

تعیین مقاومت بلند مدت و عمر بهره‌برداری ژئوسنتتیک‌های

مورد استفاده در پروژه‌های راهسازی

مقاله علمی - پژوهشی

ناهد عطارچیان*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: n.attarchian@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۵

صفحه ۴۸-۳۳

چکیده

ارزیابی دوام ژئوسنتتیک‌ها در کاربری‌های جداسازی، فیلتراسیون و زهکشی، منجر به تعیین عمر بهره‌برداری محصول می‌شود. برای استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی تعیین عملکرد بلندمدت و برآورد ضرایب کاهنده مقاومت ضروری است. ضرایب کاهنده مقاومت و عمر بهره‌برداری ژئوسنتتیک‌ها براساس نوع پلیمر، مشخصات کوتاه مدت و رفتار بلندمدت این مصالح تحت اثر شرایط محیطی و بارهای وارده تعیین می‌شود. در سال‌های اخیر روش‌های آزمایشگاهی تسریع شده برای تعیین ضرایب کاهنده و عمر بهره‌برداری محصولات ژئوسنتتیک توسعه یافته و مطالعات متعددی درخصوص ارزیابی دوام محصولات ژئوسنتتیک در برابر انواع ساز و کارهای زوال شیمیایی و مکانیکی انجام شده است. در این مقاله پس از تبیین مفاهیم مرتبط با ارزیابی دوام، پارامترهای موثر بر دوام محصولات ژئوسنتتیک، شرایط محیطی مسبب زوال، انواع ساز و کارهای زوال (هوازدگی، اکسیداسیون، هیدرولیز، خزش، نصب و اجرا) مرور شده و روش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته برای شیشه‌سازی شرایط محیطی معرفی و مقایسه شده‌اند. در ادامه روش تعیین ضرایب کاهنده طراحی و تعیین عمر بهره‌برداری انواع ژئوسنتتیک‌ها براساس نتایج آزمون‌های تسریع شده (غربال‌گری) ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: راهسازی، ژئوسنتتیک، دوام، عمر بهره‌برداری، مقاومت بلند مدت

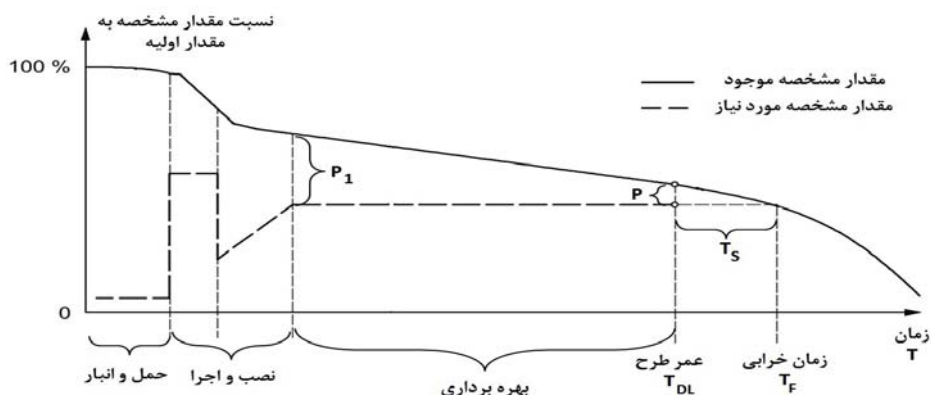
۱- مقدمه

استفاده از این مصالح در پروژه‌های عمرانی در مقایسه با مصالح متداول مهندسی (فولاد و بتن) ضروری‌ست تا دوام و عملکرد بلندمدت محصولات ژئوسنتتیک مورد توجه قرار گیرد. هدف از ارزیابی دوام، بررسی میزان تغییر مشخصات فنی و عملکردی محصول در طول زمان بهره‌برداری تحت اثر شرایط محیطی و بارهای وارده است. در شکل (۱) تغییرات مقدار مشخصه موجود و مقدار مشخصه مورد نیاز محصول ژئوسنتتیکی در طول زمان نشان داده شده است. زمان تساوی مقدار مشخصه موجود و مورد نیاز به عنوان زمان خرابی (T_f) تعریف شده است. در طول عمر طرح ضروری است، نسبت P براساس ضریب اطمینان مورد نظر، بزرگتر از یک باشد.

در سال‌های اخیر به دلیل مزایای فنی و اجرایی متعدد از جمله تسهیل و تسریع فرآیند اجرا، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در پروژه‌های عمرانی توسعه یافته است. محصولات ژئوسنتتیکی در زمینه‌های کاربرد متنوع مانند جداسازی، تسلیح، زهکشی و فیلتراسیون در پروژه‌های راهسازی استفاده می‌شوند. تنوع زیاد محصولات ژئوسنتتیک ناشی از تنوع در نوع رزین، ساختار محصول، روش تولید و زمینه کاربرد این محصولات، منجر به تعدد روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات فنی این محصولات شده است. سابقه تولید محصولات پلیمری کمتر از ۱۰۰ سال است. با توجه به عمر طرح سازه‌های مهم مهندسی که اغلب بیش از ۱۰۰ سال است و با توجه به سابقه کمتر

محصولات ژئوسنتتیک منجر به تعیین ضرایب کاهش مقاومت در مسلح‌کننده‌ها و عمر بهره‌برداری در ژئوسنتتیک‌های با کاربرد زهکش، فیلتراسیون و جداساز می‌شود. ارزیابی دوام محصولات ژئوسنتتیک مستلزم تعیین ساز و کار زوال محتمل در محصولات ژئوسنتتیک است که با توجه به نوع پلیمر، شرایط محیطی و نوع کاربرد محصول مشخص می‌شود.

عمر بهره‌برداری ژئوسنتتیک عبارت است از مدت زمانی که در آن، محصول مشخصات فنی مورد نیاز را، تحت اثر شرایط محیطی مانند: بارهای وارده، دما، شرایط شیمیایی و تابش نور (اشعه فرابنفش) و ... تامین می‌نماید. در سال‌های اخیر با توسعه دانش فنی در زمینه فرآیندهای تولید و تثبیت مواد پلیمری انواع راهبردهای ارزیابی دوام اعم از روش‌های آزمون تجربی بلندمدت، غربال‌گری^۱ و آزمون شاخص^۲ برای ارزیابی دوام محصولات ژئوسنتتیک توسعه یافته است (ISO 2020، ASTM D5819، 2022). ارزیابی دوام



شکل ۱. تغییرات مشخصه فنی موجود و مورد نیاز در طول زمان‌های انبارش، حمل، نصب و بهره‌برداری (ISO/TS 13434، 2020)

۱- آزمون‌های شاخص و معرفی معیارهای پذیرش. آزمون‌های شاخص معمولاً معیارهای حداقلی برای تامین دوام محصولات ارائه می‌نمایند. تعداد آزمایش‌های توسعه یافته در این گروه برای محصولات ژئوسنتتیک محدود است.

۲- آزمون‌های غربال‌گری و آزمون‌های عملکردی که در آنها با شبیه‌سازی شرایط محیطی تغییرات مشخصات فنی و عملکردی آزمون‌های در معرض قرارگرفته با آزمون‌های شاهد مقایسه می‌شود. اکثر روش‌های آزمایشگاهی تسریع شده در این گروه قرار دارند. بسته به میزان افت مشخصات فنی در آزمون‌های در معرض قرارگرفته در مقایسه با آزمون‌های شاهد، عمر بهره‌برداری محصول و یا ضرایب کاهش طراحی مشخص می‌شوند.

۳- انجام مطالعات تجربی بلندمدت. در این روش از محصولاتی که سال‌ها تحت اثر شرایط محیطی واقعی قرار گرفته‌اند، نمونه اخذ شده و تغییرات مشخصات فنی موجود در آزمون‌ها با مشخصات فنی اولیه (آزمون‌های شاهد) مقایسه می‌شود. اگرچه بهترین روش اطمینان از دوام محصولات

در این مقاله پارامترهای موثر بر دوام محصولات ژئوسنتتیک، شرایط محیطی مسبب زوال، انواع ساز و کارهای زوال (هوازدگی، اکسیداسیون، هیدرولیز، خزش، نصب و اجرا) مرور شده و روش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته برای شبیه‌سازی شرایط محیطی معرفی و مقایسه شده‌اند. در پایان براساس نتایج آزمون‌های تسریع شده (غربال‌گری)، روش تعیین ضرایب کاهش طراحی مطابق AASHTO R69 (۲۰۱۵)، BS 8006-1 (۲۰۱۰)، FHWA (۲۰۰۹) و ISO/TR20432 (۲۰۰۷) ارایه و مقایسه شده و روش تعیین عمر بهره‌برداری انواع ژئوسنتتیک‌های مورد استفاده در پروژه‌های راهسازی مطابق BS EN13249 (۲۰۱۶) تبیین شده است.

۲- راهبردهای ارزیابی دوام

روش‌های موجود برای ارزیابی دوام محصولات ژئوسنتتیک را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی نمود (ASTM D5819، ۲۰۲۲).

مراجعه به نتایج تجربی بلند مدت است، ارزیابی دوام محصولات به این روش زمان‌بر و غیرعملی است. از این رو با توسعه دانش مهندسی پلیمر، انواع روش‌های تسریع‌شده

به منظور شبیه‌سازی شرایط محیطی مسبب ساز و کارهای زوال توسعه یافته است.

جدول ۱. عوامل موثر بر زوال ژئوسنتتیک‌های مدفون و ساز و کار زوال نظیر

عوامل موثر بر زوال	ساز و کار زوال
ماشین آلات نصب و اجرا	زوال مکانیکی ناشی از نصب و اجرا
نیروهای وارده	زوال مکانیکی ناشی از بارهای کششی، خزش و پارگی خزشی
شرایط محیطی خاک	خاک‌های اسیدی و یا بازی
	حضور یون‌های فلزی
	رطوبت، اکسیژن
مواد ارگانیک و میکرو ارگانیزم‌ها	زوال بیولوژیک
شرایط محیطی خاک و بارهای وارده	زوال مکانیکی و بروز ترک‌های تنشی محیطی

۳- پارامترهای موثر بر دوام محصولات ژئوسنتتیک

دوام محصولات ژئوسنتتیک، متأثر از ساختار فیزیکی ژئوسنتتیک‌ها مانند: ضخامت محصول، نسبت مساحت به حجم، مساحت به جرم، ضخامت الیاف، ساختار و آرایش مولکول‌ها، نوع پلیمر مورد استفاده (مشخصات رزین، مواد افزودنی آنتی‌اکسیدان، خمیرکننده‌ها و ...)، فرآیند تولید، شرایط فیزیکی و شیمیایی محل، مقدار بارهای وارده و نحوه انبارش، نگهداری و حمل این محصولات است. به طور مثال سرعت تبخیر و خروج افزودنی‌ها، به طور معکوس وابسته به نسبت مساحت به حجم محصول است. بدیهی است، افزایش سرعت تبخیر آنتی‌اکسیدان، منجر به تسریع وقوع اکسیداسیون در محصول می‌شود. همچنین هرچه مولکول‌های پلیمر هم‌راست‌تر بوده و ساختار کریستالی داشته باشند، دوام پلیمر و مقاومت مکانیکی آن و مقاومت آن در برابر شرایط محیطی بیشتر می‌شود. افزایش قطر الیاف و ضخامت صفحات، از آسیب‌پذیری ژئوتکستایل در برابر هوازدگی می‌کاهد. از این رو مطابق AASHTO R69 (۲۰۱۵) لازم است برای هر محصول جدید ارزیابی دوام انجام شود.

۴- شرایط محیطی و عوامل مسبب زوال

پیش از ارزیابی دوام محصولات ژئوسنتتیک لازم است میزان مهاجم بودن خاک مجاور محصول، تعیین شود. مطابق AASHTO R69 (۲۰۱۵) خاک با pH بین ۴٫۵ تا ۹ و دمای کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد طبیعی‌ست و سایر محیط‌های خاکی با خاصیت اسیدی یا قلیایی بیشتر، در گروه

خاک‌های مهاجم طبقه‌بندی می‌شوند. مطابق ISO 13434 (۲۰۲۰) خاک‌های طبیعی دارای pH بین ۴ تا ۹ و دمای کمتر از ۲۵ درجه هستند. لازم به تاکید است که کلیه آزمون‌های غربالگری توسعه یافته برای ارزیابی دوام محصولات در خاک‌های طبیعی طراحی شده‌اند و برای خاک‌های مهاجم لازم است، آزمون‌های عملکردی متناسب با شرایط محیط طراحی شود. در اغلب کاربری‌ها، محصولات ژئوسنتتیک در خاک مدفون شده و جزء در دوره نصب و اجرا، در معرض تابش خورشید نمی‌باشند. برای محصولاتی که در دوره بهره‌برداری در معرض تابش خورشید هستند و یا در مواردی که مدت زمان نصب و پوشش محصول ژئوسنتتیک بیش از یک روز باشد، ضروری است میزان هوازدگی محصول در معرض تابش اشعه UV مورد ارزیابی قرار گیرد. برای محصولات ژئوسنتتیک مدفون در خاک، علاوه بر مشخصات محیط خاک اطراف، روش‌های اجرایی به کار رفته در حین نصب و اجرا و میزان بار وارده در شکل‌گیری نوع ساز و کارهای زوال موثرند. در جدول (۱) عوامل موثر بر زوال ژئوسنتتیک‌های مدفون و ساز و کارهای زوال نظیر ارائه شده است.

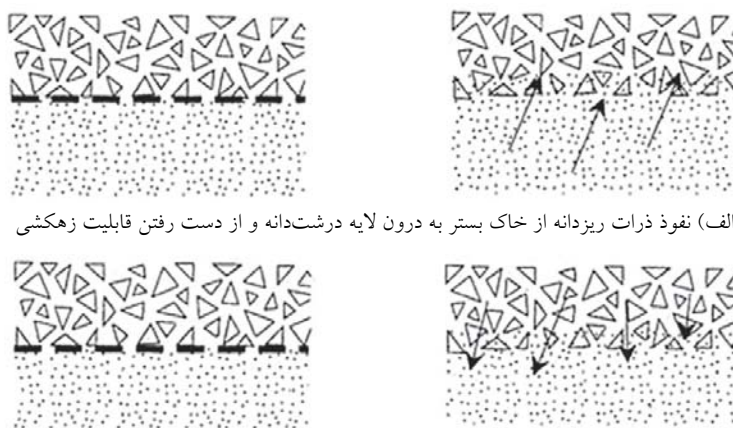
۵- ساز و کارهای زوال محتمل و روش‌های ارزیابی

ساز و کارهای زوال موثر بر ژئوسنتتیک‌ها را می‌توان در سه گروه زوال‌های ناشی از هوازدگی، زوال‌های شیمیایی و زوال‌های مکانیکی دسته‌بندی نمود.

جدول ۲. انواع ساز و کارهای زوال و روش‌های آزمون غربال‌گری مرتبط

روش آزمون	شرایط محیطی	نوع ساز و کار زوال
روش میدانی: ASTM D1435 ASTM D5970 روش آزمایشگاهی: ASTM D4355 ASTM D7238 EN 12224	قرار گیری در معرض تابش نور	هوازدگی و پیرشدگی
تعیین زمان کاهش اکسایشی (OIT): ASTM D3895 ASTM D5885 تعیین میزان افت مقاومت: BS EN 13438 ASTM D5721	پلی‌الفین‌ها در معرض اکسیژن	اکسیداسیون
انواع ژئوستتیک (آب): BS EN 12447 انواع ژئوستتیک (اسید یا باز): ISO 12960 ژئوتکتستایل (شیرابه): ASTM D6389 ژئوممبرین (شیرابه): ASTM D5747 ژئونت (شیرابه): ASTM D6388 ژئوگرید (شیرابه): ASTM D6213 GCL (شیرابه): ASTM D6141	پلی‌استر و پلی‌آمید در معرض مواد شیمیایی	هیدرولیز
ISO 13431 ASTM D6992 ASTM D5262	بار کششی در طول زمان	خزش و پارگی خرسی
EN 14576 ASTM D5397	بار کششی به همراه شرایط محیطی	توسعه ترک‌های تنشی-محیطی
ISO 10722 ASTM D5818	تماس و فشار ذرات درشت‌دانه و تیز گوشه خاک	نصب و اجرا
ISO 13427 ASTM D4886	حرکت وسایل نقلیه، برخورد موج دریا	سائیدگی و بارهای دینامیکی

شکل ۲. عملکرد جداسازی لایه ژئوتکتستایل (Shukla، 2016)



الف) نفوذ ذرات ریزدانه از خاک بستر به درون لایه درشت‌دانه و از دست رفتن قابلیت زهکشی

ب) ورود دانه‌های درشت به خاک بستر و از دست رفتن ظرفیت باربری

۵-۱- هواز دگی و پیرشدگی

اغلب ژئوستنتیک‌ها فقط در دوره نصب و اجرا در معرض تابش خورشید قرار دارند و پس از نصب مدفون می‌شوند. لیکن در برخی از کاربردها، مانند کنترل فرسایش خاک، سیل‌بندها، پوشش‌های مورد استفاده در شیب‌ها و یا روی دریاچه‌ها و حوضچه‌ها، ژئوستنتیک‌ها در طول عمر خود در معرض تابش خورشید قرار دارند. انرژی تابش فرابنفش منجر به شکستن زنجیرهای پلیمر و در نتیجه کاهش مقاومت و از دست رفتن مشخصات فنی محصول می‌شود.

در ژئوتکتستایل‌های با پلیمرهای تثبیت نشده، حتی یک هفته مواجهه با تابش خورشید، می‌تواند بسیار مخرب باشد. با افزودن تثبیت‌کننده‌ها می‌توان مقاومت محصولات پلیمری را در برابر تابش فرابنفش افزایش داد. حضور دیگر پارامترهای محیطی مانند، گرما، رطوبت و مجاورت با سولفور و شیرابه‌های سمی و ... موجب تسریع پوسیدگی و زوال پلیمرها می‌شود.

در جدول (۲) خلاصه‌ای از انواع ساز و کارهای زوال و روش‌های آزمون غربال‌گری نظیر آرایه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، پلی‌الفین‌ها مشتمل بر پلی-اتلین‌ها و پلی‌پروپیلن، بیشتر مستعد زوال شیمیایی اکسیداسیون و پلی‌استرها و پلی‌آمیدها بیشتر در معرض زوال شیمیایی هیدرولیز هستند. برای ارزیابی دوام محصولات ژئوستنتیکی لازم است براساس عملکرد مورد انتظار از محصول، جنس رزین، شرایط محیطی و بارهای وارده در حین نصب و بهره‌برداری؛ ساز و کارهای زوال محتمل نظیر (اکسیداسیون، هواز دگی، وادادگی تنش و ...) مشخص شوند و سپس میزان عمر بهره‌برداری و یا ضرایب کاهنده ناشی از فعال شدن هریک از این مکانیزم‌های زوال تعیین شود.

به عنوان نمونه برای ژئوتکتستایل‌های مورد استفاده به عنوان لایه جداساز در روسازی راه‌ها که در معرض بارهای ناشی از نصب و اجرا و شرایط محیطی خاک طبیعی قرار دارند، (شکل ۲) بروز آسیب‌های مکانیکی در طول نصب و اجرا، کاهش ظرفیت گذردهی به دلیل انسداد روزه‌ها و از دست رفتن مشخصات فنی در اثر مواجهه با رطوبت (اکسیداسیون، هیدرولیز و ...) محتمل است.

جدول ۳. مشخصات روش‌های آزمایشگاهی تسریع شده برای ارزیابی مقاومت در برابر هواز دگی و پیرشدگی

روش آزمون	نوع ژئوستنتیک	مدت زمان آزمون	مدت زمان هر چرخه	مشخصات چرخه	نوع دستگاه	تابش طیفی W/m ² .nm	شار انرژی برای ۵۰۰ ساعت تابش MJ/m ²
ASTM D4355 (۲۰۲۰)	ژئوتکتستایل	۱۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ساعت	۲ ساعت	۹۰ دقیقه تابش در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰ درصد و ۳۰ دقیقه تابش و اسپری آب	دستگاه زنون UVA 340 ASTM G151 ASTM G155	۰٫۳۵	۲۱۵
ASTM D7238 (۲۰۲۰)	ژئوممبرین پلی‌الفین (غیر مسلح)	۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰، ۱۹۲۰ ساعت	۲۴ ساعت	۲۰ ساعت تابش در دمای ۷۵ درجه و ۴ ساعت تابش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد	لامپ فلورسانت UVA 340 ASTM G151 ASTM G154	۰٫۷۸	۴۷۰
EN 12224 (۲۰۰۰)	ژئوستنتیک‌ها	۴۲۰ ساعت	۶ ساعت	۵ ساعت تابش در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۰ درصد، یک ساعت اسپری آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	لامپ فلورسانت UVA 340 ISO 4892-3	۰٫۰۸	۵۰

جدول ۴: مدت زمان مجاز قرارگیری در معرض تابش برای محصولات ژئوستتیکی BS EN 13249 (۲۰۱۶)

نوع عملکرد	درصد مقاومت باقی مانده در آزمون پیر شده مطابق EN 12224	حداکثر مدت زمان در معرض گیری (بدون پوشش) در زمان نصب
مسلمح کننده و کاربردهایی که مقاومت بلند حائز اهمیت است	بیش از ۸۰ درصد	یک ماه*
	۶۰ تا ۸۰ درصد	دو هفته
	کمتر از ۶۰ درصد	در روز نصب پوشانده شود
دیگر عملکردها	بیش از ۶۰ درصد	یک ماه*
	۲۰ تا ۶۰ درصد	دو هفته
	کمتر از ۲۰ درصد	در روز نصب پوشانده شود

ژئوتکتستایل‌های با کاربری جداسازی (نسبت CBR بیش از ۳) و کاربری تثبیت‌کننده بستر (نسبت CBR بیش از ۱) حداکثر افت مقاومت مجاز برابر ۵۰ درصد است. در ژئوتکتستایل‌هایی که برای بهسازی بستر (نسبت CBR کمتر از ۱) استفاده می‌شوند، حداکثر افت مقاومت مجاز برابر با ۳۰ درصد است. آزمون هوازگی مرجع مطاب AASHTO M288 (۲۰۲۱) برابر است با ASTM D4355.

مطابق BS EN 13249 (۲۰۱۶) برای ژئوتکتستایل‌های مورد استفاده در پروژه‌های راهسازی چنانچه مدت زمان نصب و اجرا محصول و مواجهه آن با نور خورشید به یک روز محدود شود، می‌توان از ارزیابی دوام در برابر هوازگی صرفنظر نمود. در جدول (۴) مدت زمان مجاز قرارگیری در معرض تابش برحسب درصد مقاومت کششی باقی‌مانده در نمونه پس از قرارگیری در معرض تابش مطابق EN 12224 (۲۰۰۰) ارائه شده است.

۵-۲- اکسیداسیون

بروز و رخداد زوال شیمیایی مشتمل بر اکسیداسیون و هیدرولیز بسته به نوع رزین، تثبیت‌کننده و شرایط اسیدی یا بازی خاک مجاور است. براساس نتایج مطالعات انجام شده پلی‌الفین‌ها (پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن) نسبت به سایر پلیمرها بیشتر مستعد اکسیداسیون هستند. زوال شیمیایی می‌تواند منجر به بروز تغییرات فیزیکی در محصول شده و یا بدون ایجاد تغییرات فیزیکی محسوس، منجر به افت عملکرد محصول شود. علاوه بر نوع و مقدار آنتی‌اکسیدان به کار رفته در تولید محصول، نسبت سطح به حجم محصول نیز بر مقاومت آن در برابر اکسیداسیون موثر است. شرایط محیطی موجب انحلال یا

امواج فرابنفش (UV) دارای طول موج‌های کوتاه‌تر از نور مرئی و دارای انرژی تابشی بیشتری هستند که برای ژئوستتیک‌ها مخرب است. امواج فرابنفش از نظر انرژی تابشی به دو گروه امواج UV-A (طول موج ۳۲۰ تا ۳۸۰ نانومتر) با قدرت تخریب متوسط و امواج UV-B (طول موج ۲۸۰ تا ۳۲۰ نانومتر) با قدرت تخریب شدید طبقه‌بندی می‌شوند. محدوده طول موج امواجی که اغلب پلیمرها به آن حساس هستند در حدود ۳۲۵ تا ۳۶۰ نانومتر است. در جدول (۳) مشخصات روش‌های آزمون تسریع شده برای ارزیابی میزان افت مقاومت در اثر هوازگی و پیرشدگی مقایسه شده‌اند. در جدول (۳) با توجه به مقدار تابش طیفی^۳ برحسب $W/(m^2 \cdot nm)$ مقدار شار انرژی تابشی^۴ برحسب MJ/m^2 برای ۵۰۰ ساعت مواجهه محاسبه شده است.

شایان ذکر است که مقدار انرژی تابشی شبیه‌سازی شده در EN 12224 (۵۰ مگاژول بر مترمربع) برابر با انرژی تابشی یک ماه تابش تابستانی در جنوب اروپا است. مطابق ASTM D4355 لازم است، آزمون‌های ژئوتکتستایل (حداقل ۵ آزمون) در راستای ماشین و عمود به راستای ماشین آماده شده و پس از اتمام مدت قرارگیری در معرض تابش، مورد آزمایش کشش قرار گیرند و میزان مقاومت باقی‌مانده در مقایسه با نمونه‌های شاهد گزارش شود. برای نمونه‌های ژئوممبرین مطابق ASTM D7238 لازم است پس از اتمام مدت زمان مواجهه علاوه بر تعیین میزان مقاومت کششی باقی‌مانده در آزمون‌ها، مدت زمان کاهش اکسایشی HP-OIT به روش ASTM D5885 و شاخص ذوب (روش ASTM D1238) تعیین شده و با مشخصات آزمون‌های شاهد مقایسه شود. مطابق استاندارد AASHTO M288 برای

مولکول‌ها و افت مقاومت محصول می‌شود. در محیط‌های بازی با pH بالا، به دلیل ابعاد بزرگتر یون‌های مهاجم که قادر به نفوذ به داخل الیاف نیستند، هیدرولیز از سطح بیرونی الیاف شروع می‌شود و در حالی که ساختار ظاهری محصول حفظ شده است، الیاف به تدریج کوچکتر می‌شوند. نرخ پیشروی هیدرولیز داخلی وابسته به مقدار CEG (گروه‌های انتهایی اسید کربوکسیلیک) است. در پلی‌استرهای با وزن مولکولی بالا مقدار CEG پایین است و در نتیجه آسیب‌پذیری آنها در برابر هیدرولیز داخلی کمتر است. در استاندارد BS EN 13249 (۲۰۱۶) که حاوی مشخصات فنی ژئوستتیک‌های به کار رفته در راهسازی است، در کنار آزمون غربال‌گری مطابق BS EN 12447 دو آزمون شاخص برای ارزیابی میزان استعداد هیدرولیز در ژئوستتیک‌های از جنس پلی‌استر معرفی شده است. مطابق BS EN 13249 در صورتی که وزن مولکولی متوسط (M_n) بزرگتر از ۲۵۰۰۰ g/mol (مطابق روش ASTM D4603) و مقدار CEG (ASTM D7409) کمتر از ۳۰ mEq/g باشد، حساسیت به هیدرولیز در پلی‌استر کاهش می‌یابد. در استاندارد BS EN 12447 (۲۰۲۱) ارزیابی مقاومت محصولات ژئوستتیک در برابر هیدرولیز در خاک‌های طبیعی با استفاده از آب ارائه شده است. در این روش در مخزن از جنس استیل و یا شیشه بوروسیلیکات آب به دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شده و نمونه‌ها به مدت زمان معین (۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۱۱۲ روز) درون این مخزن مغروق می‌باشند. حجم کلی نمونه‌ها نباید بیشتر از ۱۰ درصد فضای مخزن باشد و لازم است با گردش آب، دمای یکنواخت درون مخزن برقرار باشد. پس از اتمام مدت زمان مغروق بودن، میزان افت مقاومت کششی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد تعیین شده و با توجه به میزان افت مقاومت، مقاومت بلند مدت و عمر بهره‌برداری محصول تعیین می‌شود.

۵-۴- خزش و پارگی خزشی

پلیمرها در دمای محیط تحت اثر بار ثابت کششی، در طول زمان طویل می‌شوند. در زمان اعمال بارهای قابل توجه، پدیده خزش منجر به پارگی خزشی می‌شود. از این رو، میزان بار کششی وارده بر میزان مدت زمان عمر بهره‌برداری ژئوستتیک موثر است. در عین حال در بارهای کششی پایین باید مقدار کرنش خزشی به همراه کرنش ارتجاعی در کنترل تغییر مکان حد بهره‌برداری سازه مورد توجه قرار گیرد. خزش کششی

تبخیر آنتی‌اکسیدان‌ها می‌شود. مطابق معادله آرنیوس^۹ سرعت زوال شیمیایی محصولات با افزایش دما افزایش می‌یابد. تغییر در مقدار آنتی‌اکسیدان با استفاده از آزمون‌های OIT و HP-OIT قابل اندازه‌گیری است. در مرحله تخلیه آنتی‌اکسیدان‌ها تغییر وزن مولکولی مواد است و مشخصات مکانیکی محصول بدون تغییر است.

پس از تخلیه آنتی‌اکسیدان‌ها، مقدار OIT به کمتر از ۵ دقیقه و مقدار HP-OIT به کمتر از ۲۰ دقیقه می‌رسد (Allen, 2016). پس از تخلیه آنتی‌اکسیدان‌ها، اکسیداسیون با تشکیل رادیکال‌های آزاد آغاز می‌شود. هر واکنش اکسیداسیون منجر به شکستن زنجیره و تشکیل رادیکال‌های آزاد بیشتر می‌شود. در پایان این مرحله مشخصات مکانیکی شروع به افت می‌نمایند.

بر اساس تفاوت‌های مقدار OIT نمی‌توان رزین‌ها را از نظر پایداری در برابر اکسیداسیون، طبقه‌بندی نمود. لیکن تغییرات مقدار OIT، معیاری برای پیش‌تغییرات میزان آنتی‌اکسیدان‌ها در نمونه تحت اثر شرایط محیطی است (Hsuan & Koerner, 2007).

در استاندارد BS EN 13438 (۲۰۱۸) روش آزمون غربال‌گری برای ارزیابی مقاومت محصولات ژئوستتیک در برابر اکسیداسیون در خاک‌های طبیعی ارائه شده است. در این استاندارد برای محصولات از جنس پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌آمید و آرامید روش گرم‌خانه و برای محصولات از جنس پلی‌ونیل‌الکل روش مخزن اتوکلا ارائه شده است. در روش گرم‌خانه لازم است ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در مخزن آب با دمای ۸۰ درجه‌سانتی‌گراد مغروق شوند و سپس به مدت زمان معین (۲۸، ۵۶ و یا ۱۱۲ روز) در گرم‌خانه با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند. پس از اتمام مدت زمان مواجهه، میزان افت مقاومت کششی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد تعیین شده و با توجه به میزان افت مقاومت، ضریب کاهش مقاومت و عمر بهره‌برداری محصول تعیین می‌شود.

۵-۳- هیدرولیز

بر اساس نتایج مطالعات انجام شده پلی‌استرها و پلی‌آمیدها مستعد زوال شیمیایی هیدرولیز می‌باشند. در مجاورت با محلول‌های با pH نه و کمتر، محلول توسط الیاف پلی‌استر جذب شده و واکنش هیدرولیز در تمام مقطع نمونه آغاز می‌شود. هیدرولیز داخلی منجر به شکستن پیش‌رونده زنجیره

از روی نمودار تعیین می‌شود (شکل ۴). مقدار ضریب کاهش مقاومت ناشی از خزش (RF_{CR}) برابر است با:

$$RF_{CR} = 1/P_{CL} \quad (2)$$

۵-۵- زوال ناشی از نصب و اجرا

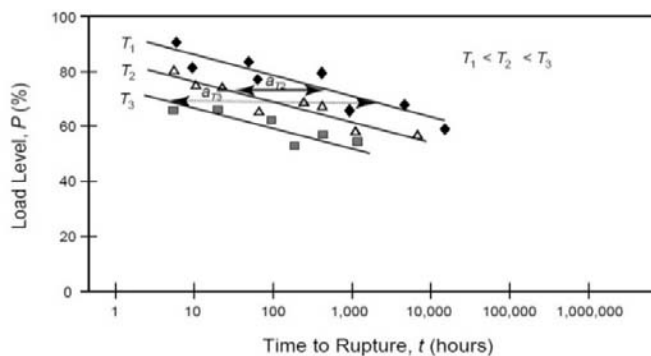
در زمان نصب و اجرا، تحت اثر بارهای ناشی از جابه‌جایی ماشین‌آلات، محصولات ژئوسنتتیک در تماس با ذرات درشت‌دانه و تیز گوشه دچار آسیب دیدگی می‌شوند. آسیب‌های سطحی مشتمل بر خراشیدن یا سایش و آسیب‌های جدی مشتمل بر پارگی یا سوراخ شدن لایه ژئوسنتتیک است. این آسیب‌ها موجب کاهش مقاومت مکانیکی و تغییر خواص هدایت هیدرولیکی ژئوسنتتیک‌ها می‌شود. برای تعیین ضریب کاهش مقاومت ناشی از آسیب‌های نصب و اجرا مطابق روش ارزیابی ASTM D5818، خاکریزی بر روی محصول مطابق مشخصات دانه‌بندی و تراکم طرح اجرا می‌شود، سپس با کنار زدن توده خاکی، محصول ژئوسنتتیک خارج شده و مقاومت کششی آن اندازه‌گیری می‌شود.

در کاربرد تسلیح حداقل جرم واحد سطح ژئوتکتایل باید برابر ۲۷۰ گرم بر متر مربع باشد (FHWA-NHI-10-024، 2009) که متناظر با کلاس یک ژئوتکتایل در AASHTO M288 است. چنانچه نتایج آزمون مبین ضریب کاهش بیش از ۱٫۷ باشد (۴۰ درصد کاهش مقاومت)، ژئوسنتتیک مورد استفاده در خاکریزی باید تعویض شود و از نوع مقاوم‌تری استفاده شود (AASHTO LRFD Bridge Design، 2020).

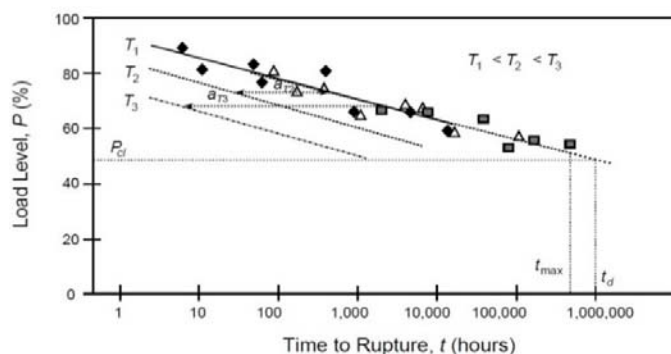
ژئوتکتایل‌ها مطابق ISO 13431 (۱۹۹۹) اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، نمونه به عرض ۲۰۰ میلیمتر تحت اثر بار ثابت به مدت ۱۰۰۰ ساعت (۶ هفته) و یا ۱۰ هزار ساعت (۱٫۱۴ سال) قرار گرفته و ازدیاد طول نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در آزمون خزش به روش ASTM D5262 سطوح مختلف بار تا رسیدن به پارگی به نمونه اعمال می‌شوند. در این استاندارد توصیه شده است برای پیش‌بینی دقیق رفتار خزشی محصولات ژئوسنتتیک، حداقل مدت زمان آزمون خزش برابر با ۱۰ هزار ساعت در نظر گرفته شود. در استاندارد ASTM D6992 با انجام آزمایش در دماهای بالاتر (گام‌های افزایش دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد) فرآیند خزش تسریع شده و امکان حصول نتیجه پیرامون رفتار خزشی محصول در مدت کوتاه‌تری امکان‌پذیر است. برای جلوگیری از تغییر در حالت فیزیکی، برای HDPE، PP و PET حداکثر دمای انجام آزمایش کمتر از ۷۰ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. پس از تعیین زمان پارگی خزشی برای سطوح بار و دمایی مختلف، نمودار تغییرات نسبت مقاومت پارگی خزشی با زمان در سطوح دمایی آزمایش شده رسم می‌شود (شکل ۳). سپس با استفاده از ضریب جابه‌جایی زمان (a_{Ti}) و مطابق رابطه (۱) زمان پارگی خزشی معادل در دمای طرح (t_{amb}) براساس زمان پارگی حاصل از آزمون در دماهای بالاتر (t_{elev}) تعیین می‌شود (شکل ۴). ضریب جابه‌جایی زمان در هر دما (a_{Ti}) براساس محاسبات بهینه‌سازی تعیین می‌شوند.

$$t_{amb} = t_{elev}/a_{Ti} \quad (1)$$

مطابق AASHTO R69 با در دست داشتن مدت زمان طرح (t_d) نسبت مقاومت پارگی خزشی نسبت به نمونه شاهد (P_{cl})



شکل ۳. نمودار تغییرات نسبت مقاومت پارگی خزشی با زمان در مقیاس لگاریتمی در سطوح دمایی آزمایش شده (AASHTO R69، 2015)



شکل ۴. تعیین زمان پارگی خزشی معادل در دمای طرح با استفاده از ضریب a_{T1} (AASHTO R69, ۲۰۱۵)

در این روابط R_1 و R_2 به ترتیب نسبت‌هایی هستند که عدم قطعیت‌های ناشی از برون‌یابی زمانی (در آزمون خزش) و عدم قطعیت‌های آزمون شیمیایی را نمایندگی می‌کنند. t_D برابر با عمر طرح (به ساعت) و t_{max} حداکثر مدت زمان مشاهده شده برای پارگی خزشی به ساعت است. در ضوابط طراحی پل AASHTO (۲۰۲۰) و AASHTO R69 (۲۰۲۰) مقاومت بلندمدت مسلح‌کننده‌های ژئوستنتیکی برابر است با $T_{al} = T_{ult}/RF$ که در آن T_{ult} حداقل میانگین رل (MARV) مقاومت کششی نمونه است و برای ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها به ترتیب از روش‌های آزمون ASTM D4595 و ASTM6637 تعیین می‌شود. RF برابر است با حاصلضرب ضرایب کاهش ناشی از نصب و اجرا، خزش و زوال شیمیایی (RF_D). پس از تعیین ضریب کاهش ناشی از خزش مطابق AASHTO R69 لازم است مقدار این ضریب با ملحوظ نمودن عدم قطعیت‌های ناشی از برون‌یابی داده‌ها برای مدت زمان‌های طولانی مطابق رابطه (۸) اصلاح شود:

$$RF_{CR} = 1.2r^{-1}/P_{CL} \quad (۸)$$

که در آن مقدار r از رابطه (۶) تعیین می‌شود. مطابق ضوابط طراحی پل AASHTO مقدار RF_{ID} و RF_D به ترتیب نباید کمتر از ۱/۰۵ و ۱/۱ باشد. در FHWA (۲۰۰۹) برای دو نوع خاکریز، محدوده ضرایب RF_{ID} برای برخی از محصولات ژئوستنتیکی ارائه شده است (جدول ۵). چنانچه RF_{ID} بیش از ۱/۷ باشد (۴۰ درصد کاهش مقاومت)، از ژئوستنتیک دیگری باید استفاده شود. نحوه تعیین RF_{CR} در بخش ۵-۴ ارایه شده است. در جدول (۶) مقادیر پیشنهادی برای ضریب کاهش RF_{CR} بسته به نوع پلیمر مطابق FHWA (۲۰۰۹) ارایه شده است.

۶- تعیین مقاومت بلند مدت مسلح‌کننده‌های

ژئوستنتیکی

مطابق BS 8006-1 (۲۰۱۰) ارزیابی دوام مسلح‌کننده‌های پلیمری و تعیین مقاومت بلندمدت این مصالح مطابق راهنمای ISO/TR 20432 (۲۰۰۷) انجام می‌شود. مقاومت طرح یا مقاومت بلند مدت مسلح‌کننده‌ها (T_D) از رابطه (۳) تعیین می‌شود:

$$T_D = T_{char}/(RF_{CR} \cdot RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s) \quad (۳)$$

که در آن:

T_{char} مقاومت مشخصه کوتاه مدت مسلح‌کننده، RF_{CR} ضریب کاهش ناشی از خزش، RF_{ID} ضریب کاهش ناشی از نصب و اجرا، RF_W ضریب کاهش ناشی از هوازدگی، RF_{CH} ضریب کاهش ناشی از زوال شیمیایی و f_s ضریب ایمنی به دلیل عدم قطعیت‌های ناشی از برون‌یابی داده‌ها است. ضرایب کاهش مقاومت از نسبت مقاومت اولیه محصول به مقاومت محصول پس از مواجهه با شرایط محیطی به دست می‌آیند و مقدار f_s براساس مقادیر R_1 و R_2 محاسبه می‌شود.

$$f_s = 1 + \sqrt{((1 - R_1)^2 + (1 - R_2)^2)} \quad (۴)$$

$$R_1 = 1.2r^{-1} \quad (۵)$$

$$r = \log(t_D/t_{max}) > 1 \quad (۶)$$

$$R_2 = T_X/T_{LCL} \quad (۷)$$

جدول ۵. مقادیر پیشنهادی برای ضریب کاهشده RF_{ID} بسته به نوع ژئوسنتتیک و خاکریز (FHWA، ۲۰۰۹)

نوع ژئوسنتتیک	خاکریز نوع ۱: حداکثر اندازه دانه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر و D ₅₀ در حدود ۳۰ میلی‌متر	خاکریز نوع ۲: حداکثر اندازه دانه‌ها ۲۰ میلی‌متر و D ₅₀ در حدود ۰٫۷ میلی‌متر
ژئوگرید یک محوره HPDE	۱٫۲-۱٫۴۵	۱٫۱-۱٫۲
ژئوگرید دو محوره PP	۱٫۲-۱٫۴۵	۱٫۱-۱٫۲
ژئوگرید پلی استر با پوشش PVC	۱٫۳-۱٫۸۵	۱٫۱-۱٫۳
ژئوگرید پلی استر با پوشش آکرلیک	۱٫۳-۲٫۰۵	۱٫۲-۱٫۴
ژئوتکتایل بافته (PET و PP)	۱٫۴-۲٫۲۰	۱٫۱-۱٫۴

جدول ۶. مقادیر پیشنهادی برای ضریب کاهشده RF_{CR} بسته به نوع پلیمر (FHWA، ۲۰۰۹)

نوع پلیمر	مقدار ضریب کاهشده RF _{CR}
پلی استر (PET)	۱٫۶-۲٫۵
پلی پروپیلن (PP)	۴-۵
پلی اتیلن (HDPE)	۲٫۶-۵

جدول ۷. الزامات حداقلی مورد نیاز AASHTO R69 برای استفاده از مقادیر پیش‌فرض ضرایب کاهشده

جنس پلیمر	مشخصه	روش آزمون	معیار پذیرش برای استفاده از RF _D پیش فرض
HDPE و PP	هوازگی در برابر تابش UV	ASTM D4355	حداکثر افت مقاومت بعد از ۵۰۰ ساعت مواجهه برابر ۳۰ درصد
PET	هوازگی در برابر تابش UV	ASTM D4355 (۵۰۰ ساعت مواجهه)	حداکثر افت مقاومت برابر ۵۰ درصد (در کمتر از یک هفته مدفون شود) حداکثر افت مقاومت برابر ۳۰ درصد (پس از یک هفته مدفون شود)
HDPE و PP	مقاومت در برابر اکسیداسیون	EN 13438	PP از روش A، حداکثر افت مقاومت بعد از ۲۸ روز مواجهه برابر ۵۰ درصد HDPE از روش B، حداکثر افت مقاومت بعد از ۵۶ روز مواجهه برابر ۵۰ درصد
PET	مقاومت در برابر هیدرولیز	ASTM D4603	حداقل وزن مولکولی ۲۵۰۰۰ g/mol
PET	مقاومت در برابر هیدرولیز	ASTM D7409	حداکثر مقدار CEG برابر ۳۰ mEq/g
تمام پلیمرها	درصد وزنی مواد بازیافتی پسمصرف	-	حداکثر صفر درصد

۱٫۳ در نظر گرفت. در خاک‌های طبیعی با دمای بالاتر از ۲۵ درجه، در صورت تامین معیارهای جدول (۷)، مقدار RF_D به ۱٫۵ افزایش می‌یابد.

مطابق ضوابط طراحی پل AASHTO (۲۰۲۰) در خاک‌های طبیعی (pH مابین ۴٫۵ تا ۹ و دما کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد) چنانچه مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک از جنس HDPE، PET و PP باشند و معیارهای پلیمری و فیزیکی ارایه شده در جدول (۷) را برآورده نمایند، مقدار RF_D را می‌توان برابر با

۷- تعیین عمر بهره‌برداری ژئوسنتتیک‌های به کار رفته در راهسازی

در پیوست ب استاندارد BS EN 13249 (۲۰۱۶)، آزمون‌های شاخص و غربال‌گری لازم برای تخمین عمر بهره‌برداری محصولات ژئوسنتتیک مورد استفاده در راهسازی ارائه شده است. مطابق BS EN 13249 در ارزیابی دوام و تعیین عمر بهره‌برداری محصولات ژئوسنتتیک باید موارد زیر مورد ملاحظه قرار گیرد.

الف) در کاربردهایی که عمر بهره‌برداری محصول ژئوسنتتیک کمتر از ۵ سال است، در صورت نیاز فقط آزمون هوازدگی و افت مقاومت در اثر نصب، انجام شده و اثرات آن بر محصول ارزیابی می‌شود.

ب) برای محصولات ژئوسنتتیک با مواد اولیه از نوع پسا صنعت^۱ (PIM) و پسا مصرف^۲ (PCM)، که در خاک‌های طبیعی و با عملکردهایی غیر از تسلیح استفاده می‌شوند، حداکثر عمر بهره‌برداری برابر با ۵ سال است.

ج) برای محصولات ژئوسنتتیک تولید شده از مواد اولیه بکر و یا باز استفاده شده^۳ (RWM)، که در خاک‌های طبیعی استفاده می‌شوند، براساس نتایج آزمون‌های غربال‌گری، عمر بهره‌برداری محصول ژئوسنتتیک قابل تعیین است.

نوع آزمون‌های غربال‌گری براساس عملکرد محصول و جنس رزین محصول مشخص می‌شوند.

د) در حالات زیر لازم است تا رفتار بلند مدت محصول ژئوسنتتیک با استفاده از آزمون‌های عملکردی مورد بررسی قرار گیرد.

- در کاربردهایی که عمر بهره‌برداری بیش از ۵۰ سال است.
- در خاک‌های با شرایط محیطی مهاجم (مانند محیط‌های با pH کمتر از ۴ و یا محیط‌های به شدت بازی در مجاورت آهک، سیمان و یا بتن با pH بزرگتر از ۹)

- استفاده از پلی‌آمید در محیط‌های با اسیدهای هوازی در مدفن‌های پسماند و خاک‌های آلوده.

- در کاربردهایی که ژئوسنتتیک برای مدت قابل ملاحظه در معرض دمای بیش از ۲۵ و یا کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد است.

- استفاده از مواد بازیافتی در تولید ژئوسنتتیک.

۷-۱- تعیین عمر بهره‌برداری در خاک طبیعی

برای محصولات ژئوسنتتیک تولید شده از مواد اولیه بکر و یا باز استفاده شده (RWM) که در خاک‌های طبیعی با دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد و pH مابین ۴ تا ۹ استفاده می‌شوند، آزمون‌های غربال‌گری مورد نیاز برای تعیین عمر بهره‌برداری بسته به عملکرد و نوع رزین محصول ژئوسنتتیک، در جداول (۸) تا (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۸. نحوه تعیین عمر بهره‌برداری محصول ژئوسنتتیک از جنس پلی‌استر (PET)

نوع عملکرد	آزمون شاخص / غربال‌گری	روش آزمون	معیار پذیرش	عمر بهره‌برداری
مسلح‌کننده	تعیین تعداد گروه‌های انتهایی اسید کربوکسیلیک (CEG)	ASTM D7409	حداکثر ۳۰ (mEq/g)	-
	تعیین وزن مولکولی متوسط (M_n)	ASTM D4603	حداقل ۲۵۰۰۰ (g/mol)	-
غیر از مسلح‌کننده	تعیین مقاومت در برابر هیدرولیز	EN 12447	حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۲۸ روز مواجهه	۲۵ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۵۶ روز مواجهه	۵۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۱۱۲ روز مواجهه	۱۰۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۱۴ روز مواجهه	۲۵ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۲۸ روز مواجهه	۵۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۵۶ روز مواجهه	۱۰۰ سال

در آزمون هیدرولیز دما برابر با ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۹. نحوه تعیین عمر بهره برداری محصول ژئوسنتتیک از جنس پلی‌الفین‌ها (PP,PE)

نوع عملکرد	آزمون غربال‌گری	روش آزمون	معیار پذیرش	عمر بهره‌برداری
کلیه عملکردها	تعیین مقاومت در برابر اکسیداسیون	EN 13438	حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۲۸ روز مواجهه	۲۵ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۵۶ روز مواجهه	۵۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۱۱۲ روز مواجهه	۱۰۰ سال

جدول ۱۰. نحوه تعیین عمر بهره برداری محصول ژئوسنتتیک از جنس پلی‌آمید (PA) و آرامید (AR)

نوع عملکرد	آزمون غربال‌گری	روش آزمون	معیار پذیرش	عمر بهره‌برداری
کلیه عملکردها	تعیین مقاومت در برابر اکسیداسیون	EN 13438	حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۲۸ روز مواجهه	۲۵ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۵۶ روز مواجهه	۵۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۱۱۲ روز مواجهه	۱۰۰ سال
کلیه عملکردها	تعیین مقاومت در برابر هیدرولیز	EN 12447	حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۲۸ روز مواجهه	۲۵ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۵۶ روز مواجهه	۵۰ سال
			حفظ حداقل ۵۰ درصد مقاومت طی ۱۱۲ روز مواجهه	۱۰۰ سال

پس از تعیین "عمر بهره‌برداری" محصول لازم است در فرم اطلاعات محصول ذکر شود که این محصول در خاک طبیعی با pH مابین ۴ تا ۹ و دمای خاک کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد براساس نتایج آزمون بدست آمده به مدت (عمر بهره‌برداری به دست آمده) دارای دوام است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله شرایط محیطی مسبب زوال و انواع ساز و کارهای زوال ژئوسنتتیک‌ها (هوازدگی، اکسیداسیون، هیدرولیز، خزش، نصب و اجرا) مرور شده و روش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته برای شبیه‌سازی شرایط محیطی معرفی و مقایسه شده‌اند. براساس روش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته نحوه تعیین ضرایب کاهشدهنده و عمر بهره‌برداری ژئوسنتتیک‌های مورد استفاده در پروژه‌های راهسازی بسته به نوع پلیمر، شرایط محیطی و نوع کاربری شرح داده شده است.

تنوع بالای محصولات ژئوسنتتیک از نظر نوع پلیمر، ساختار محصول، روش تولید و کاربرد آن منجر به تعدد آزمون‌های ارزیابی مشخصات فنی کوتاه مدت و بلند مدت محصولات ژئوسنتتیک شده است.

همانطور که در جداول مشاهده می‌شود، معیار "پایان عمر" در پیوست ب BS EN 13249 (۲۰۱۶) برابر با حداکثر ۵۰ درصد کاهش مقاومت کششی است. به این منظور لازم است آزمون‌های شاهد و پیرشده مطابق روش تسریع شده نظیر زوال محتمل آماده شده و مقدار مقاومت کششی باقی‌مانده در آزمون‌های پیر شده، تعیین شود.

برای تعیین عمر بهره‌برداری مسلح‌کننده‌ها از جنس پلی‌استر مطابق جدول (۸) لازم است، علاوه بر آزمون غربال‌گری تعیین میزان افت مقاومت در برابر هیدرولیز، شاخص‌های تعداد گروه‌های انتهایی اسید کربوکسیلیک (CEG) و وزن مولکولی متوسط نیز تعیین شوند. مطابق جدول (۹) برای تعیین عمر بهره‌برداری محصولات پلی‌الفین در کلیه عملکردها، انجام آزمون اکسیداسیون الزامی است. شایان توجه است که آزمون باید تماماً از جنس پلی‌پروپیلن و یا پلی‌اتیلن باشد. آزمون‌های لازم برای تعیین عمر بهره‌برداری محصولات پلی‌آمید (PA-6)، (PA-6.6) و آرامید (AR) در کلیه عملکردها در جدول (۱۰) رایج شده است. در این محصولات لازم است دوام در برابر هیدرولیز و اکسیداسیون مورد بررسی قرار گیرد.

ژئوستتیک مورد استفاده در خاکریزی باید تعویض شود و از نوع مقاومتری استفاده شود.

ساز و کارهای زوال محتمل محصولات ژئوستتیک براساس نوع پلیمر، نوع کاربری، شرایط محیطی و بارهای وارده تعیین می‌شود. اکثر روش‌های آزمون آزمایشگاهی توسعه یافته برای ارزیابی دوام محصولات ژئوستتیک از نوع آزمون‌های غربالگری (شرایط محیطی تسریع شده) هستند و برای ارزیابی دوام محصولات ژئوستتیک در محیط‌های با خاک طبیعی ($pH < 4$) و دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد) توسعه یافته‌اند. در محیط با شرایط خاک مهاجم لازم است از آزمون‌های عملکردی استفاده شود. برای محصولات ژئوستتیک با مواد اولیه از نوع پسا صنعت (PIM) و پسا مصرف (PCM) در خاک‌های طبیعی و با عملکردهایی غیر از تسلیح، حداکثر عمر بهره‌برداری برابر با ۵ سال است. برای ارزیابی میزان هوازگی ژئوستتیک‌ها در معرض تابش UV باید در نظر داشت که مقدار تابش طیفی در استانداردهای ASTM D4355 و ASTM D7238 و EN12224 به ترتیب برابر ۰,۳۵، ۰,۷۸ و ۰,۰۸ $W/(m^2 \cdot nm)$ است. در نتیجه شار انرژی تابش لامپ فلورسانت UVA 340 برای ۵۰۰ ساعت تابش در هر یک از این روش‌های آزمایش به ترتیب برابر با ۲۱۵، ۴۷۰ و ۵۰ MJ/m^2 است.

۹- پی‌نوشت‌ها

1. Screening test
2. Index test
3. Spectral irradiance
4. Radiant exposure
5. Arrhenius Law
6. Post-industrial material
7. Post-consumer material
8. Reworked material

۱۰- مراجع

- Allen S.R., (2016), "9- Geotextile durability" Editor(s): R.M. Koerner, Geotextiles from design to applications, Woodhead Publishing, ISBN 9780081002216, pp. 177-215. Doi.org/10.1016/B978-0-08-100221-6.0009-7.
- AASHTO M288, (2021), "Geosynthetic Specification for Highway Applications AASHTO R69, (2015), "Standard Practice for Determination of Long-Term Strength for Geosynthetic Reinforcement".
- AASHTO LRFD, "Bridge design specification (2020) 9th Edition.
- ASTM D5819, (2022), "Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability".
- ASTM D4355, (2020), "Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light", Moisture, and Heat in a Xenon Arc-Type Apparatus.
- ASTM D7238, (2020), "Standard Test Method for Effect of Exposure of Unreinforced Polyolefin Geomembrane Using Fluorescent UV Condensation Apparatus".
- ASTM D5262, (2021), "Standard Test Method for Determining the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Planar Geosynthetics Used for Reinforcement Purposes".
- ASTM D6992, (2016), "Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method".
- ASTM D5818, (2022), "Standard Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics".

تغییر میزان آنتی‌اکسیدان موجود در محصول ژئوستتیک، با استفاده از آزمون‌های OIT و HP-OIT قابل اندازه‌گیری است. براساس تفاوت‌های مقدار OIT در دو محصول نمی‌توان رزین‌ها را از نظر پایداری در برابر اکسیداسیون، طبقه‌بندی نمود. لیکن تغییرات مقدار OIT در یک محصول شاخصی برای ارزیابی دوام محصول تحت اثر مواجهه با شرایط محیطی است.

برای ارزیابی میزان مقاومت ژئوستتیک‌ها از نوع پلی‌استرها در برابر هیدرولیز انجام آزمون‌های شاخص تعیین گروه انتهایی اسید کربوکسیلیک (CEG) و تعیین وزن مولوکلی (M_n) پیشنهاد شده است. برای مسلح‌کننده‌های پلی‌استری لازم است میزان CEG کمتر از ۳۰ mEq/g و مقدار M_n بیش از ۲۵۰۰۰ g/mol باشد.

پس از تعیین زمان پارگی خزشی در دمای طرح لازم است اثر عدم قطعیت‌های ناشی از برون‌یابی داده‌ها در تصحیح ضریب کاهنده ناشی از خزش مورد ملاحظه قرار گیرد.

چنانچه ضریب کاهنده بدست آمده برای افت ناشی از نصب و اجرا بیش از ۱,۷ باشد (۴۰ درصد کاهش مقاومت)،

- ISO/TS 13434, (2020), "Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability".
- ISO 13431, (1999), "Geotextiles and geotextile-related products — Determination of tensile creep and creep rupture behaviour".
- Koerner R.M., (2016), "10 - Long-term geotextile degradation mechanisms and exposed lifetime predictions" Editor(s): R.M. Koerner, Geotextiles from design to applications, Woodhead Publishing, ISBN 9780081002216, pp.217-236.
Doi.org/10.1016/B978-0-08-100221-6.0010-3.
- Koerner G.R., Hsuan Y.G., Koerner R.M., (2007), "3 - The durability of geosynthetics" Editor(s): R.W. Sarsby, Geosynthetics in Civil Engineering, In Woodhead Publishing Series in Textiles, Geosynthetics in Civil Engineering, Woodhead Publishing, ISBN 9781855736078. pp. 36-65.
Doi.org/10.1533/9781845692490.1.36.
- Shukla S.K., (2016), "An Introduction to Geosynthetic Engineering", London CRC Press.
- BS 8006-1, (2010), "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- BS EN 13249, (2016), "Geotextiles and geotextile-related products", Characteristics required for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion).
- BS EN 13438, (2018), "Geosynthetics - Screening test method for determining the resistance of geotextiles and geotextile-related products to oxidation".
- BS EN 12447, (2021), "Geotextiles and geotextile-related products - screening test method for determining the resistance to hydrolysis in water".
- EN 12224, (2000), "Geotextiles and geotextile-related products", Determination of the resistance to weathering.
- FHWA-NHI-10-024, (2009), "Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Vol. I.
- ISO/TR 20432, (2007), "Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement".

Determining The Long-Term Strength and The Service Life of The Geosynthetics Used in Road Constructions

Nahid Attarchian, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: n.attarchian@bhrc.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT

The durability assessment of geosynthetics in the separation, filtration and drainage applications, leads to determining the service life of the product. For geosynthetic reinforcements, it is necessary to determine the long-term performance and estimate the strength reduction factors. The strength reduction factors and the service life of the geosynthetics are determined based on the type of the polymer, short-term characteristics and long-term behavior of these materials under the effects of environmental conditions and loads. In recent years, several accelerated methods have been developed to evaluate the durability of geosynthetic products and several studies have been conducted to assess the durability of these products against a variety of chemical and mechanical deterioration mechanisms. In this paper, the concepts related to durability assessment, determination of the service life, parameters affecting the durability of geosynthetic products, environmental conditions causing deterioration and various chemical and mechanical mechanisms of deterioration (weathering, oxidation, hydrolysis, creep, installation damage) have been reviewed. In the end, methods for determining the long-term strength and service life of geosynthetics used in road construction projects depending on their application, polymer type and environmental conditions are explained.

Keywords: Geosynthetics, Durability, Long Time Strength, Road Construction, Service Life