). Mechanical testing of coarse soils with large direct shear box. Eurofuge 2016 - 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, June 2016, Nantes, France. hal-01658947.
- [6] Chai, W., Long, Z. L., Kuang, D. M., Chen, J. M., & Yan, C. P. (2019). Effect of shear rate on shear strength and deformation characteristics of calcareous sand in direct shear test. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 40, Pages: 359–366. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.2311>
- [7] Hamed, M., Sidik, W. S., Canakci, H., Celik, F., & Georgees, R. N. (2020). Characterization of shear strength and interface friction of organic soil. In *Key Engineering Materials* (Vol. 857 KEM, Pages: 203–211). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.203>
- [8] Beren, M., Çobanoglu, I., Çelik, S. B., & Ündül. (2020). Shear Rate Effect on Strength Characteristics of Sandy Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(4), Pages: 281–287. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09667-y>
- [9] Zhang, M., Sang, S., Wang, Y., & Bai, X. (2020). Factors Influencing the Mechanical Characteristics of a Pile–Soil Interface in Clay Soil. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00364>
- [10] Ghaffari, J. & Binay, R. (2021). Investigation of loading rate effect on the shear strength of clay-sand mixture in triaxial test. *Amir Kabir journal of Civil Engineering*, 53(4), 1-3. doi:10.22060/ceej.2019.16947.6439
- [11] Raj Bhat, D. (2022). Shear rate effect on residual strength of typical clay soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00629-3>
- [12] ASTM-D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, West Conshohocken, PA: ASTM International (2007).
- [13] ASTM-D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, West Conshohocken, PA: ASTM International (2010).
- [14] ASTM-D1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), West Conshohocken, PA: ASTM International (2012).
- [15] ASTM-D4254, Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, West Conshohocken, PA: ASTM International (2017).
- [16] ASTM-D5581, Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6 inch-Diameter Specimen), West Conshohocken, PA: ASTM International (2007).
- [17] Moradi, Dariush. (1401). *Comprehensive directory of soil mechanics, soil and geotechnical engineering*. First Edition. Tehran: Noavar Publication (in Persian).
- [18] Bowles JE. (1982). *Foundation analysis and design*. 3rd ed. Canada: McGraw-Hill.