هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

تعیین عرض بهینه ترانشه دفن پسماند پرتوزا با استفاده از روش اجزا محدود؛ مطالعه موردی پسماندگاه انارک

دانیال قدیانی[۱،۲]، سعید زارع گنجارودی[۱،۲]، امیرمسعود طاهریان[۲]، علی مالکی فارسانی[۲]

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

۲- شرکت مدیریت پسماندهای پرتوزای ایران، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۵۹۳۱، تهران، ایران، d.ghadyanii@aut.ac.ir

چکیده

پسماند تولیدی در صنعت هسته‌ای نیازمند مدیریت و نگهداری نظیر دفن در تاسیسات یا پسماندگاه بوده تا انسان و محیط‌زیست از آثار مخرب رادیواکتیو آن مصون باشند. هدف از ارائه این مقاله، تعیین عرض بهینه جهت طراحی هندسه ترانشه دفن پسماند پرتوزای تولیدی در راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر با استفاده از روش اجزا محدود می‌باشد. از این‌رو، جهت تحلیل میزان نشست و کرنش پلاستیک لایه‌های پوشش، مدل عددی دو بعدی ترانشه دفن به همراه مولفه‌های آن با استفاده از روش اجزا محدود انجام شد. همچنین سعی گردید تا با انتخاب مواد مناسب در لایه‌های مختلف پوشش از نشست و تغییرشکل‌های بیش از حد و همچنین تسلیم لایه نفوذناپذیر و لایه زیرین پوشش در هر عرضی بین ۹ متر تا ۱۵ متر، جلوگیری گردد. نتایج نشان داد، تعیین هندسه مناسب ترانشه دفن به پارامترهای مختلفی نظیر تنش برشی، القایی و کرنش پلاستیک وابسته است. همچنین، مطابق با پارامترهای فنی طراحی و مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه، عرض ۱۳ متر جهت طراحی ترانشه دفن پسماند پرتوزا در انارک مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پسماند، ترانشه، راکتور VVER-1000، روش اجزا محدود، کرنش پلاستیک

مقدمه

سیستم طبقه‌بندی پسماندهای پرتوزای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی بر اساس ویژگی‌های پسماند و محتوای رادیواکتیو، چارچوبی را برای تعریف یک رویکرد عمومی برای مدیریت پسماندهای پرتوزا فراهم می‌کند [۱]. سیستم طبقه‌بندی، گزینه‌های دفن بالقوه را برای دسته‌های مختلف پسماند بر اساس ویژگی‌های خاص آن‌ها معرفی می‌کند. به عنوان مثال، دفن زمین‌شناسی، یعنی استقرار در اعماق صدها متری، برای دفن پسماندهای سطح بالا و با عمر طولانی توصیه می‌شود. دفن نزدیک به سطح به عنوان یک گزینه مناسب برای دفع رادیونوکلئیدهای حاوی با عمر کوتاه در نظر گرفته می‌شود که در طی چند دهه یا قرن به سطوح تابش ناچیز تجزیه می‌شوند [۱-۳].

طبق آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، دفن نزدیک سطح می‌تواند شامل انواع مختلفی از تاسیسات دفن باشد. متداول‌ترین تأسیسات نزدیک سطح، شامل واحدهای دفن است که در اعماق تنها چند متر قرار دارند. تأسیساتی که پسماندها در عمق چند ده متری در حفره‌های سنگی و گمانه‌ها قرار می‌گیرند نیز به عنوان تأسیسات دفن سطحی در نظر گرفته می‌شوند [۴].

بشکه‌های حاوی پسماندهای پرتوزا، نیاز به دفن در تاسیسات یا پسماندگاه‌های هسته‌ای داشته تا از تماس با انسان و محیط زیست مصون باشند و تهدیدی برای سلامتی انسان و محیط ایجاد ننمایند [۵]. در نتیجه، برای دفن و نگهداری بشکه‌ها، باید تعدادی ترانشه کم‌عمق حفاری شود. از آنجایی که ترانشه‌ها به طور مستقیم با زمین و محیط در تماس هستند، بنابراین لزوم طراحی و اجرای صحیح ترانشه‌های دفن پسماند پرتوزا اهمیتی دوچندان پیدا می‌کند. از طرفی دیگر به دلیل استفاده دراز مدت از ترانشه‌ها (حداقل ۷۰ سال) به عنوان مرکز دفن و نیاز به پایش طولانی آنها (حداقل ۳۰۰ سال)، طراحی باید به گونه‌ای صورت گیرد که کمترین خطری محیطزیست و انسان‌ها را در آینده تهدید نکند.

تاکنون مطالعاتی در زمینه مختلف دفن پسماند پرتوزا در قالب گزارشات و مقالات در دنیا انجام شده است. گوانگ و ویلفرد در سال ۲۰۲۳ میلادی مقاله‌ای در زمینه یادگیری ماشین مبتنی بر داده برای دفع پسماند هسته‌ای سطح بالا را چاپ کردند [۶]. در مطالعه‌ای دیگر، موضوع حلالیت نیوبیم در سیستم‌های سیمانی مربوط به دفع پسماند هسته‌ای؛ مشخصه فازهای جامد کنترل‌کننده حلالیت توسط یانگیوم و همکارانش در سال ۲۰۲۲ میلادی بررسی شد که نتایج آن چاپ گردید [۷]. در سال ۲۰۲۲ میلادی، مقاله‌ای در زمینه انتشار آلاینده ها و مواد با نفوذ آب در یک ترانشه دفن مواد رادیواکتیو توسط یانگیوم و همکارانش چاپ شد [۸]. همچنین، مطالعه بر روی تاثیرات ژئوشیمیایی ترانشه دفن پسماند در سایت چرنوبیل در بررسی روندهای بلندمدت و انتشار رادیونوکلئیدها توسط بوگای و همکارانش در سال ۲۰۱۲ میلادی ارائه شد [۹].

در خصوص دفن پسماند پرتوزا مطالعات گسترده‌ای انجام شده است که اکثر این مطالعات مربوط به نوع پسماندهای پرتوزای با نیمه عمر بالا بوده است که بر طبق دسته‌بندی آژانس بین المللی انرژی اتمی باید به روش دفن در اعماق زمین یا روش‌های دیگر دفن گردند. از این رو با توجه به نوع پسماند ایران، این مقاله به طراحی ترانشه دفن نزدیک سطح زمین پرداخته است.

روش کار

با توجه به نوع دفن (ترانشه نزدیک سطح) باید مسائل پایداری و ایمنی دیواره‌های ترانشه حفاری شده مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه می‌توان در ابتدای امر با روش‌هایی عددی که از نظر زمان و هزینه نسبت به دیگر روش‌ها آسان‌تر و در دسترس هستند استفاده کرد. باید در نظر داشت که برای طراحی مناسب باید نوع مسئله به درستی تعیین گردد [۱۰-۱۱]. در این مقاله سعی شده است یکی از پارامترهای مهم در ایمنی ترانشه دفن که عرض ترانشه است مورد بررسی قرار گیرد.

تعیین عرض بهینه ترانشه‌های نزدیک سطح به منظور دفن پسماندهای هسته‌ای یکی از بخش‌های اساسی و ویژه طراحی ترانشه و تحلیل ایمنی آن می‌باشد؛ چرا که ساختار ساده اما دارای پیچیدگی ذاتی این نوع سازه‌ها باعث چشم‌پوشی از بسیاری از مطالعات ژئومکانیکی این سازه‌های پرخطر هم از بابت تخریب مکانیکی دیواره ترانشه و پوشش آن و هم از بابت مشکلات زیست محیطی و ارتباط با مواد پرتوزای درون سازه خواهد شد.

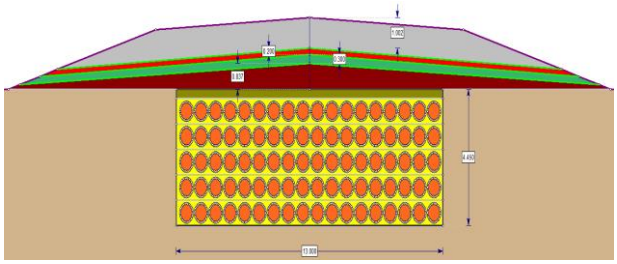
تعیین عرض بهینه ترانشه دفن بر اساس مطالعه بر روی کمترین اثر تغییرشکل بر لایه نفوذناپذیر پوشش چندلایه انجام شده است. به منظور تحلیل میزان نشست و کرنش پلاستیک لایه‌های پوشش، نیاز به ساخت مدل ژئومکانیکی کاملی از ترانشه دفن به همراه بشکه‌ها، خاک دربرگیرنده و لایه‌های پوشش می‌باشد. بدین منظور، مدل عددی دو بعدی ترانشه دفن به همراه متعلقات درونی آن با نرم‌افزار به روش اجزا محدود به منظور تحلیل پایداری ترانشه ساخته شد. مراحل مدلسازی ژئومکانیکی به ترتیب با ساخت هندسه مدل آغاز خواهد شد و پس از اختصاص دادن خواص توده‌سنگ و اعمال بارگذاری و شرایط مرزی مدل، مش‌بندی شده و تحلیل می‌گردد.

در این مطالعه، هدف اصلی از ساخت مدل ژئومکانیکی کامل از سازه ترانشه، برآورد میزان نشست پوشش و تحلیل کرنش پلاستیک و تسلیم رخ داده شده در لایه‌های پوشش براساس تغییر و بهینه‌سازی خصوصیات الاستوپلاستیک لایه‌های پوشش در عرض‌های ۹ تا ۱۵ متری، می‌باشد. بدین صورت که با انتخاب مواد مناسب و بهینه در لایه‌های مختلف پوشش از نشست و تغییر شکل‌های بیش از حد و همچنین تسلیم لایه نفوذناپذیر و لایه زیرین پوشش در هر مقدار عرضی بین ۹ متر تا ۱۵ متر در هندسه مورد بررسی جلوگیری گردد.

ترانشه دفن پسماند پرتوزا طراحی شده شامل سه بعد طول، عرض و ارتفاع است که طول آن ۳۳ متر، و ارتفاع آن ۴/۴۵ متر با ۵ لایه بشکه‌گذاری انتخاب شده است. یکی از مسائل مهم در طراحی، دستیابی به عرض بهینه ترانشه می‌باشد که برای این منظور چهار عرض ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ متری در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

برای ساخت یک ترانشه با در نظر داشتن جایگذاری ۵ لایه بشکه پسماند، باید قطر بشکه و فاصله پرشونده بین دو ردیف در نظر گرفته شود. طبق مطالعات و امکانات موجود این فاصله ۰/۸۳ متر است. در نتیجه ۵ لایه ۰/۸۳ متری، ارتفاعی برابر ۴/۱۵ متر برای حفر ترانشه نیاز دارد.

ذکر این نکته ضروری است که، یک لایه ۳۰ سانتی‌متری به عنوان لایه نهایی، ترانشه دفن را پر خواهد کرد که در این صورت عمق نهایی ترانشه در حالت ۵ لایه برابر ۴/۴۵ شده است. لازم به ذکر است پوشش چندلایه شامل ۴ لایه است که مشخصات آن به همراه ترانشه در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمایی از هندسی ترانشه و پوشش چندلایه دفن پسماند

مطابق شکل (۱)، عرض و عمق ترانشه دفن به ترتیب ۱۳ و ۴/۴۵ متر در نظر گرفته شده است که فاصله بین هر ردیف بشکه با خاک پرکننده پر خواهد شد که این فاصله برابر ۲۲ سانتی‌متر است. پوشش چندلایه به ۴ لایه تقسیم می‌شود. لایه اول (L1) یا لایه نفوذناپذیر که از ترکیب وزنی ۹۰ درصد خاک آبرفت منطقه که از الک ۵ میلی‌متر

عبور کرده و ۱۰ درصد وزنی بنتونیت می‌باشد تشکیل و تا ۹۰ درصد تراکم تا ارتفاع حدود ۸۰ سانتی‌متر اجرا خواهد شد. لایه دوم (L2) که لایه زهکش نامیده می‌شود از ترکیب شن با اندازه ۶ الی ۱۹ میلی‌متر تشکیل شده است و با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر اجرا می‌شود. لایه سوم (L3) لایه مانع زیستی است که از جهت جلوگیری از نفوذ جانوران با عمق ۲۰ سانتی‌متر و از شن ۱۹ الی ۲۵ میلی‌متر طراحی شده است. لایه نهایی (L4) که خاک طبیعی منطقه می‌باشد و با ارتفاع حدود یک متر اجرا می‌گردد.

پس از اعمال مش‌بندی نوبت به اعمال خواص توده‌سنگ، لایه-های پوشش، خاک پرکننده و بتن پرکننده بشکه، به مدل می‌رسد. هر مدل بلوکی به نحوی انتخاب می‌شوند که بیانگر نوع خاصی از رفتار ساختاری و معمولاً مربوط به خواص زمین باشد. مدل تهی برای بیان ماده‌ای است که از مدل حذف شده است.

مدل الاستیک ایزوتروپ برای مواد همگن، ایزوتروپیک و پیوسته بوده که رفتار تنش – کرنش خطی از خود نشان می‌دهند. از یوس دیگر، مدل الاستیک غیرایزوتروپ؛ برای مواد الاستیکی مناسب است که از خود آنیزوتروپی الاستیک کاملاً بارزی را نشان می‌دهند. مدل پلاستیسیته موهر-کولمب یا هوک و براون برای موادی استفاده می‌شود که به هنگام قرارگیری در معرض بار برشی دچار تسلیم می‌شوند و تنش تسلیم آنها، تنها به تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر بستگی دارد و تنش اصلی میانی اثری بر تسلیم نخواهد داشت. از میان این معیارها با توجه به تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف محیط حفاری ترانشه، معیار هوک و براون برای تحلیل عددی توده‌سنگ و معیار موهر – کولمب برای بشکه‌ها و لایه‌های پوشش چندلایه انتخاب شده است. خواص مواد به کار برده شده در مدلسازی پوشش چندلایه، بشکه و خاک در جدول (۱) لیست شده است.

جدول ۱: خواص مواد به کار برده شده در مدلسازی پوشش چندلایه، بشکه و خاک

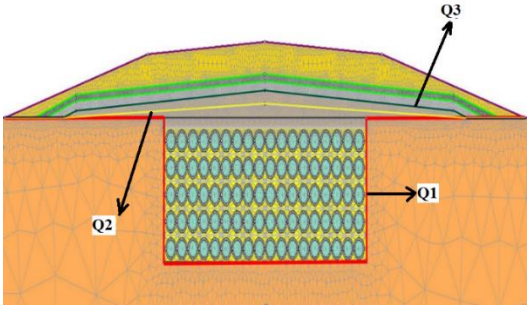
لایه	ماده	ماژول یانگ (KPa)	چگالی (KN/m^2)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
L1	خاک + بنتونیت	۶۴۱۲/۵۷	۱۸/۰۶۳	۹/۳	۲۹
L2	شن ۶ الی ۱۹ میلی‌متر	۱۰۰,۰۰۰	۲۱	۰	۴۰
L3	شن ۱۹ الی ۲۵ میلی‌متر	۱۰۰,۰۰۰	۲۱	۰	۴۰
L4	خاک آبرفت	۱۲,۶۰۰	۱۶/۹۶۶	۳۳	۳۳
خاک پرکننده	شن ۱۲ الی ۱۹ میلی‌متر	۱۰۰,۰۰۰	۲۱	۰	۴۰
بشکه	بتن پرکننده بشکه	۳,۷۵۰,۰۰۰	۱۰/۳	۵۲۰	۲۰/۸

در این مطالعه، بر اساس میزان نشست نهایی و تغییرشکل پلاستیک یا تسلیمی که در مواد پوشش چندلایه رخ خواهد داد، عرض بهینه از میان چهار عرض مشخص ۹ متر، ۱۱ متر، ۱۳ متر و ۱۵ متر که قابلیت اجرایی حفر خواهند داشت، انتخاب خواهد شد.

نتایج

هدف اصلی از این مطالعه برآورد عرض بهینه ترانشه براساس میزان کرنش‌های پلاستیک و تسلیم لایه‌های پوشش ۴ لایه می‌باشد چرا که دو لایه اصلی زیرین پوشش نقش محافظ و سد طبیعی در برابر نفوذ سیال را ایفا می‌کنند و نباید به هیچ عنوان در طول بهره‌برداری دچار تسلیم و برش شوند. جهت دستیابی به این منظور در هر بخش حداکثر کرنش پلاستیک رخ داده، تنش برشی، نقاط تسلیم و نشست رخ داده در مدل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

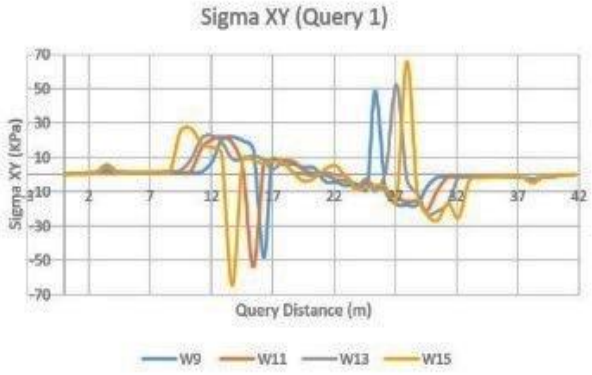
برای بررسی دقیق‌تر نتایج بدست آمده از مدلسازی، نقاطی که تغییرات در آن بیشتر رخ داده بود مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور طبق شکل (۲)، سه خط هادی با نام‌های Q1، Q2 و Q3 جهت بررسی تنش برشی، نشست، کرنش پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که از شکل مشخص است هر کدام از این خطوط محدود پوشش را به طور کامل در برمی‌گیرند و تفاوت آن‌ها در این است که خط Q1، محدوده ترانشه را نیز مورد مطالعه قرار داده و تفاوت خط Q2 و Q3 در این است که خط Q2 از وسط لایه L1 عبور می‌کند و خط Q3، خطی بین لایه L1 و لایه L2 است.



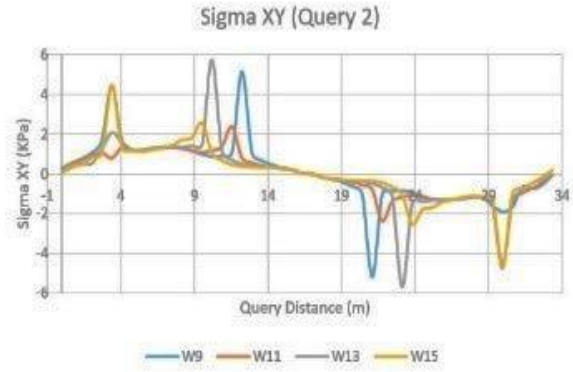
شکل ۲: نمایی از خطوط مورد مطالعه در مدل‌ها

شکل (۳)، نمایانگر تنش برشی رخ داده در سه خط هادی مورد بررسی است. همان‌طور که در قسمت (الف) مشخص است تنش برشی در گوشه‌های ترانشه در عرض ۹، ۱۱ و ۱۵ متر نسبت به عرض ۱۳ متر بسیار بیشتر است و در گوشه‌های ترانشه در عرض‌های مذکور تمرکز تنش وجود دارد. این نکته لازم به ذکر است با توجه به چسبندگی توده-سنگ که در حدود ۵۰۸ کیلوپاسکال است و بیشترین تنش برشی رخ داده در گوشه ترانشه با عرض ۱۵ متر که در حدود ۷۰ کیلوپاسکال

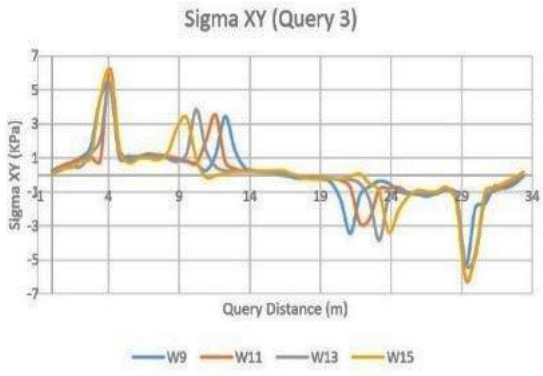
است، فاصله چشم‌گیر و ضریب ایمنی مناسبی دارد. قسمت (ب) نشان‌دهنده خط هادی عبوری از مرکز لایه نفوذناپذیر است که نشان‌دهنده تنش برشی در حدود ۶ کیلوپاسکال برای عرض ۱۳ متر است که با توجه به چسبندگی ۹/۳ لایه مذکور ضریب ایمنی در حدود ۱/۵ برای این قسمت محاسبه شده است که قابل قبول می‌باشد. از طرفی، قسمت (ج) نشان‌دهنده خط بین لایه نفوذناپذیر و زهکش است که بیشترین تنش برشی در اطراف پوشش و در حدود ۶ کیلوپاسکال است که این ناحیه با توجه به هم مرز بودن با لایه زهکش که بنا بر نوع مواد استفاده شده در آن فاقد چسبندگی است، باید مورد کنترل قرار گیرد تا قسمت مذکور در پوشش چندلایه دچار شکست نگردد.



(الف)



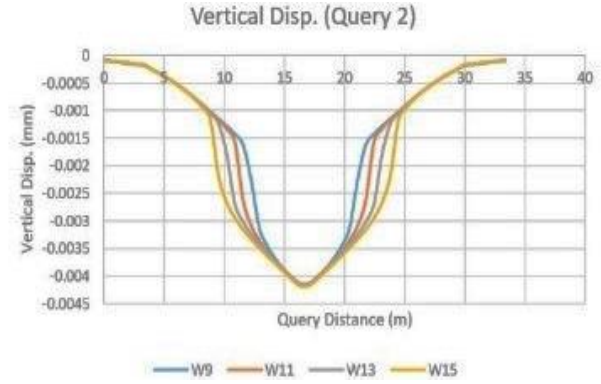
(ب)



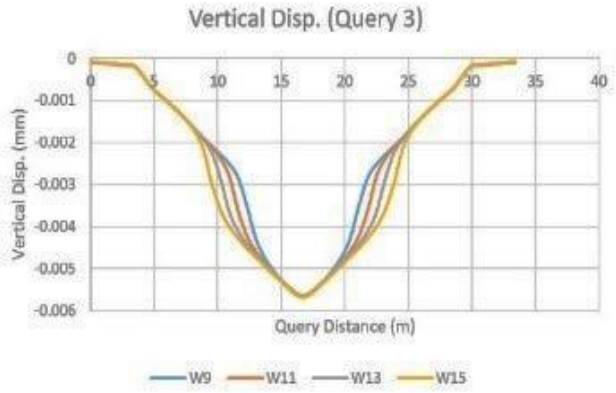
(ج)

شکل ۳: تنش برشی مورد بررسی در خطوط هادی

شکل (۴)، نشان‌دهنده نشست رخ داده در پوشش چندلایه با عرض‌های مختلف ترانشه است. با توجه به اینکه نشست گوشه‌های ترانشه موضوعیت ندارد، به این موضوع پرداخته نشده است. طبق قسمت‌های (الف) و (ب) که تقریباً یکسان هستند، بیشترین نشست در مرکز ترانشه رخ داده و در عرض‌های مختلف ترانشه یکسان است که ناشی از وزن تاج پوشش چندلایه است که با توجه به ارتفاع یکسان در همه مدل‌ها قابل پیش‌بینی بود. اما تفاوت در جایی رخ می‌دهد که با افزایش عرض ترانشه میزان دامنه نشست در کناره‌های پوشش چندلایه افزایش پیدا می‌کند که این موضوع در شکل به وضوح قابل رویت است.



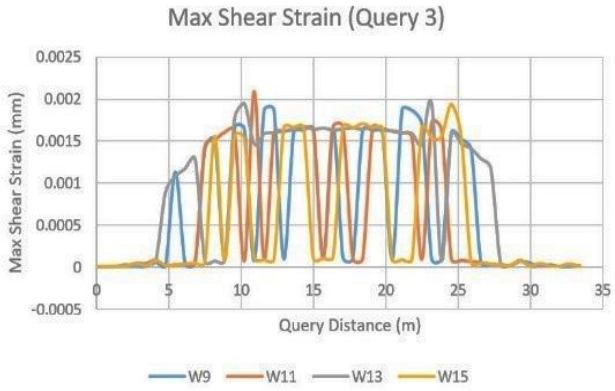
(الف)



(ب)

شکل ۴: نمایی از نشست رخ داده در خطوط هادی

در نهایت، شکل (۵)، نشان‌دهنده حداکثر کرنش برشی رخ داده در خط مرزی بین لایه نفوذناپذیر و زهکش مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشخص است دامنه تغییرات در امتداد خط مورد بررسی زیاد است و این تغییرات در کمترین حالت در حدود یک میلی‌متر کرنش پلاستیک می‌باشد. طبق شکل، با افزایش عرض ترانشه میزان تغییرات کرنش پلاستیک کمتر شده است.



شکل ۵: نمایی از کرنش پلاستیک در خط Q3

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی عرض ترانشه دفن پسماند پرتوزا نزدیک سطح بر اساس رفتار الاستوپلاستیک پوشش چندلایه ترانشه دفن، میزان تنش القایی در لایه‌های ۱ و ۲ پوشش و میزان نشست آنها می‌باشد. بر اساس این پژوهش، در هر عرض مشخص از ترانشه دفن بین عرض ۹ متری تا ۱۵ متری، خصوصیات الاستوپلاستیک لایه‌های مختلف پوشش چندلایه ترانشه آزمایشی که ارتباط مستقیم با ظرفیت باربری لایه‌ها دارند بهینه‌سازی می‌گردند تا بهترین عکس‌العمل را در هنگام نشست و تراکم ترانشه در درازمدت داشته باشند و نیز یکپارچگی لایه‌های زیرین و ناتراوای (لایه محافظ) پوشش ترانشه در عرض‌های مختلف ۹ متری تا ۱۵ متری، حفظ گردد. نتایج نشان داد، تعیین عرض بهینه ترانشه وابسته به پارامترهای گوناگونی می‌باشد. با توجه به مسائل فنی، و مطالعات حدی روش عددی، نهایتاً عرض ۱۳ متر مناسب طراحی ترانشه می‌باشد. افزایش طول بیشتر از ۱۳ متر برای ترانشه قابل قبول نیست، و کاهش طول با توجه به مسائل اجرایی توصیه نمی‌گردد.

مراجع

[1] IAEA, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna 1995.
[2] IAEA, Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants and Other Nuclear Installations: Code and Safety Guides Q1–Q14, Safety Series No. 50-C/SG-Q, IAEA, Vienna 1996.
[3] IAEA, Developing Safety Culture in Nuclear Activities, Safety Reports Series No. 11, IAEA, Vienna 1998.
[4] IAEA, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series No. WS-R-1, IAEA, Vienna 1999.
[5] Gibbons, J. Managing Commercial Low-Level Radioactive Waste, Washington DC, USA, 1989.
[6] Guang Hu, Wilfried Pfingsten, Data-driven machine learning for disposal of high-level nuclear waste: A review, Annals of Nuclear Energy Volume 180, January 2023, 109452
[7] Yongheum Jo et al, Solubility of niobium(V) in cementitious systems relevant for nuclear waste disposal: Characterization of the solubility-controlling solid phases, Journal of Hazardous Materials Volume 440, 15 October 2022, 129810.
[8] Andrew S.Kinsela et al, Contaminant release, mixing and microbial fluctuations initiated by infiltrating water within a replica field-scale legacy radioactive waste trench, Science of The Total Environment Volume 851, Part 1, 10 December 2022, 158241
[9] D. Bugai et al, Geochemical influence of waste trench no. 22T at Chernobyl Pilot Site at the aquifer: Long-term trends, governing processes, and implications for radionuclide migration, Applied Geochemistry Volume 27, Issue 7, July 2012, Pages 1320-1338.
[10] Heyongin B., Gwan Y. J., Jaeyeong P., Structural stability analysis of waste pakages containing low – and intermediate level radioactive waste in a silo-type repository, Nuclear Engineering and Technology Volume 53, 2020, Pages 1523-1533.
[11] Murat Yilmaz1, Altay Ertin, Selman Er, Atiye Tugrul, Numerical Modelling of Steep Slopes in Open Rock Quarries, Journal Geological Society of India, Volume 91, 2018, Pager 232-238.