

طراحی و ساخت دستگاه سطح شیبدار جهت مدلسازی اندرکنش سطح مشترک لایه‌های ژئوسینتتیک

پیمان شیخی، سید حمید لاجوردی*

گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۱۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۱۲
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۲۹

کلمات کلیدی:

ژئوسینتتیک
مطالعه آزمایشگاهی
دستگاه سطح شیبدار
اندرکنش سطح مشترک
ژئوممبرین-ژئوتکستایل

خلاصه: یکی از کاربردهای مهم ژئوسینتتیک‌ها در شیروانی‌های خاکی از قبیل محل دفن زباله و حوضچه‌های آب و فاضلاب استفاده آنها به عنوان پوشش و عایق می‌باشد. ارزیابی صحیح اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها در سطوح شیروانی‌های خاکی از قبیل محل دفن زباله یک مسئله مهم جهت جلوگیری از وقوع لغزش و ناپایداری شیروانی‌ها می‌باشد. آزمایش سطح شیبدار یک روش مناسب جهت ارزیابی اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک‌هایی که در حالت مایل و شیبدار روی هم قرار گرفته و تحت تنش قائم کم هستند می‌باشد. استاندارد اروپایی EN ISO 12957-2 روشی تحت عنوان "جابجایی استاندارد" برای تخمین زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها ارائه کرده است. در این مقاله دستگاه آزمایش سطح شیبدار که برای اولین بار در ایران بطور کامل طراحی و ساخته شده همراه با تشریح مشخصات فنی دستگاه و آماده‌سازی نمونه معرفی می‌گردد. این دستگاه توانایی انجام آزمایش جهت بررسی اندرکنش سطح مشترک خاک-خاک، ژئوسینتتیک و ژئوسینتتیک-ژئوتکستایل تحت تنش قائم کم را دارا می‌باشد. آزمایش‌هایی بر روی انواع ژئوممبرین و ژئوتکستایل جهت بررسی اندرکنش سطح مشترک آنها انجام می‌شود. با تغییر نوع ژئوسینتتیک‌ها مشاهده گردید که زاویه اصطکاک سطح مشترک آنها ثابت نمی‌باشد و بستگی به نوع ژئوممبرین و بافته یا نبافته بودن ژئوتکستایل، زاویه اصطکاک سطح مشترک آنها نیز تغییر می‌یابد. حالتی که ژئوممبرین از نوع پلی اتیلن سخت می‌باشد زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوممبرین-ژئوتکستایل کمترین مقدار و در حالتی که پلی وینیل کلراید استفاده شود بیشترین مقدار را دارا می‌باشد.

۱- مقدمه

جهت استفاده از ترکیب آنها به عنوان سیستم محافظ و عایق سطوح شیبدار ارائه خواهد کرد. در سیستم‌های پوششی و عایق شیروانی‌های خاکی، ناپایداری و شکست فراوانی مشاهده گردیده است [۱] که ناشی از مشخصات ضعیف اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها [۲]، انتخاب نامناسب ژئوسینتتیک‌ها و اشتباه در نحوه قرارگیری آنها [۳] بوده است. سیستم‌های عایق بکار رفته در شیروانی‌ها، مرکب از چندین لایه ژئوسینتتیک و خاک می‌باشند (شکل ۱). همچنین در شکل ۲ نمونه‌هایی از اجرای سیستم پوشش و عایق در شیروانی‌های خاکی در پروژه‌های عمرانی نمایش داده شده است. عایق شیروانی‌ها با توجه به عملکرد و کارایی مختلف مصالح طراحی

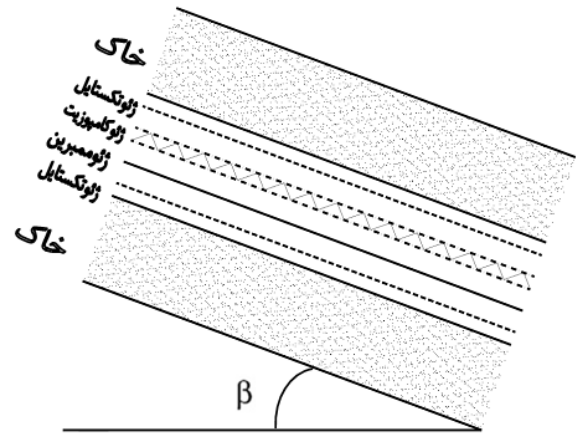
در سال‌های اخیر استفاده از مصالح ژئوسینتتیک در امور مهندسی رشد چشمگیری داشته است. یکی از پارامترهای کلیدی مربوط به ارزیابی اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک-ژئوسینتتیک، خاک-خاک و خاک-ژئوسینتتیک، تعیین زاویه اصطکاک سطح مشترک آنها می‌باشد. برای مثال در شیروانی‌های خاکی مانند محل دفن زباله و حوضچه‌های فاضلاب جایی که لایه‌های ژئوسینتتیک روی خاک و روی هم بصورت مایل و شیبدار قرار می‌گیرند، برآورد صحیح اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها، راه حل مناسبی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Sh-lajvardi@iau-Arak.ac.ir





شکل ۲. اجرای سیستم پوشش و عایق در شیروانی‌های خاکی [۵]
Fig. 2. Implementation landfill covers on slopes



شکل ۱. سیستم پوشش و عایق در شیروانی‌ها
Fig. 1. Typical liner system on slope

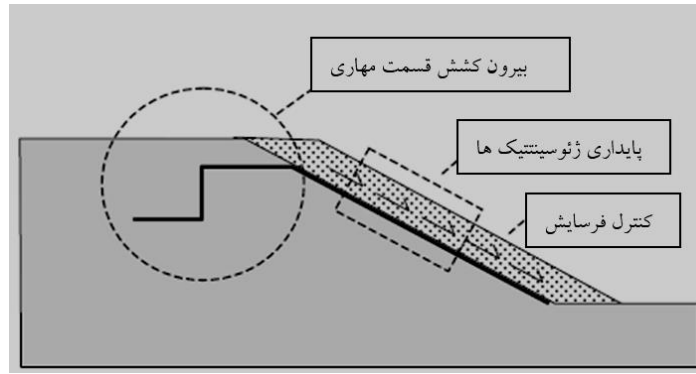
آزمایش سطح شیب‌دار برای تعیین زاویه اصطکاک سطح مشترک خاک-ژئوسینتتیک و ژئوسینتتیک-ژئوسینتتیک استفاده کرده‌اند. در این مطالعات از دستگاه‌های آزمایش سطح شیب‌دار با ابعاد متفاوت، انواع مختلف خاک، انواع ژئوسینتتیک و بارگذاری‌های مختلف جهت اعمال سربار قائم استفاده گردیده است. بطور کلی با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت پذیرفته توسط محققین مشاهده می‌گردد که مقدار زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها ثابت نبوده و به عوامل مختلفی از قبیل نوع ژئوسینتتیک‌ها، مقدار سربار قائم و بستگی دارند. به منظور محدود کردن کشش بسیج شدگی ژئوممبرین، مقدار اصطکاک حداقلی بین ژئوتکستایل و ژئوممبرین مورد نیاز است [۴]. منظور از کشش بسیج شدگی عبارت است از مقدار نیروی کششی که در هنگام لغزش مصالح بر روی ژئوممبرین بوجود می‌آید که سبب تغییر شکل‌های ماندگار یا پلاستیک در ژئوممبرین شده و باعث از بین رفتن حالت عایقی آن خواهد شد. به همین منظور در این تحقیق اقدام به طراحی، ساخت و راه‌اندازی دستگاه آزمایش سطح شیب‌دار گردید. در این راستا، آزمایش‌هایی بر روی سه نوع ژئوممبرین و دو نوع ژئوتکستایل بافته شده و نشده تحت سربار ۲ کیلو پاسکال جهت تعیین خصوصیات اصطکاکی سطح مشترک آنها انجام شده است.

۲- پیش زمینه تئوری و روش شناسی

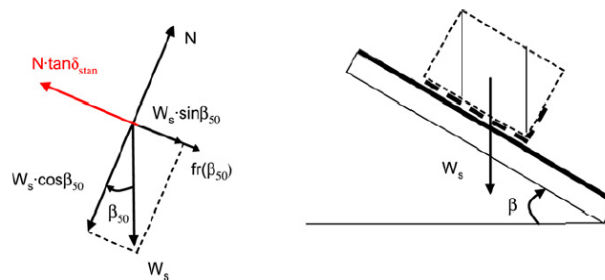
در سال‌های اخیر، بسیاری از استراتژی‌های مدیریت زباله با هدف

می‌گردد. این مولفه‌ها برای یک یا چندین هدف، از قبیل آب‌بندی (ژئوممبرین)، زهکشی (ژئوکامپوزیت)، مسلح سازی (ژئوگرید) و محافظ و پوشش (ژئوتکستایل) بکار می‌روند. طراحی چنین سیستمی برای شیروانی‌ها، نیاز به مقدمات اولیه از قبیل ارزیابی زاویه اصطکاک سطح مشترک بین لایه‌های مختلف ژئوسینتتیک‌ها را دارد بخصوص در صفحه لغزش اجباری [۴] که بطور کلی در بین سطح مشترک مصالح قرار گرفته است.

جعبه برش مستقیم و سطح شیب‌دار دو آزمایشی هستند که توسط دو استاندارد اروپایی EN ISO 12957-1 و EN ISO 12957-2 جهت ارزیابی خصوصیات اندرکنش برای انواع ژئوسینتتیک و خاک توصیه شده‌اند [۷۶]. محققین مختلفی از قبیل وستی و همکاران (۲۰۰۱)، ایزگیین و همکاران (۱۹۹۸) و کوتسوریاس و همکاران (۱۹۹۱) با آزمایش جعبه برش مستقیم [۸-۱۱] و گیراد و همکاران (۱۹۹۰)، لالاراکاتسون و همکاران (۱۹۹۹)، پالمیرا و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۰۲) و کربن (۲۰۱۵ و ۲۰۱۲) بوسیله آزمایش سطح شیب‌دار به بررسی اثر اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها پرداخته‌اند [۱۲-۲۳]. با بررسی نتایج هر دو آزمایش مشاهده گردید که آزمایش سطح شیب‌دار در تنش‌های قائم کمتر از ۵ کیلوپاسکال برای ارزیابی خصوصیات اصطکاکی ژئوسینتتیک‌هایی که با افق زاویه می‌سازند مناسب می‌باشد در حالیکه دستگاه جعبه برش مستقیم برای تنش‌های قائم بالاتر و حالتی که ژئوسینتتیک‌ها بصورت افقی روی هم قرار می‌گیرند انتخاب می‌گردد. محققین بسیاری از دستگاه



شکل ۳. مشکلات اساسی موجود در سیستم پوشش و عایق محل دفن زباله در شیروانی‌های خاکی [۱۲]
 Fig. 3. Main issues related to the stability of liner systems on landfill slopes



شکل ۴. نمودار جسم آزاد روش جابجایی استاندارد
 Fig. 4. Free-body diagram for the Standard Displacement Procedure

"روش جابجایی استاندارد" جهت تعیین زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها (δ)، تحت تنش قائم کم با آزمایش دستگاه سطح شیبدار، برای انواع ترکیب ژئوسینتتیک-ژئوسینتتیک معرفی نموده است. در هر روشی برای تعیین خصوصیات اصطکاکی ژئوسینتتیک‌ها، نیروی قائم ($W \cdot \cos \beta$) بعنوان سربار برای توزیع یکسان تنش باید اعمال گردد (شکل ۴). استاندارد فوق برای اعمال این شرایط حداکثر مقدار سربار را برای حالت ($\beta=0$) برابر 0.1 ± 5 کیلو پاسکال تعیین نموده است.

بر اساس "روش جابجایی استاندارد"، زاویه اصطکاک استاندارد (δ_{stan}) برای انواع ژئوسینتتیک‌ها طبق رابطه ۱ که توسط محققین پیشین [۱۱-۲۱] پیشنهاد شده بدست خواهد آمد:

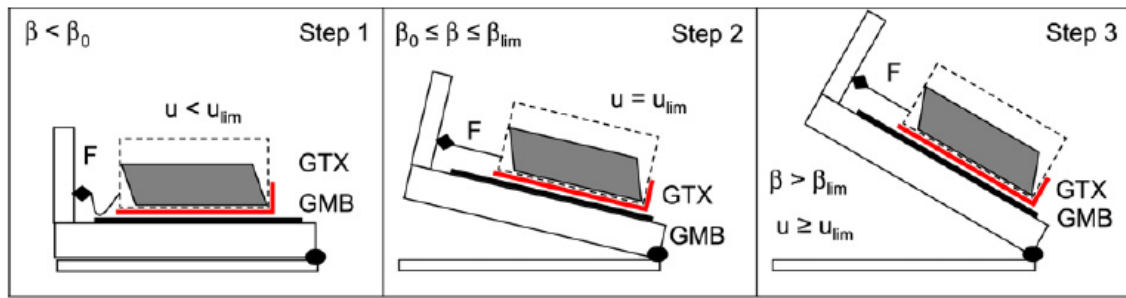
$$\tan \delta_{stan} = \frac{W_s \cdot \sin \beta_{50} + Fr(\beta_{50})}{W_s \cdot \cos \beta_{50}} \quad (1)$$

که در آن W_s وزن سربار قائم (که طبق پیشنهاد استاندارد اروپایی جهت اعمال این سربار می‌توان از خاک یا یک صفحه فولادی

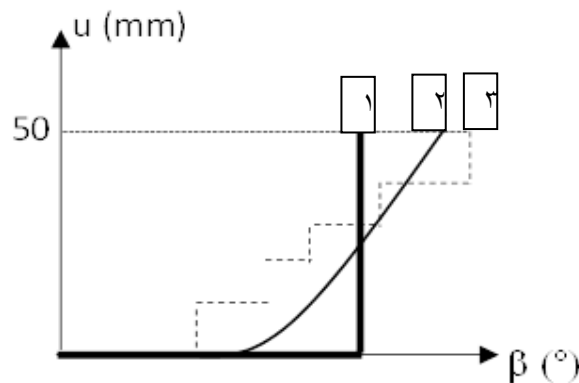
کاهش تولید، بازیافت و استفاده مجدد از زباله معرفی شده است. با این حال، مقدار زیادی زباله به اجبار باید در محیط زیست قرار گیرد و بهترین محل جایگذاری آنها در شیروانی‌های خاکی می‌باشد. دفن مهندسی و مدرن زباله‌ها طوری طراحی و مدیریت شده است تا انتشار مواد تشکیل دهنده زباله‌ها به محیط زیست به حداقل رسیده یا کاملاً از بین بروند. بنابراین شیروانی‌های محل دفن زباله شامل چند سیستم عایق از جمله سیستم‌های عایق از کف، پوشش جانبی و پوشش و عایق از بالا می‌باشند در این راستا، نگرانی‌های اصلی در مورد یکپارچگی سیستم‌های پوشش عبارتند از: لغزش و پایداری ژئوسینتتیک‌ها، مقاومت بیرون کشش قسمت مهاری ژئوسینتتیک‌ها و کنترل فرسایش قسمت پوشش بالایی ژئوسینتتیک‌ها (شکل ۳). در این تحقیق به بررسی یکی از پارامترهای پایداری ژئوسینتتیک‌ها یعنی زاویه اصطکاک سطح مشترک آنها پرداخته شده است.

۲-۱- روش جابجایی استاندارد

استاندارد اروپایی EN ISO 12957-2 [۷] روشی را تحت عنوان



شکل ۵. مکانیزم انجام آزمایش
Fig. 5. Testing mechanism



شکل ۶. حالت‌های مختلف لغزش جعبه بالایی [۱۸]
Fig. 6. Different mechanisms of upper box sliding

رسیده است. دلیل این افزایش جابجایی (u) از مقدار جابجایی محدود (u_{lim})، افزایش طول ناچیز کابل متصل به جعبه بالایی می‌باشد. در شکل ۵ منظور از (u) جابجایی جعبه بالایی، (u_{lim}) مقدار جابجایی جعبه بالایی به میزان $0/05$ متر، GTX و GMB به ترتیب معرف ژئوتکستایل و ژئوممبرین، β_0 زاویه جعبه پایین نسبت به افق در فاز اول و β_{lim} مقدار زاویه جعبه پایینی نسبت به افق در جابجایی جعبه بالایی به میزان $0/05$ متر می‌باشد.

۳-۲- تحلیل لغزش جعبه بالایی

نتایج محققین نشان می‌دهند که بسته به نوع ژئوسینتتیک، لغزش جعبه بالایی به سه صورت انجام می‌گیرد (شکل ۶).
• لغزش ناگهانی^۱: جعبه بالایی دارای جابجایی ناگهانی می‌باشد (منحنی شماره ۱).
• لغزش تدریجی پیش رونده^۲: در این حالت جعبه بالا

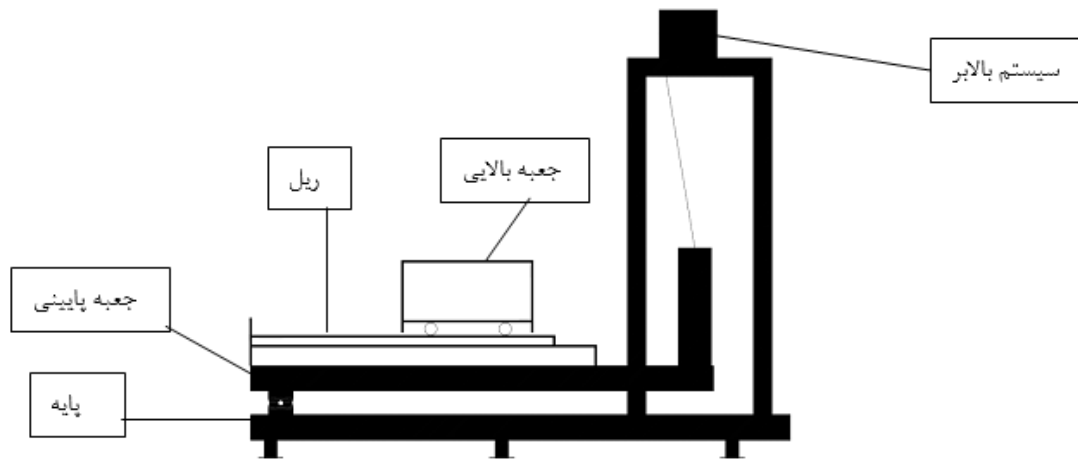
(استفاده نمود)، β_{50} زاویه سطح شیب‌دار در جابجایی جعبه بالایی به میزان $0/05$ متر (u_{lim})، $Fr(\beta_{50})$ نیروی لازم جهت نگهداری جعبه خالی بالایی است.

۲-۲- مکانیزم آزمایش

مکانیزم انجام آزمایش از لحظه شروع تا پایان به سه قسمت تقسیم می‌شود (شکل ۴):

- فاز اول (حالت ایستا): در این فاز آزمایش شروع شده است و جعبه پایینی در حال برخاست می‌باشد و جعبه بالایی هیچگونه حرکتی ندارد. در حین انجام آزمایش جعبه بالایی نباید هیچگونه حرکت جانبی داشته باشد.
- فاز دوم (حالت گذرا): در این فاز با افزایش زاویه جعبه پایینی نسبت به افق، جعبه بالایی شروع به حرکت کرده و شتاب آن افزایش می‌یابد.
- فاز سوم (لغزش-تثبیت نشده): در این فاز جعبه بالا به مقداری بیش از حداکثر جابجایی (u) خود یعنی حدود $0/051$ یا $0/052$ متر

1 Sudden sliding
2 Gradual sliding (progressive sliding)



شکل ۷: دستگاه آزمایش سطح شیبدار
Fig. 7. inclined plane apparatus

دستگاه مجهز به یک نیرو سنج، جابجایی سنج و شیب سنج می باشد. مکانیزم انتقال نیرو به نیروسنج توسط یک کابل که متصل به جعبه بالایی است، امکانپذیر می باشد. جدول ۱ خلاصه ای از مشخصات و خصوصیات دستگاههای آزمایش سطح شیب دار موجود در جهان را نشان می دهد.

۳-۱-۲ دستگاه ساخته شده در داخل کشور

دستگاه آزمایش سطح شیبدار برای اولین بار در ایران با رعایت تمامی نکات استاندارد اروپایی EN ISO 12957-2 [۷] از ورق های فولادی رده St-37 با ضخامت ۰/۰۰۸ متر طراحی و ساخته شده است (شکل ۸) که در ادامه بخش های مختلف دستگاه توصیف شده اند. همانطور که از شکل ۸ نمایان است این دستگاه شامل یک پایه که دارای طولی برابر ۲/۵ متر و عرض ۱ متر می باشد شکل ۹. بر روی این پایه یک جعبه مستطیلی (جعبه پایینی) به طول ۲ متر و عرض ۰/۸۰ متر و ارتفاع ۰/۱۵ متر قرار گرفته شده است که از انتها بصورت تکیه گاه لولایی به پایه متصل شده است (شکل ۱۰). بر روی این جعبه دو ریل موازی در راستای طولی تعبیه گردیده است. بدلیل قابلیت قرارگیری خاک درون جعبه پایینی، از این دستگاه برای ارزیابی اندرکنش سطح مشترک خاک-خاک و خاک-ژئوسینتتیک نیز می توان استفاده نمود.

بر روی جعبه پایینی یک جعبه مستطیلی (جعبه بالایی) با طول ۱/۲۰ متر و عرض ۰/۶۰ متر می باشد که بوسیله یک کابل به پایه متصل شده است. ارتفاع جعبه در قسمت دو ضلع موازی در راستای

دارای حرکتی بصورت لغزش تدریجی پیش رونده یا تصاعدی می باشد (منحنی شماره ۲).

• لغزش تدریجی پلکانی^۱: در این حالت جعبه بالا بصورت لغزش پلکانی حرکت می کند (منحنی شماره ۳) [۱۶].

۳- مصالِح، تجهیزات آزمایش و روش انجام

۳-۱-۳ دستگاه آزمایش سطح شیبدار

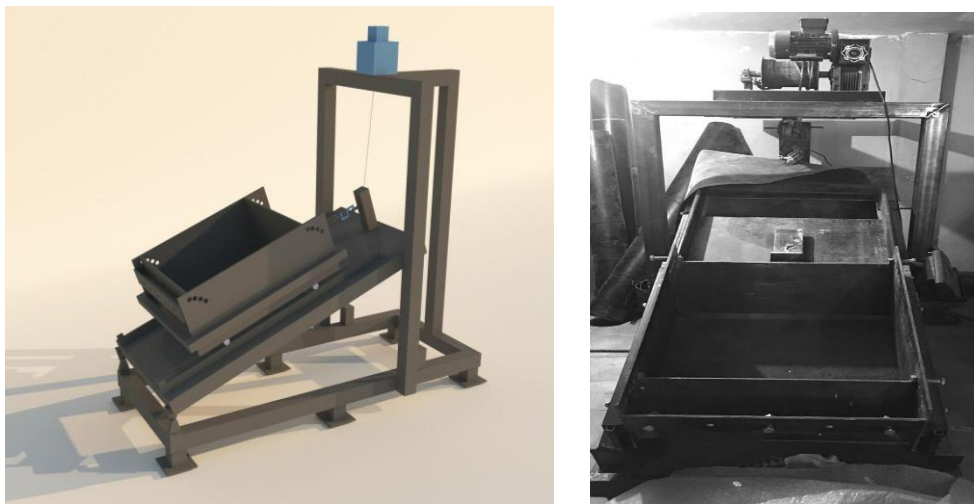
۳-۱-۳-۱ دستگاه توصیه شده توسط استاندارد EN ISO 12957-2

براساس استاندارد فوق، دستگاه شامل یک پایه^۲، جعبه پایینی^۳، جعبه بالایی^۴ و سیستم بالابر^۵ می باشد. این استاندارد اروپایی حداقل ابعادی را برای اجزاء دستگاه در نظر گرفته است: حداقل طول جعبه پایین ۰/۴۰ متر و عرض آن ۰/۳۲۵ متر و برای جعبه بالایی طول و عرض آن برابر ۰/۳۰ متر (شکل ۷). ترتیب قرارگیری اجزاء دستگاه به اینگونه می باشد که جعبه بالایی توسط چهار بلبرینگ که به زیر آن متصل می باشند روی یک ریل که روی جعبه پایینی تعبیه گردیده قرار دارد. جعبه پایینی هم توسط یک تکیه گاه که بصورت لولا می باشد از انتها به پایه متصل شده است. همچنین جعبه پایینی به یک سیستم بالابر متصل گردیده است. سرعت برخاست جعبه پایین بر اساس استاندارد برابر 3 ± 0.5 درجه بر دقیقه می باشد. همچنین

- 1 Gradual sliding (stick-slip)
- 2 Base
- 3 Lower box
- 4 ³Upper box
- 5 Motorized winch

جدول ۱. خلاصه‌ای از مشخصات دستگاه آزمایش سطح شیب‌دار موجود در جهان
Table 1. Summary specifications of ramp testing machine in world

محققین	ابعاد جعبه بالایی (m) ارتفاع×عرض×طول	ابعاد جعبه پایینی (m) ارتفاع×عرض×طول	سرعت برخواست (°/min)	سربار (kPa)	خاک مورد استفاده	ژئوسینتتیک های مورد استفاده
ایزگین و همکاران (۱۹۹۸) [۱۰]	۰/۶۰×۰/۴۹×۰/۰۲۵	۰/۹۰×۰/۶۰	-	۵-۵۰	ماسه اوتاوا-ماسه معدنی	ژئوممبرین
بریانسون و همکاران (۲۰۰۲) [۱۸]	۱×۱×۰/۵۰	۲×۱/۲۰×۰/۲۵	۳/۵-۰/۵	۴	خاک ماسه‌ای	ژئوممبرین-ژئوتکستایل
پالمیرا و همکاران (۲۰۰۲) [۱۵]	۱/۹۲×۰/۴۷×۰/۲۵	۲/۷۰×۰/۶۰×۰/۰۱	-	۵/۷۵ الی ۱۱/۲۵	خاک ماسه‌ای و رسی	ژئوممبرین-ژئونت-ژئوگرید-ژئوتکستایل
بریانسون و همکاران (۲۰۱۱) [۲۰]	۱×۱×۰/۵۰	۲×۱/۲۰×۰/۲۵	۳/۵-۰/۵	۵	خاک دانه‌ای	ژئوممبرین-ژئوکامپوزیت
استولز و همکاران (۲۰۱۲) [۱۹]	۱×۱	-	۱/۵	۴	خاک دانه‌ای	ژئوممبرین-ژئوتکستایل
کربن و همکاران (۲۰۱۵) [۲۱]	۰/۱۸×۰/۷۰	۱/۳۰×۰/۸۰	۳/۵-۰/۵	۵	خاک دانه‌ای	ژئوممبرین-ژئوتکستایل
پاوانلو و همکاران (۲۰۱۶) [۲۲]	۰/۳۵×۰/۲۰	۱/۱۰×۰/۲۵	۳	۵	خاک دانه‌ای	ژئوکامپوزیت-ژئوگرید-ژئونت عایق رسی-ژئوگرید-ژئونت

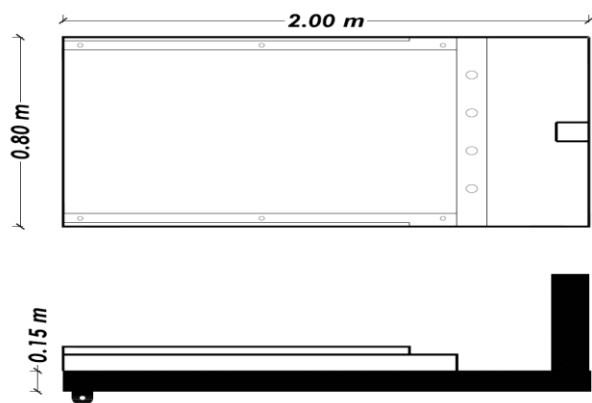


شکل ۸. دستگاه ساخته شده در داخل کشور

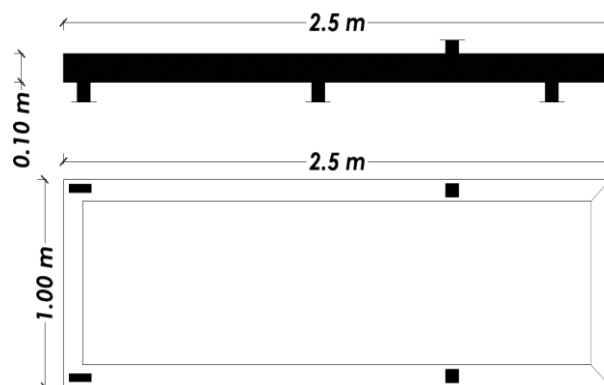
Fig. 8. Built-in machine

ثابت بوده و دو ضلع دیگر در راستای عرضی از انتها بصورت لولا بوده که قابلیت چرخش از قسمت بالایی خود به میزان ۱۰ درجه نسبت به

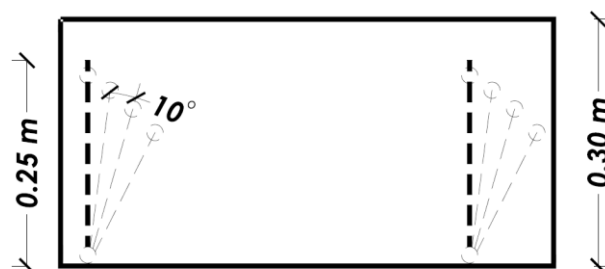
طولی برابر ۰/۳۰ متر و در قسمت دو ضلع موازی راستای عرضی برابر ۰/۲۵ متر می‌باشد (شکل ۱۱). دو ضلع موازی در راستای طولی جعبه



شکل ۱۰. دید از بالا و کنار جعبه پایینی
Fig. 10. Top and side view of lower box



شکل ۹. دید از بالا و کنار پایه
Fig. 9. Top and side view of base



شکل ۱۱. دید از کنار جعبه بالایی
Fig. 11. Top and side view of upper box

ریل ناچیز می‌باشد، جعبه بالایی که خالی از خاک می‌باشد در زاویه‌ای کمتر از ۵ درجه باید شروع به حرکت کند. در این دستگاه مورد تحقیق این اتفاق در زاویه‌ای برابر با ۳ درجه افتاد.

۳-۲- فرآیند آزمایش‌های آزمایشگاهی

۳-۲-۱ مشخصات مصالح آزمایش

در این مطالعه از سه نوع ژئوممبرین از جنس پلی اتیلن سخت^۱، پلی پروپیلن^۲ و پلی وینیل کلراید^۳ و دو نوع ژئوتکستایل بافته شده^۴ و بافته نشده^۵ استفاده گردیده است. در ادامه برای راحتی بیشتر، هر یک از ژئوسینتتیک‌ها بصورت جداگانه نامگذاری شده‌اند (جدول ۲). همچنین تصاویری از ژئوممبرین‌ها و ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه گردیده است.

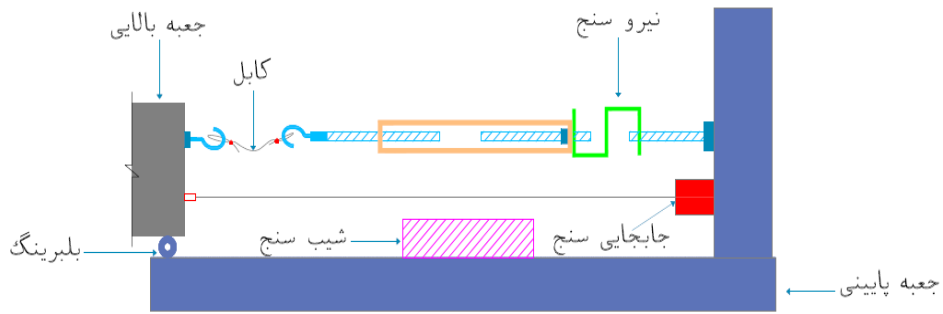
- 1 High-density polyethylene geomembrane (GMB_{HDPE})
- 2 Polypropylene geomembrane (GMB_{PP})
- 3 Polyvinyl chloride geomembrane (GMB_{PVC})
- 4 Woven geotextile (GTX_w)
- 5 Non-woven geotextile (GTX_{nw})

قائم و در مجموع به میزان ۳۰ درجه را دارد.

همچنین این دستگاه مجهز به یک نیرو سنج S شکل ۵ تنی با دقت ۵۰۰ گرم می‌باشد که بر روی جعبه پایینی تعبیه شده است که توسط یک کابل به جعبه بالایی متصل می‌باشد. سیستم مجهز به یک جابجایی سنج کابلی با دقت ۰/۰۰۱ متر می‌باشد. همچنین یک شیب سنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ درجه بر روی جعبه پایینی قرار گرفته شده است (شکل ۱۲). شایان ذکر می‌باشد که تمامی ابزارسنج‌ها قبل از انجام آزمایش‌ها کالیبره شده‌اند. دستگاه مجهز به یک سیستم بالابر می‌باشد که سرعت برخاست آن برابر ۳ درجه بر دقیقه می‌باشد که توسط یک کابل به جعبه پایینی متصل شده است.

۳-۱-۳ ارزیابی عملکرد دستگاه

طبق توصیه استاندارد اروپایی EN ISO 12957-2 [۷] دستگاه قبل از انجام آزمایش‌ها، باید مورد صحت سنجی قرار گیرد. به همین منظور و حصول اطمینان از اینکه اصطکاک بلبرینگ‌ها و



شکل ۱۲. قرارگیری ابزار اندازه‌گیری نیرو، شیب و جابجایی

Fig. 12. Positioning tools for measuring force, slope and displacement

جدول ۲. نامگذاری ژئوسینتتیک‌ها

Table 2. Naming Geosynthetics

جنس ژئوسینتتیک	نام ژئوسینتتیک	ضخامت (m)	جرم واحد سطح (g/m ²)	رنگ
پلی اتیلن سخت	ژئوممبرین ۱	۰/۰۱	۴۰۰	مشکی
پلی پروپیلن	ژئوممبرین ۲	۰/۰۱	۳۰۰	مشکی
پلی وینیل کلراید	ژئوممبرین ۳	۰/۰۱	۲۶۰	طوسی
بافته شده	ژئوتکستایل ۱	۰/۰۰۱	۵۰	مشکی
بافته نشده	ژئوتکستایل ۲	۰/۰۰۲۵	۱۵۰	سفید

پلی وینیل کلراید



پلی پروپیلن

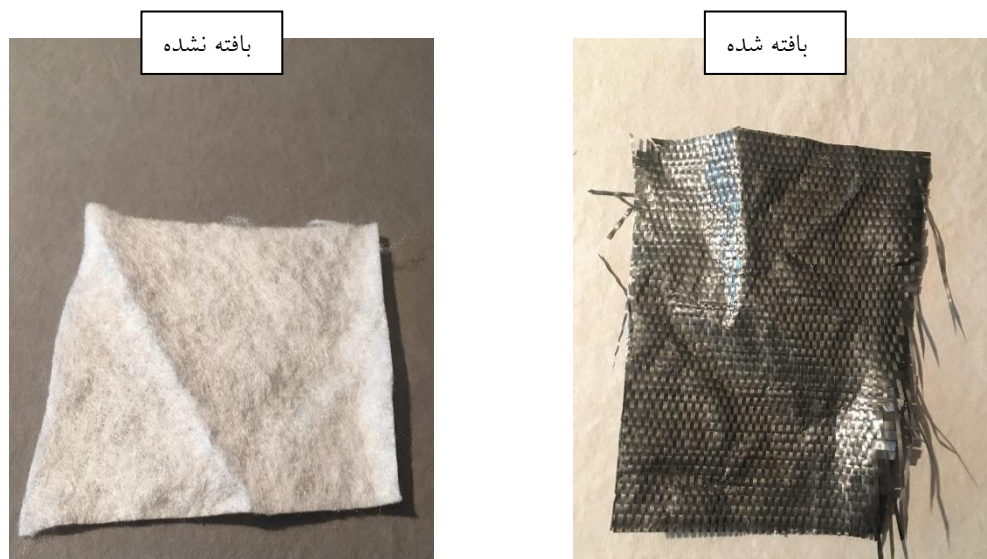


پلی اتیلن سخت



شکل ۱۳. ژئوممبرین‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

Fig. 13. Geomembranes used in experiments



شکل ۱۴. ژئوتکستایل‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها
Fig. 14. Geotextiles used in experiments

(β_{50}) که به ترتیب توسط نیروسنج و شیب سنج حاصل می‌شوند و طبق رابطه شماره ۱، زاویه اصطکاک استاندارد (δ_{stan}) محاسبه می‌شود.

۳-۲-۳ آزمایشات انجام شده

در این مطالعه حالت‌های مختلفی از ترکیب ژئوممبرین-ژئوتکستایل جهت ارزیابی اندرکنش سطح مشترک آنها مورد آزمایش قرار گرفته است (جدول ۳). شایان ذکر است جهت تامین شرایط تکرارپذیری، هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شده که در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شده است. شایان ذکر می‌باشد که مقادیر زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها بصورت میانگین حاصل از سه آزمایش تکرار شده برای هر حالت، توسط رابطه ۱ بدست آمده است.

۴- نتایج آزمایش و بحث و تحلیل

۴-۱- مقایسه نتایج اندرکنش ژئوممبرین ۱-ژئوتکستایل ۱ با دو دستگاه ایرانی و فرانسوی

شایان ذکر می‌باشد که این کار تحقیقاتی قسمتی از یک پروژه بین‌المللی است که با همکاری کشورهای فرانسه و ایتالیا بطور همزمان در حال انجام است. این تحقیقات جهت تکمیل استاندارد اروپایی دستگاه سطح شیب‌دار می‌باشد. بخش ۳-۱-۳ نشان داد که دستگاه

خاکی که بعنوان اعمال سربار قائم (۲ کیلو پاسکال) مورد استفاده قرار گرفته مخلوطی از شن و ماسه می‌باشد که درون جعبه بالایی جای می‌گیرد. خاک موجود صرفاً جهت اعمال سربار قائم بوده و تاثیری روی نتایج زاویه اصطکاک سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها نخواهد داشت. همچنین طبق توصیه استاندارد اروپا می‌توان به جای خاک از یک صفحه فولادی نیز جهت اعمال سربار قائم استفاده نمود. به دلیل فرار دانه‌های ریز خاک‌های ماسه‌ای و رسی از حد فاصل جعبه بالایی و پایینی استفاده از آنها توصیه نمی‌شود.

۳-۲-۳ مراحل انجام آزمایش

ابتدا تمام قسمت‌های دستگاه تمیز شده و ریل‌ها روغن کاری می‌گردند تا اصطکاک بین ریل و بلب‌رینگ به حداقل برسد. سپس یک لایه ژئوممبرین روی جعبه پایینی پهن شده و توسط گیره به آن متصل می‌گردد. یک لایه ژئوتکستایل روی لایه ژئوممبرین و زیر جعبه بالایی قرار گرفته و توسط گیره به آن متصل می‌گردد. جعبه بالایی تا ارتفاع ۰/۲۵ متر از خاک مخلوط شن و ماسه بدون اعمال تراکم و صرفاً جهت اعمال سربار قائم طبق توصیه استاندارد پر می‌شود. پس از شروع آزمایش و برخاست جعبه پایینی، جعبه بالایی در یک زاویه‌ای برابر با (β_{50}) ، جابجایی‌ایی برابر با ۰/۰۵ متر خواهد داشت. در نهایت با داشتن مقدار نیرو $Fr(\beta_{50})$ و زاویه

جدول ۳. آزمایش‌های انجام شده
Table 3. accomplished experiments

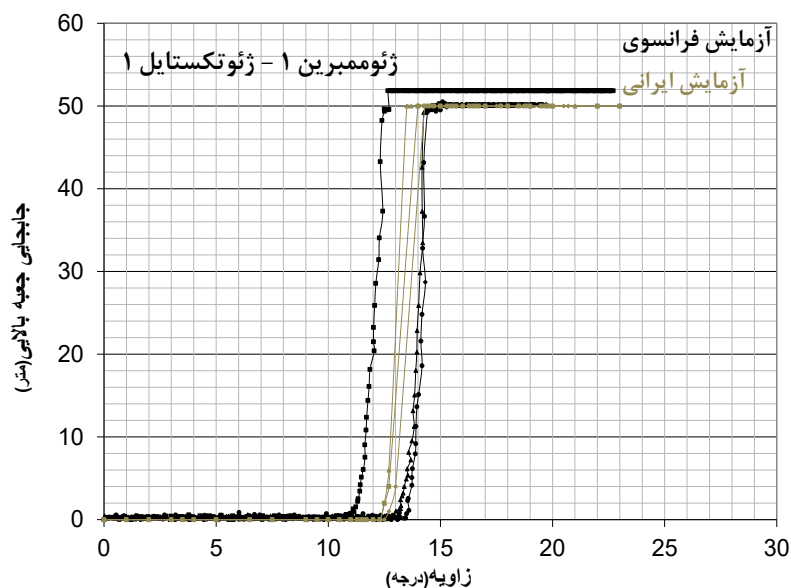
شماره آزمایش	ژئوممبرین روی جعبه پایین	ژئوتکستایل زیر جعبه بالا
۱	ژئوممبرین ۱	ژئوتکستایل ۱
۲	ژئوممبرین ۲	ژئوتکستایل ۱
۳	ژئوممبرین ۳	ژئوتکستایل ۱
۴	ژئوممبرین ۱	ژئوتکستایل ۲
۵	ژئوممبرین ۲	ژئوتکستایل ۲
۶	ژئوممبرین ۳	ژئوتکستایل ۲

جدول ۴. مشخصات دستگاه سطح شیبدار ایرانی و فرانسوی
Table 4. Characteristics of Iranian and French ramp testing machine

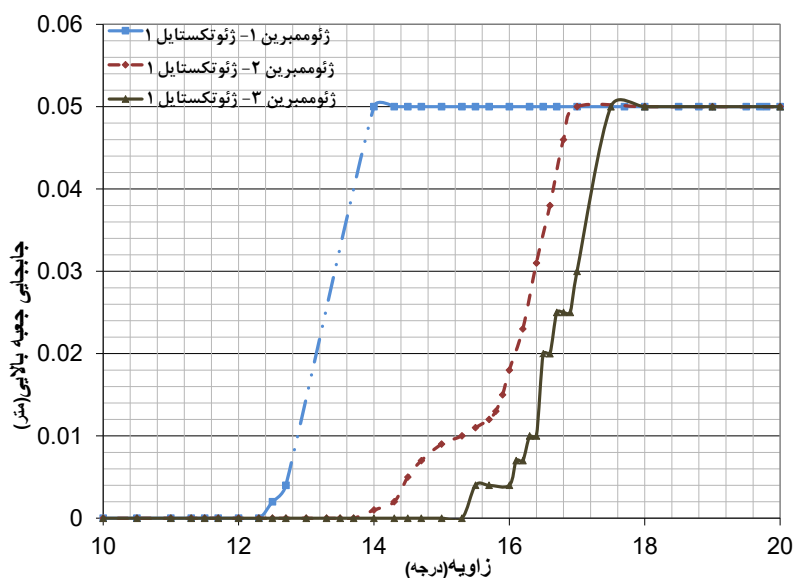
دستگاه سطح شیبدار فرانسوی	دستگاه سطح شیبدار ایرانی	
۱/۲	۱/۲	طول جعبه بالایی (m)
۰/۶	۰/۶	عرض جعبه بالایی (m)
۲	۲	طول جعبه پایینی (m)
۰/۸	۰/۸	عرض جعبه پایینی (m)
۱۰۰	۱۰۰	مقدار سربار قائم (kg)
۰/۵	۳	سرعت برخاست ($^{\circ}/\text{min}$)
بوسیله جک	بوسیله موتور و کابل	سیستم بالابر

۴-۲- زاویه اصطکاک انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته شده نتایج محققین نشان می‌دهد که بسته به نوع ژئوممبرین، لغزش جعبه بالایی به سه صورت انجام می‌گیرد که شکل شماره ۶ آن را نشان می‌دهد. بعد از انجام آزمایش‌های مختلف مشاهده گردید که با تغییر نوع ژئوممبرین، لغزش و حرکت جعبه بالایی نیز متفاوت خواهد بود بطوریکه برای ژئوممبرین سخت، لغزش ناگهانی و برای ژئوممبرین‌های انعطاف‌پذیر سایر لغزش‌ها اتفاق می‌افتد. با مشاهده شکل ۱۶ که تغییرات جابجایی جعبه بالایی نسبت به شیب برخاست را برای انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته شده را نمایش می‌دهند

سطح شیبدار ساخته شده در داخل کشور ضوابط کلی صحت سنجی آیین‌نامه اروپایی را رعایت نموده است. برای اطمینان از صحت نتایج آزمایشات انجام شده، در ابتدا به مقایسه با مدل مشابه ساخت کشور فرانسه پرداخته می‌شود. جدول ۴ مشخصات دستگاه‌های موجود در دو کشور ایران و فرانسه را نشان می‌دهد. شکل ۱۵ مقایسه تغییرات جابجایی جعبه بالایی نسبت به شیب برخاست برای ژئوممبرین ۱-ژئوتکستایل ۱ در کشورهای ایران و فرانسه را نشان می‌دهد. این شکل تطابق مورد قبولی بین نتایج حاصل از آزمایشات دو کشور را بیان می‌کند.



شکل ۱۵. مقایسه تغییرات جابجایی جعبه بالایی-شیب برای ژئوممبرین ۱-ژئوتکستایل ۱ در کشورهای ایران و فرانسه
 Fig. 15. Comparison changes of upper box sliding for Geomembrane 1-Geotextile 1 in Iran and France



شکل ۱۶. تغییرات جابجایی جعبه بالایی-شیب برای انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته شده
 Fig. 16. Upper box displacement for Geomembrane types with woven Geotextiles

ژئوتکستایل بافته شده (نوع ۱) دارای لغزش تدریجی از نوع پلکانی می‌باشد.

مقدار زاویه اصطکاک استاندارد برای سه حالت فوق توسط رابطه محاسبه و در جدول ۵ نمایش داده شده است.

این جدول نشان می‌دهد که مقدار زاویه اصطکاک استاندارد ثابت نبوده و بر اساس نوع ژئوممبرین متغیر می‌باشد. حالتی که ژئوممبرین

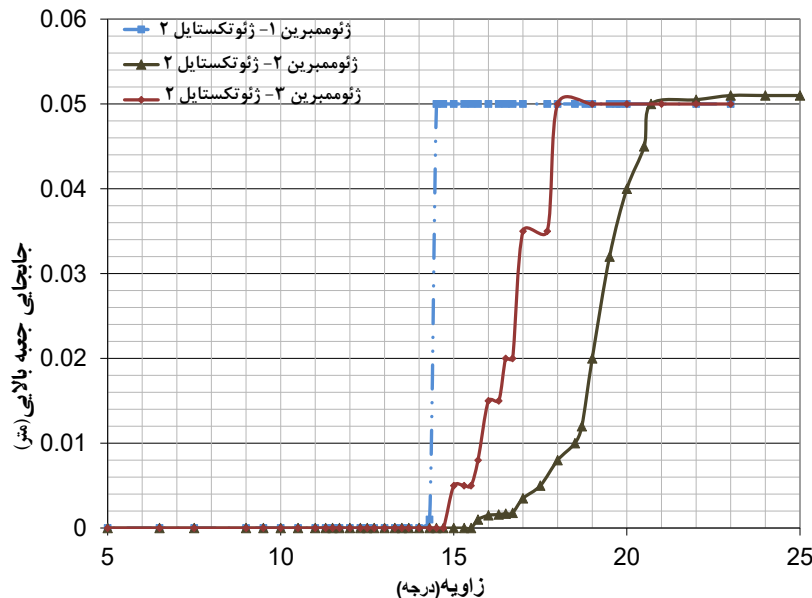
این موضوع تایید می‌شود.

این شکل نشان می‌دهد که جعبه بالایی برای حالت ژئوممبرین پلی اتیلن سخت (نوع ۱) با ژئوتکستایل بافته شده (نوع ۱) دارای لغزش ناگهانی، برای حالت ژئوممبرین پلی پروپیلن (نوع ۲) با ژئوتکستایل بافته شده (نوع ۱) دارای لغزش تدریجی بصورت تصاعدی و پیش رونده و برای حالت ژئوممبرین پلی وینیل کلراید (نوع ۳) با

جدول ۵. زاویه اصطکاک استاندارد انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته شده

Table 5. Standard friction angle of geomembrane types with woven geotextiles

شماره آزمایش	δ_{stan}
ژئوممبرین ۱- ژئوتکستایل ۱	18°
ژئوممبرین ۲- ژئوتکستایل ۱	$23^{\circ}-24/5^{\circ}$
ژئوممبرین ۳- ژئوتکستایل ۱	$24^{\circ}-26^{\circ}$



شکل ۱۷. تغییرات جابجایی جعبه بالایی-شیب برای انواع ژئوممبرین-ژئوتکستایل بافته نشده

Fig. 17. Upper box displacement for Geomembrane types with non-woven Geotextiles

ژئوتکستایل بافته نشده پرداخته می‌شود. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که جعبه بالایی برای حالت ژئوممبرین پلی اتیلن سخت (نوع ۱) با ژئوتکستایل بافته نشده (نوع ۲) دارای لغزش ناگهانی، برای حالت ژئوممبرین پلی پروپیلن (نوع ۲) با ژئوتکستایل بافته نشده (نوع ۲) دارای لغزش تدریجی بصورت تصاعدی و پیش رونده و برای حالت ژئوممبرین پلی وینیل کلراید (نوع ۳) با ژئوتکستایل بافته نشده (نوع ۲) دارای لغزش تدریجی از نوع پلکانی می‌باشد که نشان می‌دهد نوع ژئوممبرین در نحوه لغزش جعبه بالایی تاثیر گذار است.

مقدار زاویه اصطکاک استاندارد برای سه حالت فوق توسط رابطه ۱ محاسبه و در جدول ۶ نمایش داده شده است. این جدول نیز مانند جدول ۵ نشان می‌دهد که مقدار زاویه اصطکاک استاندارد ثابت نبوده و بر اساس نوع ژئوممبرین متغیر می‌باشد.

از نوع پلی اتیلن سخت (نوع ۱) می‌باشد زاویه اصطکاک استاندارد برابر ۱۸ درجه بوده که نسبت به سایر انواع ژئوممبرین برای سیستم عایق، انتخاب بحرانی‌تری می‌باشد. این بدین معنا می‌باشد که حالت ژئوممبرین نوع ۱ با ژئوتکستایل بافته شده در زاویه کمتری نسبت به سایر حالت‌های فوق به ناپایداری و لغزش دچار خواهد شد. از طرفی دیگر با تعویض ژئوممبرین از نوع پلی اتیلن سخت به پلی پروپیلن و پلی وینیل کلراید زاویه اصطکاک استاندارد بین آنها و لایه ژئوتکستایل افزایش می‌یابد.

۳-۴- زاویه اصطکاک انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته نشده

در این بخش نیز به تفسیر نمودارهای مربوط به تغییرات جابجایی جعبه بالایی نسبت به شیب برخاست برای انواع ژئوممبرین با

جعبه بالایی دارای لغزش تدریجی پیش رونده و با انتخاب ژئوممبرین پلی وینیل کلراید (نوع ۳) جعبه بالایی دارای لغزش تدریجی پلکانی خواهد بود. همچنین انتخاب نوع ژئوممبرین بر مقدار زاویه اصطکاک استاندارد سطح مشترک ژئوممبرین-ژئوتکستایل حاصل از روش فوق تاثیر خواهد گذاشت. بطوریکه با مقایسه حالت‌های ژئوممبرین پلی پروپیلن (نوع ۲) و ژئوممبرین پلی وینیل کلراید (نوع ۳) با ژئوممبرین پلی اتیلن سخت (نوع ۱) مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک استاندارد به ترتیب ۳۵ و ۴۴ درصد زمانی که در تماس با ژئوتکستایل بافته شده و به ترتیب ۲۷ و ۳۶ درصد زمانی که در تماس با ژئوتکستایل بافته نشده است افزایش یافته است. از طرف دیگر انتخاب نوع ژئوتکستایل نیز بر مقدار زاویه اصطکاک تاثیر گذار خواهد بود بطوریکه با گذر از ژئوتکستایل بافته نشده به بافته شده مقدار زاویه اصطکاک استاندارد برای حالات ژئوممبرین پلی اتیلن سخت (نوع ۱)، ژئوممبرین پلی پروپیلن (نوع ۲) و ژئوممبرین پلی وینیل کلراید (نوع ۳) به ترتیب ۲۲، ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به مطالب فوق انتخاب ژئوممبرین نوع ۳ یعنی پلی وینیل کلراید با ژئوتکستایل بافته نشده انتخاب معقول تری نسبت به تمام حالت‌های فوق جهت اجرای پوشش و عایق شیروانی‌های خاکی و محل دفن زباله می‌باشد.

۶- تشکر و قدردانی

این تیم تحقیقاتی بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقای دکتر لوران بریانسون استاد دانشگاه اینسای شهر لیون کشور فرانسه^۱ به سبب کمک‌های فراوان در ساخت دستگاه آزمایش و ارسال انواع ژئوسینتتیک‌ها و قرار گرفتن به عنوان مشاور طرح اعلام می‌نماید.

فهرست علائم

مقدار نیروی لازم جهت نگهداری جعبه خالی بالایی،
Kg $Fr(\beta 50)$

ژئوممبرین GMB

ژئوتکستایل GTX

U جابجایی جعبه بالایی، m

u_{lim} جابجایی جعبه بالایی به ۰/۰۵ متر، m

W_s وزن خاک درون جعبه بالایی، Kg

جدول ۶. مقایسه زاویه اصطکاک استاندارد انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته نشده

Table 6. Standard friction angle of geomembrane types with non-woven geotextiles

شماره آزمایش	δ_{stan}
ژئوممبرین ۱-ژئوتکستایل ۲	۲۲°
ژئوممبرین ۲-ژئوتکستایل ۲	۲۶°-۲۸°
ژئوممبرین ۳-ژئوتکستایل ۲	۳۰°

۴-۴ اثر ژئوتکستایل بافته شده و نشده بر روی زاویه اصطکاک استاندارد

با مشاهده و مقایسه جداول ۵ و ۶ می‌توان به این امر پی برد که نوع ژئوتکستایل از نظر بافت شده و نشده نیز بر مقدار زاویه اصطکاک استاندارد تاثیر گذار خواهد بود. زاویه اصطکاک بین انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته نشده بیشتر از انواع ژئوممبرین با ژئوتکستایل بافته شده می‌باشد. همچنین با مقایسه حالت‌های ژئوممبرین نوع ۱، ۲ و ۳ با این دو نوع ژئوتکستایل مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک استاندارد دارای اختلافاتی به ترتیب ۴ و ۲ الی ۴ و ۴ الی ۶ درجه‌ای به ترتیب می‌باشد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می‌توان استنباط نمود که تغییر نوع ژئوتکستایل از بافته شده به بافته نشده باعث می‌شود تا منحنی مربوط به نوع لغزش جعبه بالایی بهتر نمایان شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله که قسمتی از یک پروژه بین المللی است به بررسی اندرکنش سطح مشترک ژئوسینتتیک‌ها، معرفی روش تعیین زاویه اصطکاک استاندارد سطح مشترک آنها، معرفی دستگاه آزمایش سطح شیبدار، طراحی و ساخت آن در داخل کشور پرداخته شد. در ادامه آزمایش‌های مختلفی با حالت‌های مختلف انواع ژئوممبرین-ژئوتکستایل با استفاده از دستگاه سطح شیبدار بوسیله روش "جابجایی استاندارد" تحت تنش قائم کم انجام گردید. با بررسی نمودارهای مختلف مشاهده گردید که نوع ژئوممبرین در نوع لغزش جعبه بالایی تاثیر مستقیم خواهد داشت بطوریکه با انتخاب ژئوممبرین پلی اتیلن سخت (نوع ۱) جعبه بالایی دارای لغزش ناگهانی، ژئوممبرین پلی پروپیلن (نوع ۲)

1 Briançon Laurent - Assistant Professor – GEOMAS, INSA Lyon, France

and shear box tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 16(4) (1998) 207-219.

- [11] Y. Wasti, Z.B. Özdüzgün, Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 19(1) (2001) 45-57.
- [12] H. Ling, C. Burke, Y. Mohri, K. Matsushima, Shear strength parameters of soil-geosynthetic interfaces under low confining pressure using a tilting table, *Geosynthetics International*, 9(4) (2002) 373-380.
- [13] S. Lalarakotoson, P. Villard, J.-P. Gourc, Shear strength characterization of geosynthetic interfaces on inclined planes, *Geotechnical testing journal*, 22(4) (1999) 284-291.
- [14] E.M. Palmeira, Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5) (2009) 368-390.
- [15] E. Palmeira, N. Lima Jr, L. Mello, Interaction between soils and geosynthetic layers in large-scale ramp tests, *Geosynthetics international*, 9(2) (2002) 149-187.
- [16] H.N. Pitanga, J.-P. Gourc, O.M. Vilar, Interface shear strength of geosynthetics: evaluation and analysis of inclined plane tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6) (2009) 435-446.
- [17] R. Reyes Ramirez, J. Gourc, Use of the inclined plane test in measuring geosynthetic interface friction relationship, *Geosynthetics International*, 10(5) (2003) 165-175.
- [18] L. Briançon, H. Girard, D. Poulain, Slope stability of lining systems—experimental modeling of friction at geosynthetic interfaces, *Geotextiles and geomembranes*, 20(3) (2002) 147-172.
- [19] G. Stoltz, R. Gallo, D. Poulain, N. Touze-Foltz, Testing procedure with an inclined plane device to assess the residual friction characteristics at geosynthetics interfaces, in, 2012.
- [20] L. Briançon, H. Girard, J. Gourc, A new procedure for measuring geosynthetic friction with an inclined plane, *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5) (2012) 472-482.

β زاویه جعبه پایینی نسبت به افق، درجه

β_{50} زاویه جعبه پایینی نسبت به افق در جابجایی ای برابر ۰/۰۵ متر، درجه

δ_{stan} زاویه اصطکاک استاندارد، درجه

مراجع

- [1] R.M. Koerner, T.-Y. Soong, Stability assessment of ten large landfill failures, in: *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics*, 2000, pp. 1-38.
- [2] W. Wu, X. Wang, F. Aschauer, Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(4) (2008) 363-370.
- [3] G.E. Blight, Failures during construction of a landfill lining: a case analysis, *Waste management & research*, 25(4) (2007) 327-333.
- [4] L. Carbone, Interface behaviour of geosynthetics in landfill cover systems under static and seismic loading conditions, Grenoble, 2014.
- [5] L. Carbone, J. Gourc, P. Carrubba, P. Pavanello, N. Moraci, Dry friction behaviour of a geosynthetic interface using inclined plane and shaking table tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4) (2015) 293-306.
- [6] E. ISO, Geosynthetics-determination of Friction Characteristics-Part 1: Direct Shear Test, (2005).
- [7] E. ISO, 12957-2: Geosynthetics-determination of friction characteristics, Part 2: Inclined plane test, European committee for standardization, Brussels, (2005).
- [8] H. Girard, S. Fischer, E. Alonso, Problems of friction posed by the use of geomembranes on dam slopes—examples and measurements, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(2) (1990) 129-143.
- [9] M. Koutsourais, C. Sprague, R. Pucetas, Interfacial friction study of cap and liner components for landfill design, *Geotextiles and Geomembranes*, 10(5-6) (1991) 531-548.
- [10] M. Izgin, Y. Wasti, Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board

- Parameters and conditions affecting friction angles in geosynthetic interfaces, 6th European Geosynthetics Congress, (2016) 563-573.
- [23] J. Gourc, P. Delmas, The behaviour of " alive" earthworks with geosynthetics after several decades, (1970).
- [21] L. Carbone, L. Briançon, J. Gourc, N. Moraci, P. Carrubba, Geosynthetic interface friction using Force Procedure at the Tilting Plane, in: 5th European Conference on Geosynthetics-Eurogeo, 2012, pp. 93-98.
- [22] P.C. P. Pavanello, N. Moraci, P. Pezzano & M. Miuzzi,

HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Shaykhi, S.H. Lajevardi, Design and construction of inclined plane device for modeling the interface interaction of geo-synthetic layers, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1261-1276.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14276.5611](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14276.5611)



