

# بررسی عملکرد سیستم چندلایه‌ی پوشش عایق شیروانی لندفیل تحت بارگذاری هیدرواستاتیکی خارجی

مجتبی جعفری کرمانی پور\* (دانشجوی دکتری)

سید مرتضی مرندی (استاد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۱)  
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۸۶-۷۹، (پادداشت فنی)

اضافه شدن ماسک و دستکش آلوده به زباله‌های شهری و مدیریت غیرعلمی پسماند، خطر افزایش همه‌گیری کرونا را به همراه دارد. علاوه بر این، آلودگی محیط زیست و آب‌های زیرزمینی در کشورهای در حال توسعه، به طور قابل توجهی نیاز به استفاده از محل‌های دفن علمی پسماند را برای کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های همه‌گیر افزایش داده است. آنالیز عددی به طور گسترده‌ی در طول سه دهه‌ی گذشته برای ارزیابی پایداری و یکپارچگی سیستم‌های پوشش دفن پسماند استفاده شده است. در نوشتار حاضر، وجود جریان آب در چهارکد ارتفاعی در پشت شیب جداره‌ی لندفیل بررسی شده است. برای اعتبارسنجی مدل سازی، نتایج با اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق در محل ارزیابی و مدل المان محدود سه‌بعدی (FE) توسط نرم‌افزار آباکوس اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهند که یک سیستم پوشش با سطح آب تا ۷۵٪ ارتفاع شیب جانبی، ایمنی کافی در برابر خرابی دارد؛ اما در هنگام پُر شدن تا ارتفاع کامل شیب، ژئوممبرین گسیخته می‌شود.

واژگان کلیدی: لندفیل، سیستم پوشش جداره، ژئوسنتتیک، مدل‌سازی عددی، فشار هیدرواستاتیکی.

marandi@uk.ac.ir  
mjkpl365@gmail.com

## ۱. مقدمه

حال، مطالعات موجود به ندرت عملکرد ژئوسنتتیک‌ها را در برابر فشار هیدرولیکی خارجی ناشی از حضور آب‌های سطحی و سیلاب در نظر گرفته است. لذا پایداری و دوام ژئوسنتتیک‌ها تحت تأثیر شرایط سطح آب متغیر، هنوز مشخص نشده است. دیکسون<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، پایداری و دوام لاینر ژئوسنتتیک را با تمرکز بر مشکلات مهندسی رایج حین ساخت لندفیل مطالعه کرده‌اند.<sup>[۱]</sup> مطالعه‌ی مذکور، شامل: ارزیابی در حین ساخت، اینترفیس کرنش نرم‌شوندگی، خرابی پیش‌رونده، تنش‌های کششی در مصالح، نمایش خصوصیات و رفتار پسماند، پیری و تخریب زیستی پسماند است. بر این اساس، هدف از مطالعه‌ی گزارش شده، بررسی اینترفیس بین مصالح نصب شده در شیب‌های محل دفن پسماند و رفتار کرنش نرم‌شوندگی بوده است. نتایج پژوهش اخیر تأیید کرده است که مقاومت برشی اینترفیس پس از رسیدن به مقدار بیشینه‌ی خود، با تغییر شکل زیاد به مقدار تنش پسماند<sup>۳</sup> رسیده است.

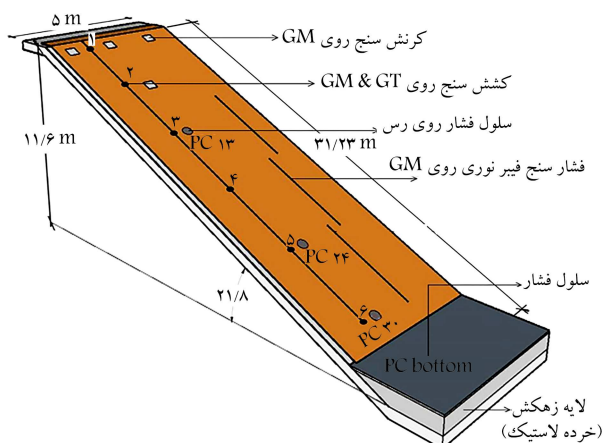
تاکنون، برای حل تعدادی از مسائل پیچیده‌ی مهندسی ژئوتکنیک جهت تعیین عملکرد اندرکنش مصالح ژئوسنتتیک با یکدیگر و لایه‌های خاک از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار آباکوس<sup>۴</sup> استفاده شده است.<sup>[۱۱-۱۵]</sup> مکانیسم اندرکنش یک قاب ساختمانی<sup>۱۰</sup> طبقه که بر روی پایه‌ی شمع‌های معمولی تحت گسیختگی گسل امتداد لغز با زاویه‌ی شیب ۹۰ درجه قرار دارد، از طریق شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود

مهم‌ترین مشکل در محل‌های دفن زباله، تخلیه‌ی کنترل نشده‌ی شیرابه‌هاست، که باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. به عنوان یک قاعده‌ی کلی، شیرابه بسته به عوامل متعددی، چون: زمان سپری شده، دما، عمق محل دفن، هیدرولوژی محل، ترکیب پسماند و همچنین میزان رطوبت محیط، ویژگی‌های متفاوتی در مناطق مختلف دفن زباله دارد.<sup>[۲]</sup> آنالیز پایداری شیب جداره‌های لندفیل، یک موضوع زیست‌محیطی است که با همکاری با یک زمین‌شناس قابل حل است.<sup>[۳]</sup> پارامترهای برشی مصالح سیستم پوش و اینترفیس بین آن‌ها به عنوان عوامل اصلی مورد نیاز برای تحلیل پایداری شیب محل دفن پسماند در نظر گرفته می‌شود.<sup>[۵-۸]</sup> از ژئوتکتایل و ژئوممبرین به عنوان عایقی در برابر نشت از کف و جداره‌ی محل‌های دفن زباله استفاده می‌شود. کاربردهای متعدد و نصب ساده‌ی آن‌ها، طراحان و پیمانکاران را به استفاده از ژئوسنتتیک ترغیب می‌کند. نتایج عملکرد در محل ژئوسنتتیک‌ها و رفتار آن‌ها در مراحل ساخت لندفیل<sup>۱</sup> با استفاده از ابزار دقیق بررسی شده است.<sup>[۹]</sup> اندرکنش بین لایه‌های ژئوسنتتیک و مقادیر رایج استفاده شده‌ی آن در لندفیل از طریق داده‌های ۷۶ آزمایش ارائه شده است.<sup>[۱۰]</sup> با این

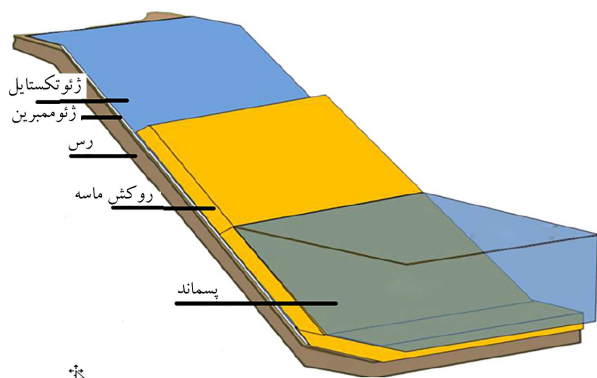
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۳/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۵/۵/۱۴۰۱، پذیرش ۳۰/۵/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60452.3103



شکل ۱. هندسه و محل قرارگیری ابزار دقیق.



شکل ۲. طرح شماتیک سیستم پوشش چندلایه‌ای جداره‌ی لندفیل.

لایه‌ی دوم ماسه ریخته شد و دوباره، پسماند، لایه‌ی ماسه را پوشاند. در نهایت، لایه‌ی سوم ماسه و بعد پسماند ریخته شد تا کل شیب جداره‌ی لندفیل پر شود.

### ۳. ارزیابی روند مدل‌سازی

از مطالعات زامارا و همکارانش (۲۰۱۲) و مدل‌سازی عددی آن‌ها در نرم‌افزار (۲۰۱۴) FLAC جهت ارزیابی نتایج مدل‌سازی عددی حاضر استفاده شده است.<sup>[۱۸]</sup> در مدل‌سازی مرجع از سه داده‌ی ورودی جهت مدل‌سازی استفاده شده است. در حالت اول، از مقادیر بیشینه‌ی خصوصیات مقاومتی مصالح استفاده شده است؛ در نتیجه، خروجی‌ها کمترین تنش و کرنش و جابه‌جایی‌ها را نشان داده‌اند. در حالت دوم در نرم‌افزار برای مدل کردن تغییر شکل‌های زیاد ایجاد شده در محل در اثر تنش‌های حرارتی ناشی از تابش خورشید، پارامترهای مقاومتی مصالح کاهش داده شد. (جابه‌جایی‌ها و تنش‌های زیاد در قسمت بالایی شیب لندفیل در لایه‌های ژئوستنتیک‌ی به علت قرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض نور خورشید بود). در حالت سوم، با اعمال مدل رفتاری کرنش نرم‌شوندگی برای اندرکنش مصالح، رفتار مصالح در شرایط نرمال (بدون در نظر گرفتن تنش‌های ناشی از اثر نور خورشید) مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی حاضر نیز که در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است، از مدل رفتاری کرنش نرم‌شوندگی اندرکنش مصالح استفاده و نتایج آن با حالت سوم مدل‌سازی مرجع مقایسه شده است.

سه‌بعدی مطالعه شده است.<sup>[۱۶]</sup> لیانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، یک المان کاربری را برای تحلیل دینامیکی سه‌بعدی محیط متخلخل اشباع شده از سیال براساس معادلات U-U ایجاد کرده‌اند.<sup>[۱۷]</sup>

در نوشتار حاضر، ابتدا نتایج یک مدل وابسته به زمان در نرم‌افزار آباکوس، با نتایج اندازه‌گیری‌های ابزار دقیق قرار گرفته بر روی لایه‌های سیستم پوشش، در محل لندفیل میلگیت<sup>۶</sup> در انگلستان مقایسه شده است. سیستم پوشش مطالعه شده از یک لایه رس فشرده که توسط ژئوممبرین، ژئوتکتایل و یک لایه‌ی ماسه پوشیده شده بود، تشکیل شده است. پروژه‌ی ساخت لندفیل موردنظر در ماه ژوئن ۲۰۰۹ آغاز شد و مانتورینگ آن تا ۳ سال بعد از آن ادامه داشت. ابزار دقیق نصب شده در سایت، شامل: سلول‌های فشار (PC)، اکسنسیومتر (Ext)، فشارسنج فیبر نوری (FO)، کرنش‌سنج (DSG) Demec و دماسنج اضافی بوده است. مدل‌سازی حاضر، مراحل ساخت سیستم پوشش و بارگذاری جداره‌ی لندفیل مطالعه شده را در بر دارد. برای درک بهتر، جزئیات بیشتر از مقادیر ورودی و روند طراحی در ادامه توضیح داده شده است. به‌طور کلی، هدف از مطالعه‌ی حاضر، اطمینان از عملکرد صحیح سیستم پوشش شیب جانبی لندفیل در مناطق سیل‌خیز، مانند مناطق استوایی و ساحلی است. در ادامه، پیشنهاد نصب زهکشی مناسب در مناطق در معرض خطر حضور آب با ارتفاع بیش از ۷۵٪ ارتفاع جداره‌ی لندفیل داده شده است.

### ۲. مصالح و هندسه

در بخش حاضر، فرایند مدل‌سازی، لندفیل میلگیت در شرق یورکشایر انگلستان به‌عنوان مدل واقعی برای راستی‌آزمایی نتایج خروجی نرم‌افزار انتخاب شده است. جزئیات آزمایش در محل، شامل ابعاد و موقعیت ابزار در شیب در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

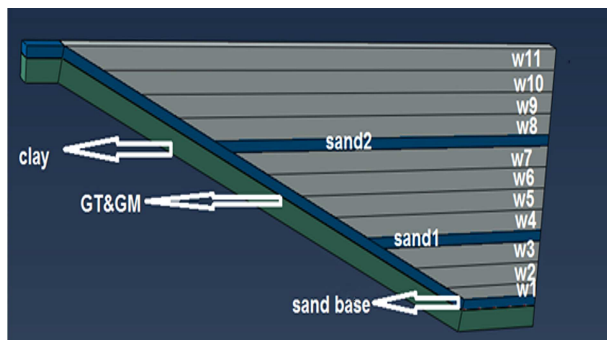
سیستم پوشش استفاده شده در مدل، شامل رول‌های ژئوممبرین<sup>۸</sup> HDPE با عرض ۵ متر و ضخامت ۲ میلی‌متر با چگالی ۹۴۹/۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب بر روی خاک رس فشرده با ضخامت ۱ متر و بیشینه‌ی نفوذپذیری  $1 \times 10^{-9}$  بوده است. برای پوشش لایه‌های ژئوممبرین از رول‌های ژئوتکتایل<sup>۹</sup> سوزنی بافته نشده با عرض ۵ متر دارای: مقاومت ۴۵ (KN)، ضخامت ۷/۸ (mm) و وزن (gr/m) ۱۴۰۰ استفاده شده است. ژئوممبرین و ژئوتکتایل به ترتیب دارای مدول یانگ  $E = 3350 \text{ MPa}$  و  $E = 120 \text{ MPa}$  بوده‌اند. در شکل ۲، سیستم پوشش چندلایه‌ی شماتیک شیب جانبی محل دفن پسماند مشاهده می‌شود. ژئوممبرین (GM) و ژئوتکتایل (GT) در بالای ترانشه در قلاب U شکل ۶۰۰ میلی‌متر تا ۶۰۰ میلی‌متر مهار شده‌اند (زامارا<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۲)).<sup>[۱۹]</sup> قبل از ریختن پسماند و در حین ساخت لندفیل، یک روکش ماسه‌ی به ضخامت ۵۰ سانتی‌متر روی ژئوتکتایل قرار گرفته است. روکش ماسه‌ی، امکان اندازه‌گیری پاسخ لایه‌های ژئوستنتیک (زمین پارچه‌ها<sup>۱۱</sup>) را با توجه به بارهای اعمالی مختلف فراهم می‌کند. در واقع روکش ماسه‌ی به دلیل ریزدانه بودن، نفوذپذیری نسبی کم، و حساسیت آن به پُرشدن حفره‌ها نمی‌تواند به‌عنوان زهکش به‌خوبی عمل کند. در سیستم‌های عایق جداره‌ی لندفیل از مصالح دانه‌ی بی و عموماً شنی در کف و جداره‌ی آن برای زهکشی شیاره استفاده می‌شود. با این حال در لندفیل مطالعه شده، به دلیل در دسترس نبودن مصالح مناسب از ماسه استفاده شده است. قبل از ریختن پسماند، لایه‌ی اول ماسه در طول شیب تا ارتفاع ۱۰ متر ریخته شده است. پس از پوشاندن لایه‌ی اول ماسه با پسماند،

جدول ۱. خصوصیات مصالح استفاده شده.

مصالح	مدل	وزن مخصوص	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	مدول یانگ (MPa)	نسبت بواسون
پسماند	موهر - کلمب	۱	۲۵	۵	۰/۵	۰/۳
لایه ماسه	موهر - کلمب	۱/۷	۳۵	۰	۷۰	۰/۴
پوشش رسی	موهر - کلمب	۱/۷	۲۳	۵	۱۵۰	۰/۳

جدول ۲. خصوصیات اینترفیس مصالح استفاده شده در نرم افزار.

اینترفیس	بیشینه/باقی مانده		سختی (kPa/m)	
	$\delta$ (°)	$\alpha$ (kPa)	نرمال	برشی
پسماند/ماسه	۲۰	۵	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰
ماسه/ژئوتکستایل				
حالت خشک	۲۹, ۹/۲۹, ۶	۶, ۳/۱, ۸	۱۰۰۰۰	۴۵۰۰
حالت تر	۲۹, ۶/۲۹, ۹	۳, ۲/۱, ۳	-	-
ژئوتکستایل/ژئوممبرین				
حالت خشک	۱۹, ۹/۱۳, ۳	۲, ۳/۱, ۴	۱۰۰۰۰	۴۵۰۰
حالت تر	۲۰, ۸/۱۴, ۷	۴/۲, ۹	-	-
ژئوممبرین/رس				
حالت زهکشی شده	۲۲/۲۲	۸/۸	۱۰۰۰۰	۵۵۰۰
حالت زهکشی نشده	۳۱, ۱/۲۵, ۱	۷, ۶/۳, ۲	-	-



شکل ۳. مراحل ساخت و پُر شدن لندفیل (پسماند=w).

### ۱.۳. نرم افزار رایانه‌ی اجزاء محدود

از روش دینامیکی ایمپلیسیت<sup>۱۲</sup> اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس برای مدل سازی و پیش بینی رفتار اجزاء پوشش جداره‌ی لندفیل استفاده شده است. از نرم افزار آباکوس در تعدادی از مطالعات پیشین در حوزه‌ی مهندسی ژئوتکنیک طراحی لندفیل استفاده شده است.<sup>[۱۹، ۲۰]</sup> مطالعات صورت گرفته تاکنون نشان داده است که از نرم افزار آباکوس می توان برای مدل سازی دامنه‌ی وسیعی از مواد، مدل سازی ساخت مرحله‌ی، اندرکنش با خصوصیت کرنش نرم شونده‌ی مصالح گوناگون در سیستم پوشش، و تخمین کرنش مصالح ژئوستاتیکی به خوبی بهره برد.

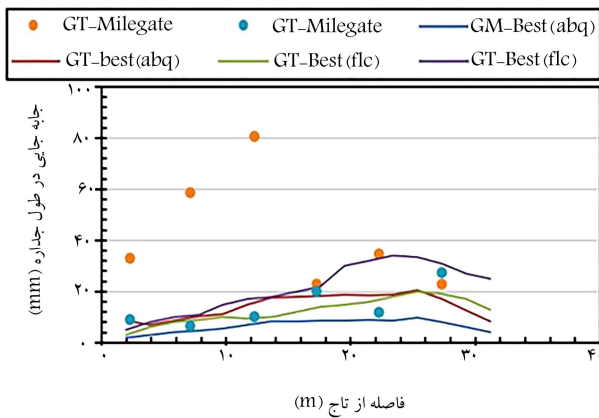
### ۲.۳. روند مدل سازی

دو پارامتر مهم در مدل سازی انجام شده، شامل ساخت مرحله به مرحله‌ی سلول های لندفیل و مراحل پر کردن سلول ها با پسماند بوده است. ساخت و بارگذاری مدل لندفیل در ۱۷ مرحله انجام و به هر مرحله ۱۰ ثانیه اختصاص داده شد. در واقع ثانیه‌ی ۱۷۰ مربوط به آخرین مرحله یعنی اضافه شدن فشار هیدرواستاتیکی است. لندفیل مذکور بر روی یک لایه رس متراکم به ضخامت ۱ متر در کف و جداره‌ی آن اجرا شده است. لایه‌های ماسه در سه مرحله در طول شیب و بین پسماندها با ضخامت ۵۰ سانتی متر ریخته شده‌اند. تقریباً روی هر لایه ماسه، ۴ لایه‌ی پسماند به ارتفاع ۱ متر ریخته شده است. در نهایت، مدل مانند شکل ۳، شامل ۱۶ لایه (لایه‌ی اول رس، لایه‌ی دوم ماسه، لایه‌های سوم تا ششم پسماند، لایه‌ی هفتم ماسه، لایه‌های هشتم تا یازدهم پسماند، لایه‌ی دوازدهم ماسه، لایه‌های سیزدهم تا شانزدهم پسماند) بوده است.<sup>[۱۸]</sup>

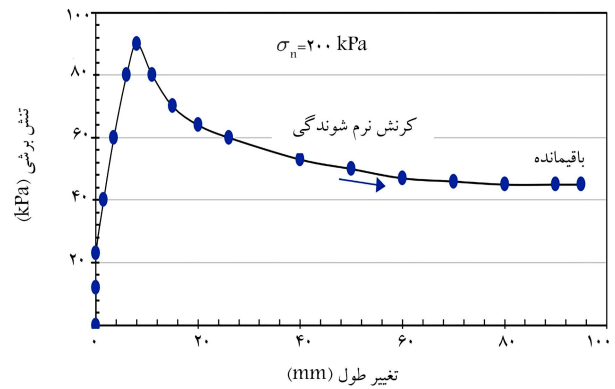
### ۳.۳. مدل سازی سیستم پوشش چندلایه

سیستم پوشش ژئوستاتیکی به صورت یک سیستم چندلایه‌ی قرار گرفته بر بستر صلب بدون جابه‌جایی فرض شده است. در نتیجه، لایه‌ی رس متراکم به عنوان یک لایه‌ی پایدار و بدون جابه‌جایی مدل شده است. لایه‌های ژئوستاتیک نیز به عنوان یک المان تیر که در بالای ترانشه مهار شده، مدل شده‌اند. سه اندرکنش بین المان‌های سیستم پوشش، شامل: الف) رس/ژئوممبرین، ب) ژئوممبرین/ژئوتکستایل، ج) ژئوتکستایل/ماسه در نظر گرفته شده است. از مقادیر زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی پسماند برای اندرکنش بین پسماند و ماسه نیز استفاده شده است. برای مدل سازی رفتار اندرکنش خاک و پسماند نیز از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده است که به همراه خصوصیات مصالح در جدول ۱ ارائه شده است.

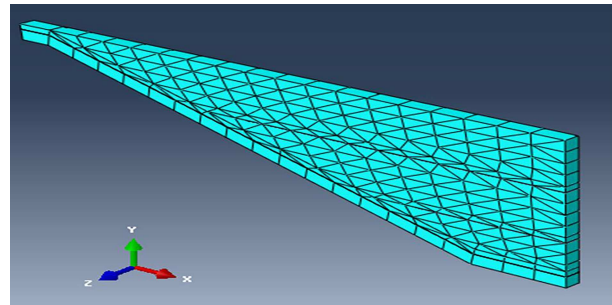
مقادیر اندرکنش بین مصالح نیز بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی فومز و همکارانش (۲۰۰۸) در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر  $\alpha$  و  $\delta$ ، ذکر شده در جدول ۲، مقادیر چسبندگی و اصطکاک اندرکنش بین دو مصالح در نقاط بیشینه و کمینه



شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج جابه‌جایی‌های به‌دست آمده از ابزار دقیق و مدل‌سازی پس از پرشدن لندفیل.



شکل ۴. مثالی از آزمون برش مستقیم.



شکل ۵. مثالی از آزمایش برش مستقیم.

در نمودار تنش برشی - جابه‌جایی آزمون برش مستقیم هستند.<sup>[۲۰]</sup> در شکل ۴، مثالی از نمودار تنش برشی - جابه‌جایی آزمون برش مستقیم برای تعیین مقادیر اینترفیس بین مصالح پوشش مشاهده می‌شود.<sup>[۱۰]</sup>

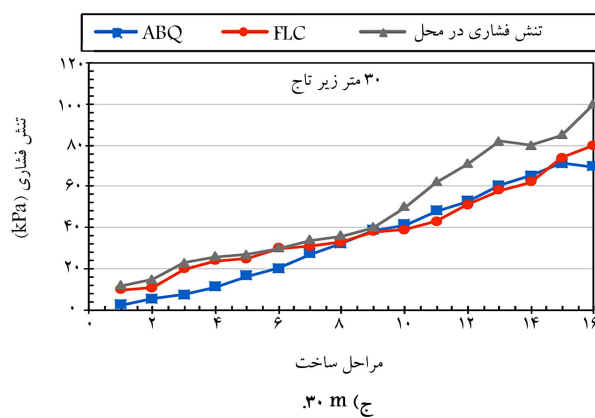
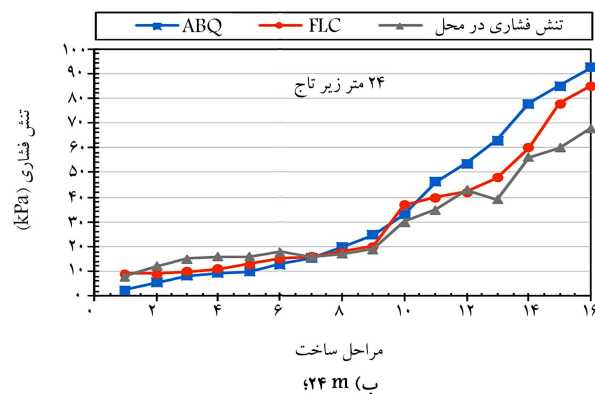
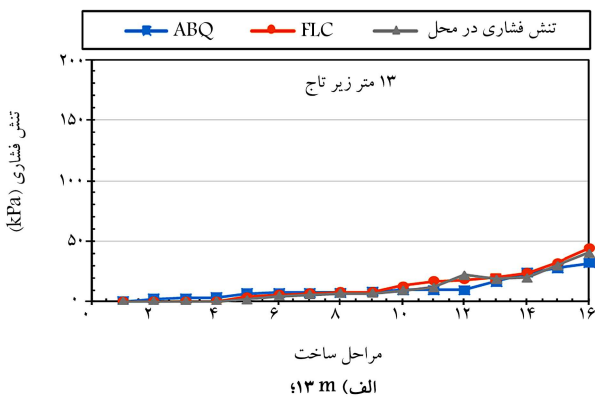
#### ۴.۳. مش اجزاء محدود مدل

شبکه‌ی استفاده شده در مدل‌سازی از نوع شش‌وجهی مکعبی و گوه‌یی بوده است. در مدل‌سازی اخیر به دلیل تعداد زیاد لوپ‌ها و واگرا شدن نتایج از شبکه با اندازه‌ی ۳۰ سانتی‌متر بر روی لایه‌های ژئوسنتتیک و در سایر المان‌ها از شبکه‌های ۱ متری استفاده شده است. در شکل ۵، شبکه‌بندی جداره‌ی لندفیل مشاهده می‌شود.

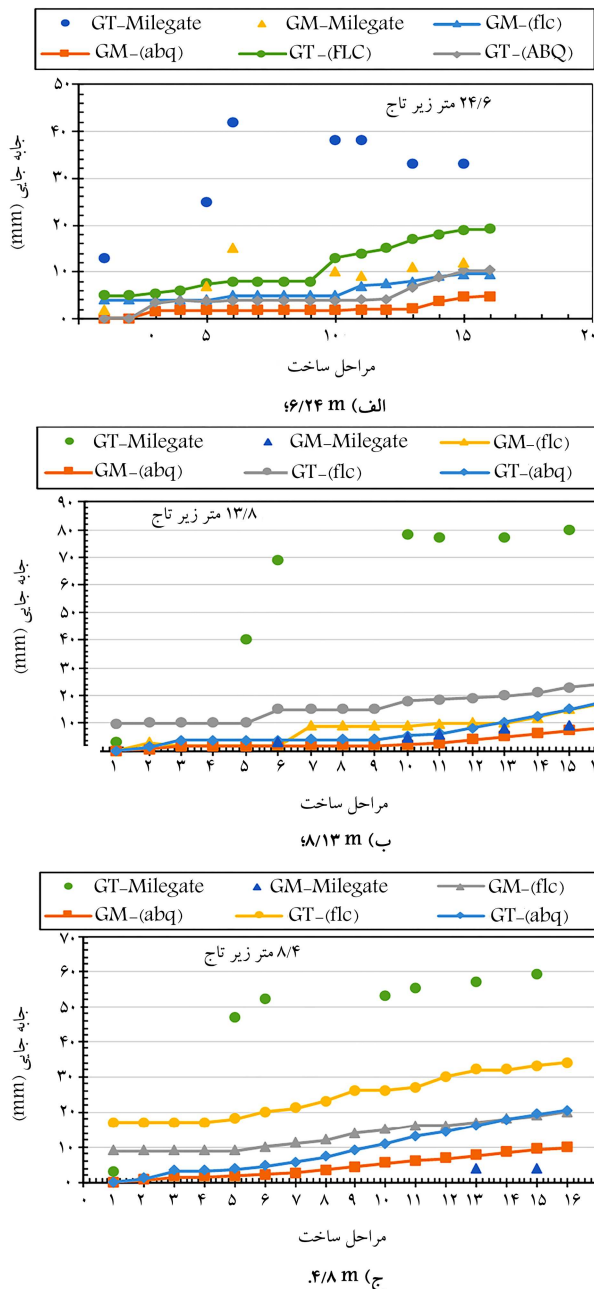
#### ۵.۳. بررسی راستی آزمایشی نتایج

مقادیر تنش فشاری وارد شده بر روی سیستم پوشش در حدود مقادیر اندازه‌گیری شده از سلول‌های فشار نصب شده در لندفیل بوده‌اند. بنابراین تنش‌های وارد بر سیستم پوشش را می‌توان با مدل‌سازی عددی محاسبه کرد. در مدل اخیر، زمان مستقیماً در نظر گرفته نشده است، اما مراحل ساخت و بارگذاری پسماند به عنوان عامل زمانی در نظر گرفته شده است.

جامع‌ترین و منطقی‌ترین نتایج توسط اکستنسئومترهای نصب شده بر روی GT و GM به‌دست آمده است. لذا ابتدا در مدل‌سازی عددی با سعی و خطا، نتایج ثبت شده توسط کشش‌سنج‌ها بازتولید شده است.<sup>[۱۸]</sup> در شکل ۶، نیز مقادیر جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط کشش‌سنج‌ها روی GT و GM در طول شیب در پایان مراحل ساخت با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار مشاهده می‌شود. در شکل ۷، نمودارهای تنش فشاری ثبت شده توسط سلول‌های فشاری و نتایج به‌دست‌آمده از دو مدل‌سازی، در طی مراحل ساخت مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷الف مشهود است، تنش‌های فشاری در یک سوم



شکل ۷. تنش‌های قائم فشاری.



شکل ۸. جابه‌جایی در لایه‌های ژئوممبرین و ژئوتکتایل در ارتفاع.

#### ۴. مدل‌سازی فشار هیدرواستاتیکی

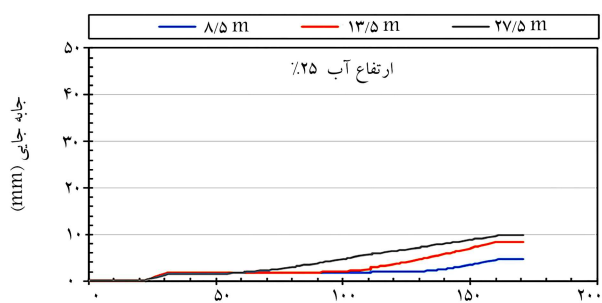
جهت تعیین اثر فشار هیدرواستاتیکی پشت جداره‌ی لندفیل، فشار هیدرواستاتیکی در ۴ تراز ارتفاعی (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ارتفاع جدار) اعمال شده است. در فرض مسئله به این نکته توجه شده است که مدل، یک سیستم لایه‌ی چند ۱۰ سانتی‌متری است و بحث ناپایداری خارجی در پژوهش حاضر مطرح نیست. المان مهم از نظر پایداری داخلی، لایه‌ی ژئوممبرین است که نقش آب‌بند را اجرا می‌کند و لایه‌ی ژئوتکتایل جهت محافظت از لایه‌ی ژئوممبرین استفاده شده است. مدل سه‌بعدی جداره‌ی لندفیل و فشار هیدرواستاتیکی اعمالی به مدل در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

بالایی شیب در طی مراحل ساخت، روند افزایشی داشته و فشار وارده به لایه‌ی رسی بعد از قرارگیری پسماند و اعمال وزن آن در مراحل چهارم به بعد افزایش یافته است، تا به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. مقادیر به‌دست آمده بیانگر همگرایی خوبی بین نتایج نرم‌افزاری و ابرار دقیق است. در ارتفاع ۲۴ متری از زیر تاج و در واقع در یک سوم میانی شیب با توجه به قرارگیری لایه‌های پوشش و پسماند در مراحل اولیه، تنش‌ها نسبت به ارتفاع ۱۳ متری سریع‌تر رشد داشته‌اند و متوسط مقادیر آن‌ها در مراحل مختلف ساخت اختلافی در حدود ۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین به دلیل قرارگرفتن لایه‌های بیشتری از پسماند در ارتفاع ۲۴ متری از شیب نسبت به ارتفاع ۱۳ متری، بخش کنونی تنش‌های فشاری بیشتری تجربه کرده است. در یک سوم انتهایی مقطع شیب شیروانی جداره‌ی لندفیل و در ارتفاع ۳۰ متری از زیر تاج همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تنش‌های فشاری در محل به مقدار بیشینه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال رسیده‌اند که تنش‌های اخیر در مدل نرم‌افزاری به مقادیر بیشینه‌ی ۸۰ کیلوپاسکال محدود شده‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که علاوه بر تنش‌های فشاری ناشی از وزن مصالح و پسماند، تنش‌های فشاری ناشی از حرارت تولیدشده در پایین شیب شیروانی نیز وجود دارد که مقادیر مذکور توسط ترمومترها در محل ثبت شده‌اند.

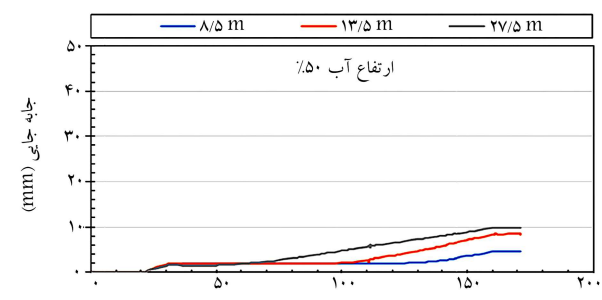
در شکل ۸، نمودارهای جابه‌جایی‌های ژئوتکتایل و ژئوممبرین ثبت شده توسط اکستنسئومترها و همچنین نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی پژوهش مرجع (نرم‌افزار FLAC) [۹] و پژوهش حاضر (نرم‌افزار آباکوس) مشاهده می‌شود. نتایج اکستنسئومترهای نصب شده روی GT و GM طی سه سال ساخت و پُر شدن لندفیل از پسماند ثبت شده‌اند. مطابق نمودارهای جابه‌جایی‌ها در شکل ۷، مقادیر جابه‌جایی برای لایه‌ی GT در این مقطع به دلیل تعطیلی پروژه به مدت ۲ سال و قرارگرفتن لایه‌ی GT در معرض نور خورشید، کشش‌سنج‌ها جابه‌جایی تا ۸۰ میلی‌متر را ثبت کرده‌اند، ولی در مدل‌سازی نرم‌افزاری با توجه به مدل رفتاری کرنش نرم‌شوندگی اندرکشش، جابه‌جایی بیشینه‌ی ۱۸ میلی‌متر ثبت شده است.

-- رفتار ژئوممبرین: جابه‌جایی‌های ثبت شده در ژئوممبرین، روند افزایش تدریجی در طی روند پرشدن سلول در تمام طول شیب را نشان می‌دهند. اما جابه‌جایی‌های ناشی از قرارگرفتن روکش ماسه، اندک است. اکستنسئومترها بیشترین جابه‌جایی را ۲۵/۹ میلی‌متر ثبت کرده‌اند. ولی دامنه‌ی جابه‌جایی ثبت شده در پنل‌های GM بین ۱۰-۲۰ میلی‌متر توسط ابرار دقیق ثبت شده و همچنین هیچ ارتباط معنی‌داری بین محل‌های افزایش جابه‌جایی‌ها در ژئوممبرین و ژئوتکتایل در راستای شیب پیدا نشده است.

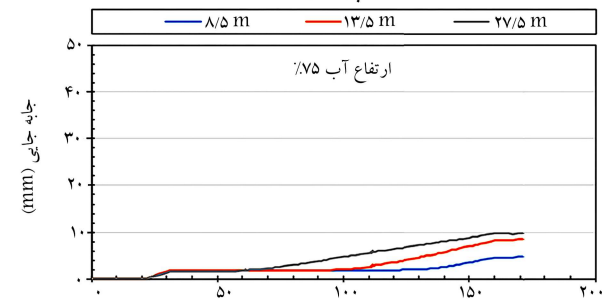
-- رفتار ژئوتکتایل: جابه‌جایی‌های قابل توجهی برای لایه‌ی GT توسط ابرار دقیق ثبت شده است. اکستنسئومترهایی که در وسط و بالای شیب قرار داشتند، جابه‌جایی به سمت پایین شیب تا ۸۰ میلی‌متر را ثبت کرده‌اند. جابه‌جایی‌های اخیر به دلیل تأخیر در اجرای پروژه و اجرانشدن روکش‌های دوم و سوم ماسه و در نتیجه در معرض نور خورشید قرارگرفتن GT بوده است. در پژوهش حاضر، نتایج جابه‌جایی GT با مقادیر مدل‌سازی عددی پژوهش مرجع [۹] در حالت کرنش نرم‌شوندگی اندرکشش همخوانی پیدا کرده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، در نمودار تنش فشاری و جابه‌جایی در طی مراحل ساخت مشخص است که مدل‌سازی صورت‌گرفته در پژوهش حاضر به خوبی نتایج پژوهش مرجع را بازتولید کرده است.



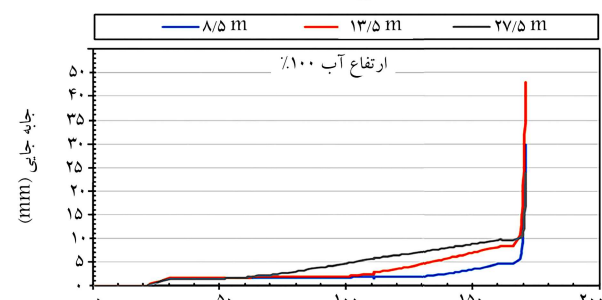
شکل الف) زمان بارگذاری (s) ارتفاع آب ۲۵٪



شکل ب) زمان بارگذاری (s) ارتفاع آب ۵۰٪



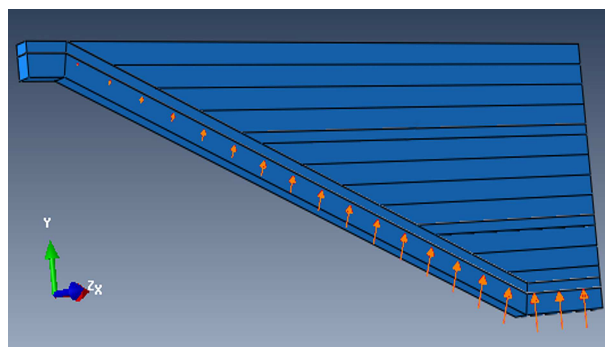
شکل ج) زمان بارگذاری (s) ارتفاع آب ۷۵٪



شکل د) زمان بارگذاری (s) ارتفاع آب ۱۰۰٪

شکل ۱۰. جابه‌جایی در لایه‌ی ژئوممبرین در تراز آب.

به‌دست‌آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی روی سیستم پوشش لندفیل، بهترین همخوانی را با نتایج تنش‌های به‌دست‌آمده از ابزار دقیق به‌کار رفته در محل داشته است. همچنین ارتباطی بین مکان جابه‌جایی‌ها در محل و مدل یافت نشده است، اما براساس روش کرنش نرم‌شوندگی، نتایج به‌دست‌آمده از مدل، همگرایی خوبی با نتایج در محل داشته‌اند.



شکل ۹. مدل سه‌بعدی اعمال فشار هیدرواستاتیکی به لایه‌ی ژئوممبرین در کل ارتفاع شیب جداره (۱۰۰٪ ارتفاع جداره).

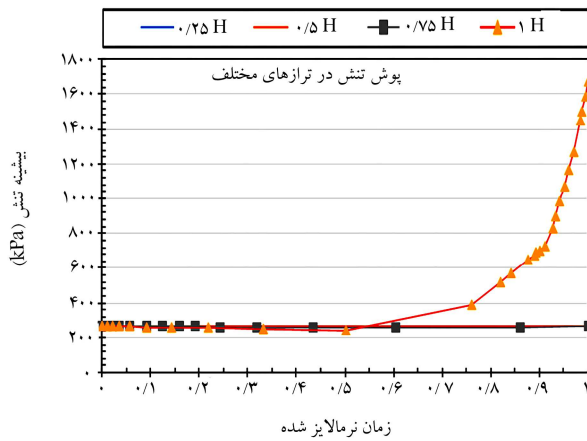
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نمودارهای جابه‌جایی GM و GT در ۴ تراز مختلف فشار هیدرواستاتیکی رسم شده‌اند؛ که در آن‌ها، جابه‌جایی‌ها در طی مراحل ساخت و اعمال فشار هیدرواستاتیکی مشاهده می‌شوند. مطابق نمودارهای اخیر، تأثیر فشار هیدرواستاتیکی آب در جابه‌جایی‌ها اندک است، مگر در تراز بیشینه‌ی ارتفاع آب (۱۰۰٪ ارتفاع) که جابه‌جایی‌ها در این مرحله به‌صورت جهشی افزایش یافته‌اند. همان‌طور که در نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، در زمان ۱۷۰، فشار آب به مدل اضافه شده است. زمانی که ارتفاع آب از ۷۵٪ عبور کرده است، تا زمان رسیدن به تاج شیروانی، افزایش حادی در نتایج جابه‌جایی ژئوستتیک‌ها به‌واسطه‌ی از بین رفتن مقاومت کششی در لایه‌های اشاره‌شده مشهود است.

در شکل ۱۲، پوشش بیشینه‌ی تنش‌های اصلی وارده بر لایه‌ی ژئوممبرین در زمان نرمالایز شده مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که تنش برشی در لایه‌ی ژئوممبرین، تغییر چندانی را تجربه نکرده است، به جز در ارتفاع ۱۰۰٪ آب، که تنش تا مقدار ۱۶۸۰ kPa افزایش یافته است که افزایش ذکر شده، این حقیقت را آشکار می‌کند که لایه‌ی ژئوممبرین از زمان حضور آب، نقش آب‌بند خود را ایفا کرده و این حد از تنش با توجه به مقاومت لایه‌ی HDPE منجر به گسیختگی آن شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

یافتن ژئوتکستایل‌ها و ژئوممبرین‌های مناسب برای کاربردهای آب‌بندی حائز اهمیت است. بنابراین قابلیت اطمینان و دوام آن‌ها در برابر تنش‌های داخلی ناشی از جرم پسماند و فشار خارجی ناشی از وجود آب کنترل می‌شود. ابتدا برای ارزیابی روش‌های طراحی استاندارد با مدل‌سازی عددی و درک بهتر عملکرد سیستم پوشش، مدل‌سازی عددی شیب جداره‌ی لندفیل مورد مطالعه با داده‌های میدانی مقایسه شده است. نتایج مطالعه نشان دادند که مدل ارائه‌شده در مطالعه‌ی حاضر می‌تواند رفتار سیستم پوشش چندلایه‌ی پُر شده با پسماند را به خوبی مدل کند. در پژوهش حاضر، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. مطالعات محلی نشان داده‌اند که بخش‌هایی از GT، تغییر طول بسیار زیادی را تجربه می‌کنند. این رفتار سیستم پوشش را نمی‌توان دقیقاً با مدل عددی شبیه‌سازی کرد. با وجود این، رفتار قسمت‌هایی از سیستم پوشش، که در معرض نور خورشید نیستند و بلافاصله پوشش داده شده‌اند، را می‌توان با استفاده از روش کرنش نرم‌شوندگی مدل‌سازی کرد. مدل کرنش نرم‌شوندگی براساس نتایج



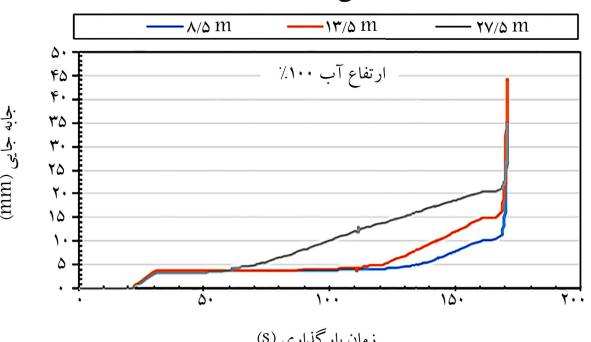
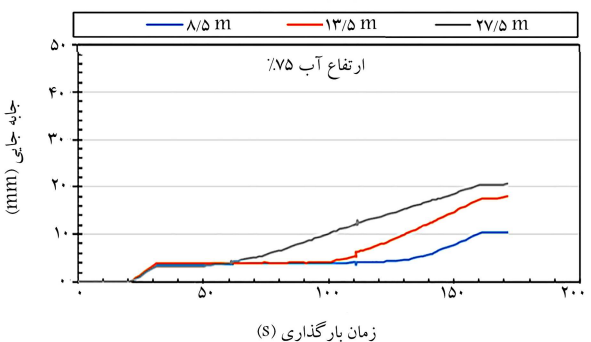
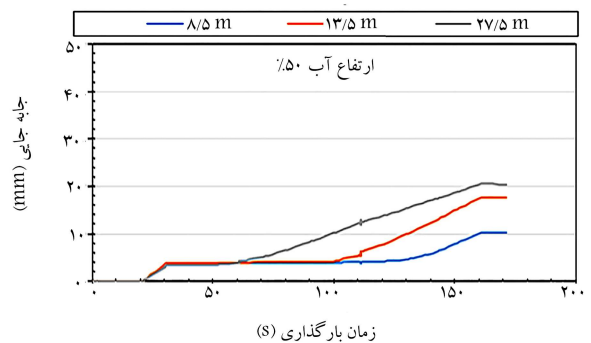
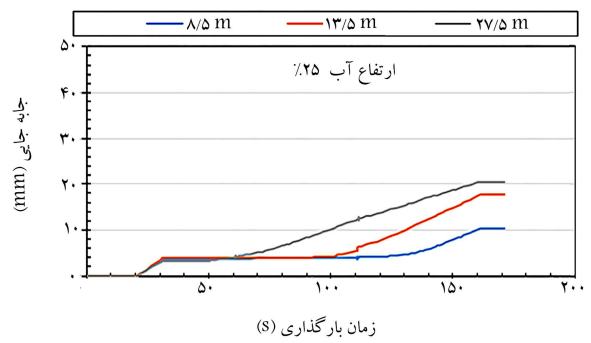
شکل ۱۲. پوش بیشینه‌ی تنش کششی به‌دست آمده از نرم‌افزار در ترازهای مختلف آب.

۲. با در نظر گرفتن آثار دما در رفتار مواد ژئوسنتتیک در سیستم پوشش جداره‌ی لندفیل به دلیل پیچیدگی آن نمی‌توان از روش‌های طراحی مرسوم استفاده کرد. با این حال، باید تلاش کرد تا تأثیر چرخه‌های دما در عملکرد سیستم پوشش جداره‌ی لندفیل در نظر گرفته شود، زیرا لایه‌های مذکور به دلیل سرعت پایین پُرشدن زباله برای مدت طولانی بدون پوشش باقی می‌مانند.

۳. جابه‌جایی نسبی بین ژئوتکستایل و ژئوممبرین می‌تواند تنش برشی سطح مشترک را توسعه دهد و در نتیجه باعث کاهش پایداری و لغزش سیستم پوشش در زیر پسماند شود. در صورتی که اگر ژئوسنتتیک‌ها برای مدت طولانی در معرض شرایط محیطی آزاد قرار گیرند، توصیه می‌شود از مقادیر کاهش یافته‌ی مقاومت برشی اندرکنش و مقادیر اصلاح شده برای خصوصیات مقاومتی مصالح در طرح استفاده شود.

۴. با فرض اشباع بودن لایه‌ی رس، فشار هیدرواستاتیکی مستقیماً به لایه‌ی ژئوممبرین به‌عنوان لایه‌ی عایق در چهار کد ارتفاعی اعمال و جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در لایه‌های GT و GM بررسی شده‌اند. نتایج جابه‌جایی‌ها و همچنین تنش‌های برشی در لایه‌های ذکر شده نشان داد که فشار آب تا ۷۵٪ از ارتفاع شیب، تأثیر بسیار کمی در رفتار ژئوسنتتیک‌ها داشته است. اما زمانی که سطح آب به ۱۰۰٪ ارتفاع شیب رسیده است، جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته‌اند، به طوری که از حدود تنش گسیختگی اعلام شده توسط کارخانه‌ی تأمین‌کننده‌ی ژئوممبرین فراتر رفته‌اند. لذا، این امر می‌تواند منجر به پارگی لایه‌ی ژئوممبرین شود.

۵. با توجه به خطر ناپایداری جداره به دلیل آب‌سستگی و همچنین عدم یکپارچگی سیستم عایق در اثر تنش‌های خارجی، استفاده از امکانات انحراف آب و دریواسیون<sup>۱۳</sup> (دیواره‌ی هدایت آب) در پشت جداره‌های لندفیل در مناطق مستعد رواناب ضروری است.



شکل ۱۱. جابه‌جایی در لایه‌ی ژئوتکستایل در تراز آب.

### پانویس‌ها

1. landfill
2. Dixon

3. residual
4. Abaqus
5. Liang
6. Milegate
7. Extensometer

8. Geomembrane
9. Geotextile
10. Zamara
11. Geosynthetic
12. Implicit
13. Derivation

### منابع (References)

1. Li, W., Hua, T. Zhou, Q. and et al. "Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption", *Desalination*, **264**(1-2), pp. 56-62 (2010).
2. Sergio Collado, PO. and Mario Diaz, AL. "Impact of leachate composition on the advanced oxidation treatment", *Water Research*, **88**, pp. 389-402 (2016).
3. Koerner, R.M. and Hwu, B.L. "Stability and tension considerations regarding cover soils on geomembrane lined slopes", *Geotext. Geomembranes*, **10**(4), pp. 335-355 (1991).
4. Koerner, R.M. and Soong, T.Y. "Stability assessment of ten large landfill failures", ASCE Geo-Denver 2000, Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics (2000).
5. Qian, X., Koerner, R.M. and Gray, D.H. "Translational failure analysis of landfills", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **129**(6), p.506 (2003).
6. Fox, P.J. and Stark, T.D. "State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement- ten-year update", *Geosynth. Int.*, **22**(1), pp. 3-47 (2015).
7. Feng, Sh.-J. and Lu, Sh.-F. "Repeated shear behaviors of geotextile/geomembrane and geomembrane/clay interfaces", *Environ. Earth Sci.*, **75**, pp.273 (2016).
8. Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., Take, W.A. and et al. "Field and laboratory observations of down-slope bentonite migration in exposed composite liners", *Geotext. Geomembranes*, **44**(5), pp. 686-706 (2016).
9. Zamara, K.A., Dixon, N., Jones, D.R.V. and et al. "Monitoring of a landfill side slope lining system: Instrument selection, installation, and performance", *Geotext. Geomemb.*, **35**, pp. 1-13 (2012).
10. Jones, D.R.V. and Dixon, N. "Landfill lining stability and integrity: The role of waste settlement", *Geotext. Geomemb.*, **23**(1), pp. 27-53 (2004).
11. Dixon, N., Zamara, K.A., Jones, D.R.V. and et al. "September. waste/lining system interaction: Implications for landfill design and long-term performance", *Geotechnical Engineering*, **43**(3), pp. 1-10 (2012).
12. Miri, A., Ali Zakeri, J., Thambiratnam, D.P. and et al. "Mitigation of track buckling in transition zones of steel bridges by geotextile reinforcement of the ballast layer", *Geotextiles and Geomembranes*, **50**(2), pp. 282-292 (2021).
13. Voottipruex, P., Bergado, D.T., Lam, L.G. and et al. "Back-analyses of flow parameters of PVD improved soft Bangkok clay with and without vacuum preloading from settlement data and numerical simulations", *Geotextiles and Geomembranes*, **42**(5), pp. 457-467 (2014).
14. Biabani, M.M., Indraratna, B. and Ngo, N.T. "Modeling of geocell-reinforced sub-ballast subjected to cyclic loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(4), pp. 489-503 (2016).
15. Debnath, P. and Dey, A.K. "Bearing capacity of geogrid reinforced sand over encased stone columns in soft clay", *Geotextiles and Geomembranes*, **45**(6), pp. 653-664 (2017).
16. Rasouli, H. and Fatahi, B. "Geosynthetics reinforced interposed layer to protect structures on deep foundations against strike-slip fault rupture", *Geotextiles and Geomembranes*, **49**(3), pp. 722-736 (2021).
17. Liang, J., Zhang, G., Ba, Zh. and et al. "Development of a 3D fluid-saturated element for dynamic analysis of two-phase media in ABAQUS based on u-U formed equations", *Computers, and Geotechnics*, **139**, p. 104377 (2021).
18. Zamara, K.A., Dixon, N., Fowmesc, G. and "Landfill side slope lining system performance: A comparison of field measurements and numerical modeling analyses", *Geotext. and Geomemb.*, **42**(3), pp. 224-235 (2014).
19. Yang, R., Xu, Z. and Chai, J. "Numerical analysis of three-dimensional infiltration in a municipal solid waste landfill under rainfall", *Polish Journal of Environmental Studies*, **29**(2), pp. 1953-1963 (2020).
20. Fowmes, G.J., Dixon, N. and Jones, D.R.V. "Validation of a numerical modelling technique for multilayered geosynthetic landfill lining systems", *Geotext. Geomemb.*, **26**(2), pp. 109-121 (2008).