بررسی عددی تأثیر نشت شیرابه بر پایداری محل دفن مواد زائد جامد شهری، به روش فوکوکا (Fukuoka)، در کهریزک تهـــران

کاظم فخاریان
استادیار

رسول عالمی
کارشناسی ارشد

دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

اجرای یک مدفن مهندسی ـ بهداشتی به روش فوکوکا در کهریزک تهران در سال ۱۳۷۷، شاید اولین حرکت به سوی مهندسی شدن ساخت مراکز دفن مواد زائد در کشور بود، که توسط بخش پژوهش سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران، با همکاری مؤسسهٔ Habitat مستقر در فوکوکای ژاپن صورت پذیرفت. «فوکوکا» یک روش نیمه‌هوازی برای تسریع تجزیهٔ مواد آلی موجود در زباله‌های شهری، و کاهش میزان و بهبود کیفیت شیرابهٔ تولیدی است، که هم‌اکنون در قریب به ۸۰٪ شهرهای ژاپن اجرا می‌شود. اما بروز برخی مسائل و مشکلات پیش‌بینی نشده در زمان اجرا، همانند ازکار افتادن سیستم‌های زهکشی و بازگشت شیرابه، نشت شیرابه از پیکرهٔ مدفن، رخداد برخی گسیختگی‌های موضعی و در نتیجه نگرانی از گسیختگی کلی، سبب عدم عملکرد صحیح طرح شد. در این تحقیق، یک مدل غیرخطی عددی اجزاء محدود، با کمک نرم‌افزار PLAXIS 7.2 ساخته، و عملکرد مدفن در زمان بهره‌برداری را مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای لازم برای مدل رفتاریِ خاکِ پاک، نیمه آلوده و کاملاً آلوده، و همچنین مواد زائد جامد، بر مبنای یک مطالعه میدانی و آزمایشگاهی که قبلاً انجام شده بود، انتخاب شد. نتایج یک سری مطالعات پارامتریک نشانگر آن بود که ضعف در اجرای خاکریزهای محیطی، و نیز پوشش‌های روزانه و میانی، و انتخاب جنس این پوششها از مصالح نفوذناپذیر، علاوه بر مهیا ساختن زمینه برای تراوش شیرابه از دیواره‌ها، موجبات کاهش در ضریب اطمینان مدفن را به میزان چشمگیری فراهم می‌سازد. این مسأله می‌تواند زمینه‌ساز گسیختگی احتمالی کلی مدفن در آینده گردد.

کلمات کلیدی

محل دفن فوکوکا، پایداری، مدلسازی عددی، شیرابه، مواد زائد جامد، پوششهای روزانه و میانی، خاکریزهای محیطی.

Numerical Study of Leachate Effect on Stability of the Fukuoka Municipal Solid Waste Landfill in Karizak, Tehran

Kazem Fakharian
Assistant Professor

Rasoul Alemi
Geotechnical Engineer

Department of Civil & Environmental Engineering,
Amirkabir University of Technology

Abstract

The Fukuoka Method municipal solid waste landfill in Kahrizak of Tehran is perhaps the first engineered landfill project which was constructed in 1998 by Municipal Solid Waste Management Organization of Tehran, with cooperation of Habitat in Japan. Fukuoka is a semi-aerobic method for expediting the organic degradation of municipal solid waste, reduction of volume and improvement of leachate quality which is used in over 80% of Japanese cities. Some unexpected problems during construction such as leachate circulation breakdown, leakage of leachate through

surrounding embankments, several local slope failure on exterior side of landfill, and hence fears of a general shear failure caused some concerns during operation. A finite element nonlinear model by PLAXIS 7.2 was used to study the performance of the landfill during operation and after closure. The strength and deformation parameters of clean soil, partially polluted soil and polluted soil as well as the solid waste were obtained in an earlier study at Amirkabir University of Technology both by field and lab tests. The parametric studies by the numerical model indicated that the inadequate construction such as lack of necessary compaction of the surrounding embankments, using nonpermeable soil layers as the daily and intermediate covers, and breakdown of the air circulation and leachate injection chimneys caused both the leakage of leachate and reduction in factor of safety of the whole landfill.
***Keywords:** Fukuoka landfill, stability, numerical modeling, leachate, solid waste, daily and intermediate cover, surrounding embankment.*

مقدمه

امروزه بروز بحرانهای زیست‌محیطی در اقصی نقاط جهان، و ارتباط تنگاتنگ آن با سرنوشت و حیات تک‌تک انسان‌های روی زمین، سبب شده است، که مسأله‌ی حفظ و احیای محیط زیست، به صورت روز افزونی در کانون توجه همگان قرار گیرد. مسائل زیست‌محیطی محدود به یک شهر و یا کشور نبوده و تأثیرگذاری آن بر کل حیات کره زمین به اثبات رسیده است. در این بین مراکز دفن زباله، به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار آلاینده‌ها، در سطح جهان مورد توجه واقع شده‌اند.

آلودگی منابع آبی و خاکی منطقه، توسط شیرابهٔ تولید شده در مدفن، انتشار انواع گازهای گلخانه‌ای، و در نتیجه دامن زدن به مسألهٔ آلودگی هوای مناطق شهری، و به تبع آن پدیدهٔ گرم شدن تدریجی زمین، گسترش عوامل بیماری‌زا و انتشار بوهای مشمئز کننده، از جملهٔ آسیب‌هایی است که از طریق این مراکز متوجه محیط زیست می‌شود.

متأسفانه علی‌رغم تمام تلاشهایی که تاکنون صورت گرفته، به نظر می‌رسد هنوز هم جایگاه واقعی مراکز دفن مواد زائد، در ایجاد بحرانهای زیست‌محیطی در کشور ما چندان شناخته شده نیست و بسیاری از کارشناسان و دست اندرکاران، توجه لازم را به این مهم معطوف نکرده‌اند. نگاهی به آمار و اطلاعات موجود در این زمینه (عبدی، ۱۳۸۰) که در زیر آمده است، به میزان زیادی می‌تواند در درک اهمیت موضوع مؤثر واقع شود:

- تولید سالانه نزدیک به ۱۷/۵ میلیون تن زباله در سطح کشور، بر طبق آمار سال ۱۳۷۶، که تقریباً ۲۵ درصد آن از طریق حفر ترانشه و پوشش با خاک دفن، و ۷۵ درصد مابقی در سطح زمین تلنبار می‌شود.

شیرابهٔ این جایگاهها رقمی حدود ۶ میلیون مترمکعب را در سال شامل می‌گردد، که با احتساب حجم بسیار بالای آلایندگی آن (بیش از ۳۰ برابر فاضلاب)، و رها شدن در طبیعت، می‌تواند بسیار نگران کننده باشد.

- از هر تن مواد زائد شهری، نزدیک به ۸۰ مترمکعب گاز دی‌اکسید کربن (CO_2)، و حدود ۴۰ تا ۷۰ مترمکعب متان (CH_4) تولید می‌شود. علاوه بر این دو گاز، گازهای دیگری همچون بنزن و وینیل کلرید (Vinyl Chloride) در این مراکز تولید می‌شود [۷] که بسیار سمی و خطرناک بوده و سرطان‌زا بودن آنها به اثبات رسیده است.
- فضایی که برای دفن مواد زائد تولیدی مورد نیاز است، رقم قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. این رقم در کلان شهر تهران با تولید حدود ۷ هزار تن زباله در روز، سالانه بیش از ۲/۵ میلیون مترمکعب، و در سطح کشور در حدود ۱۷/۵ میلیون مترمکعب را بالغ می‌گردد.
- جدای از موضوعات زیست‌محیطی، جنبه‌های اقتصادی و هزینه‌های هنگفت صرف شده در امر مدیریت دفع مواد زائد جامد شهری (۱۵ تا ۲۰ درصد بودجهٔ شهرداری‌ها)، به خوبی لزوم بهسازی و استفادهٔ بهینه از مراکز دفن موجود را توجیه می‌نماید.

خوشبختانه قدمهای اولیه در این راه برداشته شده، و طرح دفن مواد زائد جامد شهری به روش نیمه هوازی فوکوکا (Fukuoka Semi-Aerobic Method)، که در منطقهٔ کهریزک تهران به مرحلهٔ اجرا درآمده است، یکی از شاخص‌ترین آنها به شمار می‌رود. هرچند تلاش شد تا طرح فوکوکا سرآغاز فصلی نوین در عرصهٔ دفن مهندسی و بهداشتی مواد زائد جامد، به خصوص در کلان شهر تهران باشد و به عنوان الگویی موفق در سراسر کشور ترویج گردد، ولی برخی مشکلات سبب شده که این طرح آن گونه که باید به اتمام نرسد، و نتواند تمامی انتظارات را برآورده سازد. وجود برخی از این نقص‌ها همچون نشت و

تـراوش شیرابه از بدنهٔ مدفن، هم اینک به معضلات عدیده‌ای تبدیل شده که حتی ایستایی آنرا با تهدیدات جدی مواجه ساخته است.

شناخت خصوصیات مواد زائد جامد شهری، درک اندرکنش این مواد با خاک اطراف، و بررسی پایداری استاتیکی و دینامیکی مدفن‌های مهندسی_بهداشتی، از جمله موضوعاتی است که به خصوص در دههٔ اخیر مورد توجه پژوهشگران در سطح جهان قرار گرفته است. از جمله این بررسی‌ها می‌توان به اندازه‌گیری پارامترهای مواد زائد جامد شهر تهران توسط فخاریان و عبدی (۱۳۸۰) و [۲۲] ، بررسی علل بروز گسیختگی مدفن شهر سینسینات [۱۳]، محل دفن Kettleman Hills کالیفرنیا [۲۰]، یک مدفن در برزیل[۱۹]، و همچنین مطالعات مبسوط صورت گرفته بر روی خواص و روشهای طراحی مدفن-های مهندسی و بهداشتی توسط [۷]، [۱۱] و [۲۱] شاره کرد.

هـدف اصـلی ایـن مقالـه ضـمن معرفـی اجمالـی طرح فوکوکا، تعیین میزان تأثیر نشت شیرابه بر کاهش پایداری مدفن، و مطالعـه و بررسی عواملی است که آنرا موجب شده‌اند. برای رسیدن به این هدف، از یک مدل غیرخطی عددی به کمک نرم‌افزار اجـزاء محـدود PLAXIS 7.2 اسـتفاده شـد، تـا بـا شـناخت نحـوهٔ عملکـرد هـریک از اجزاء بر ایستایی، راهکاری مناسب برای پیشگیری از تکرار وقایع مشابه در طرح‌های آتی نیز ارائه گردد.

تشریح طرح فوکوکا

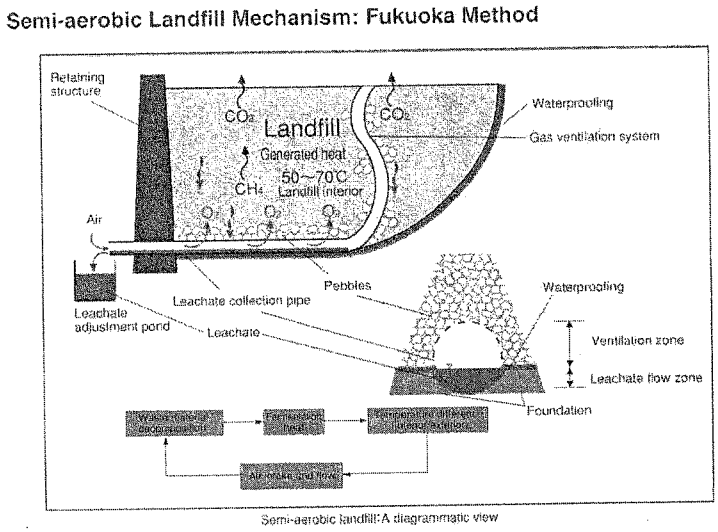
در اواسـط سـال ۱۳۷۶، شـهرداری تهـران و بـه خصـوص سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران با توجه به اهداف زیسـت محیطـی خـود، مکاتباتـی را در چهارچـوب یکـی از بـرنامه‌هـای چهارگانـه تسـهیلات جهانـی زیسـت‌محیطـی GEF (Global Environment Facility)، از طـریق دفتر توسعه و عمران سازمان ملل (UNDF) مستقر در تهران، به منظور استحصال و یـا کـاهش انتشـار گاز متان ناشی از مراکز دفن زائدات جامد، به عنوان یکی از منابع عمده تولید و انتشار گاز متان آغاز نمود. مـتعاقب ایـن مکاتـبات، دفتر اسکان بشر سازمان ملل متحد (Habitat) مستقر در شهر فوکوکای ژاپن، ضمن بررسی درخواست ایـران، آمادگـی خود را در جهت انتقال دانش فنی دفن بهداشتی به شکل نیمه‌هوازی، که مدت ۲۰ سال در نقاط مختلف ژاپن اجرا شده بود، به شهرداری تهران اعلام نمود. این پیشنهادها با توجه به فواید زیست محیطی آن، با موافقت مسؤولان ذیربط در شـهرداری تهـران مـواجه شـد و بـه دنـبال انـتقال و تـبادل نظرهای فنی، در مرداد ماه ۱۳۷۷ این طرح در شکلی نمایشی در مـنطقه‌ای به وسعت ۲ هکتار اجرا گردید، که البته بعدها با اضافه نمودن ۷ هکتار دیگر، از شکل آزمایشی خارج و به عنوان یک محل دفن واقعی مورد استفاده قرار گرفت (مدنی و همکاران، ۱۳۷۷).

اسـاس "روش دفـن نـیمه هوازی فوکوکا" (Fukuoka Semi-Aerobic Method)، بر یک فرآیند ساده فیزیکی بنا نهاده شده اسـت. در ایـنجا بـا بهره‌گیری از اختلاف دمای موجود بین داخل و خارج مدفن، که بر اثر انجام فرآیندهای تجزیه و فساد پدید آمـده، هـوا بـه داخـل و میان لایه‌های زباله به طور طبیعی جریان پیدا می‌کند؛ این عمل ضمن کاهش شدید سرعت تولید گاز مـتان، موجب بهبود کیفیت شیرابه، تسریع در واکنشهای بیوشیمیایی و کوتاه شدن دوران فعالیت مدفن می‌گردد. تولید شیرابه و گـاز مـتان در داخـل یـک مـدفن، عمـوماً بین ۳۰ تا ۵۰ سال ادامه می‌یابد. استفادهٔ از این روش سبب می‌شود با کوتاه شدن دوران فعالـیت مـدفن، زمـین هـرچه سریعتر احیا شده، و برای اهداف دیگر مورد بهره‌برداری قرار گیرد. شکل ۱ نمایی از روش دفن نیمه هوازی فوکوکا را با تمام جزئیات آن نشان می‌دهد.

بـه منظور دستیابی به اهداف فوق، یک شبکه لوله‌های مجوف افقی و قائم در داخل مدفن پیش‌بینی می‌شود؛ لوله‌های افقی ضمن جمع‌آوری و زهکشی سریع شیرابه، وظیفه حمل هوا برای ایجاد کنواکسیون در بین لایه‌های زائدات را نیز به عهده دارند (شکل ۲). از لوله‌های قائم به منظور خروج گاز (شکل ۳)، و از برخی از آنها به منظور تزریق مجدد شیرابه به داخل مدفن بهره گرفته می‌شود.

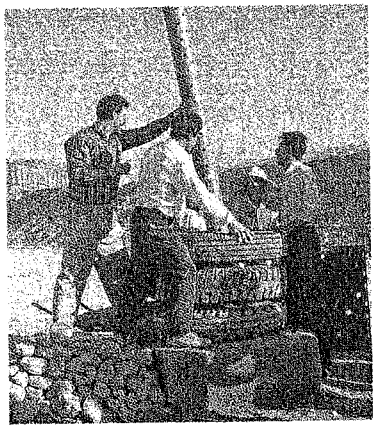
عمـل تـزریق مجـدد شـیرابه (شـکل ۴)، کـه بـه روش «بازیافـت شـیرابه» معـروف اسـت، اولـین بـار توسـط پرفسـور Masataka Hanashima و همکـارانش در دهـهٔ ۶۰ در دانشـگاه فوکـوکای ژاپـن مـورد تـوجه قرار گرفت (FCEB, 1999). آنها دریافتـند کـه در شـرایط محیطـی مناسـب، لایـه‌هـای زبالـه در داخل مدفن دارای خاصیت ذاتی خود پالایشی (Self-Purify) هسـتند. ایـن یافـته کـه در واقـع اسـاس پـیدایش مـدفن‌هـای نـیمه‌هـوازی بـه شـمار مـی‌رفـت، در ادامـه توسـط پرفسـور

Matsufuji Yasushi در سال ۱۹۷۵ بسط و توسعه یافت، و در نهایت در مدفن شهر فوکوکا موسوم به Shin-Kamata در قالب یک پروژه تحقیقاتی به بوتهٔ آزمایش سپرده شد (FCEB, 1999). موفقیت این طرح سبب شد که «روش فوکوکا» (Fukuoka Method) علاوه بر ژاپن در سایر کشورها نیز مقبولیت پیدا کند.

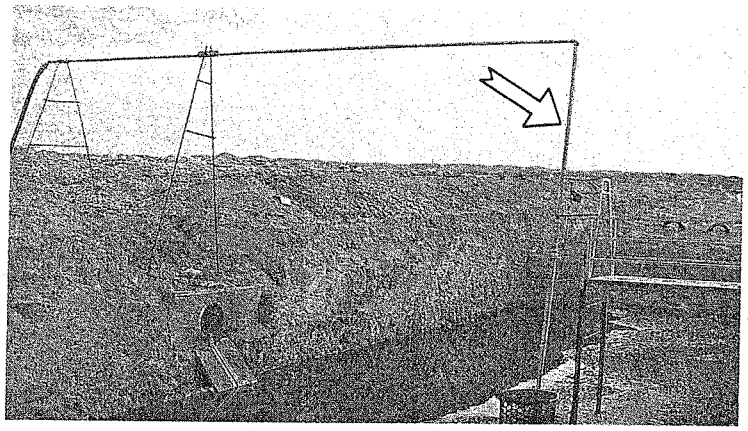


شکل (۱) جزئیات روش نیمه هوازی فوکوکا

شکل (۲) نحوهٔ اجرای زهکشهای جمع‌آوری و هدایت شیرابه در طرح فوکوکا (کهریزک تهران)



شکل (۳) نحوهٔ اجرای سیستمهای خروج گاز (طرح فوکوکا، کهریزک تهران)



شکل (٤) نحوهٔ اجرای سیستمهای برگشت شیراب
(طرح فوکوکا، کهریزک تهران)

با تزریق مجدد شیرابهٔ جمع‌آوری شده به داخل محل دفن، ضمن جذب فلزات سنگین آن توسط لایه‌های دفن، به تثبیت زباله در مراحل اولیه کمک زیادی می‌شود. برقراری یک جریان دائمی شیرابه در داخل مدفن، موجب واکنشهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی مختلفی بوجود می‌آورد که علاوه بر کاهش میزان BOD5، TOC و COD، سبب تبدیل اسیدهای آلی موجود در شیرابه به گاز متان و دی‌اکسیدکربن می‌شود و تأثیرات بسیار مثبتی در بهبود کیفیت شیرابه به همراه خواهد داشت.

برخی مشکلات موجود در طرح اجرا شده

هرچند که اجرای صحیح این طرح، به عنوان اولین مدفن مهندسی ـ بهداشتی به این سبک، می‌توانست فواید بی‌شماری را به دنبال داشته باشد و احتمالاً به صورت الگو، بخصوص در مناطق شمالی و جنوبی کشور که بیشترین مشکل در آنها وجود دارد مطرح شود، ولی متأسفانه به دلیل رعایت نشدن برخی مسائل فنی و اجرایی، در حال حاضر در عمل تنها به یک طرح سادهٔ بی‌هوازی تبدیل شده و از برآورده ساختن بسیاری از اهداف از پیش تعیین شدهٔ خود ناتوان است. در ادامه برخی از مشکلات موجود در این طرح برشمرده می‌شود.

۱ـ اجرای نامناسب خاکریزهای محیطی

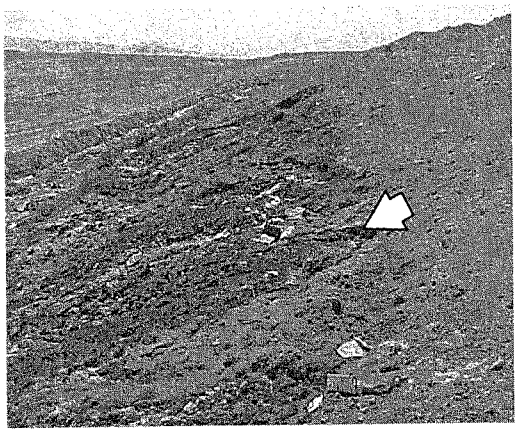
خاکریزهای محیطی علاوه بر اینکه فضای مناسب را برای دفن سطحی زائدات فراهم می‌سازند، وظیفه دارند همانند یک سد خاکی مانع از نشت و نفوذ شیرابه به محیط خارج مدفن شوند. بنابراین می‌باید در هنگام طرح و اجرا به دو مقولهٔ پایداری و همچنین نفوذناپذیری آن در برابر تراوش شیرابه توجه کافی صورت پذیرد.

متاسفانه در طرح اجرا شده، خاک بدون اینکه هیچگونه عملیات تراکمی بر روی آن صورت گیرد، تنها در محل تخلیه و تلنبار شده است. از این رو در حال حاضر، به جهت عدم توجه کافی به عملیات ساخت، و در نتیجه نشت شیرابه از پیکرهٔ آن، خاکریزها دچار تغییر شکل‌های بزرگ و گسیختگی‌های موضعی شده‌اند؛ به نحوی که در برخی نقاط حتی قابل تفکیک هم نبوده و می‌توان گفت خاکریزهای اول و دوم، و همچنین خاکریزهای سوم و چهارم، بطور کامل درهم ادغام گشته‌اند (شکل ۵).

از دیگر تبعات اجرای نامناسب خاکریزها، می‌توان به گسیختگی لوله‌های زهکشی گاز و شیرابه، در اثر جابجایی خاکریزها و در نتیجه توده مواد اشاره کرد که عملکرد مدفن را در این دو بخش با مسائل و مشکلات جدی روبرو ساخته است.

۲ـ از کار افتادگی سیستم پمپاژ مجدد شیرابه به داخل محل دفن

همانطور که بیان شد یکی از مهمترین مزایای روش فوکوکا، کاهش میزان آلودگی شیرابه و تسریع در عمل تجزیه با استفاده از پمپاژ مجدد شیرابه به داخل محل دفن است. اجرای این روش در اوایل کار به علت بروز مشکلات فراوان، از قبیل ایجاد یک سطح سست و لجنی و ایجاد اشکالات برای ماشین آلات حمل و نقل و تجهیزات، متوقف شد و هرگز ادامه نیافت.



شکل (۵) نشت شیرابه از حد فاصل خاکریزهای ادغام شدهٔ سوم و چهارم.

۳ـ عدم توانایی زهکشها در زهکشی کامل شیرابه

نشت شیرابه از نقاط مختلف بدنهٔ طرح (شکل ۵)، حاکی از نقص در سیستم زهکشی است، که دلایل مختلفی از جمله دلایل زیر می‌توانند در پدید آمدن آن نقش داشته باشند:

- حرکت افقی شیرابه به علت مناسب نبودن ساختار پوششهای روزانه و میانی است: در برخی از طبقات اجرا شده در مدفن، بنا به علل مختلف از جمله عدم دقت کافی در انتخاب جنس مصالح و تأثیرات نامطلوب شیرابه، یک لایه با نفوذپذیری بسیار کم تشکیل گشته، بطوری که مانع از راهیابی شیرابه به ترازهای پایین‌تر و در نتیجه تجمع آن بر روی این لایه‌ها شده است.
- احتمال بالای گرفتگی لوله‌های زهکش به علت عدم وجود فیلتر شنی مناسب بر روی آنها.
- عدم تأمین تراکم لازم، و ایجاد پیوستگی بین لایه‌های مختلف خاکریز در زمان ساخت، این موضوع نیز از جمله دلایل دیگری است که در کنار عوامل فوق موجب حرکت و عبور آسان شیرابه از میان خاکریز می‌شود.

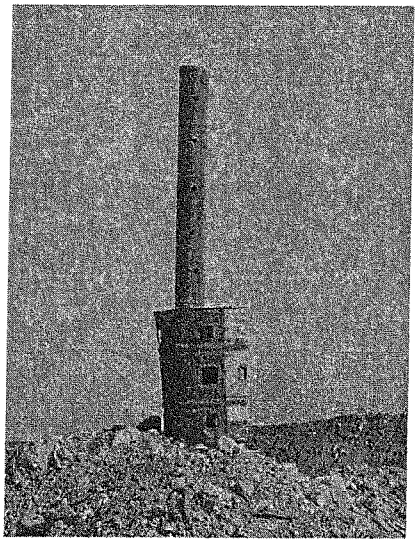
٤ـ تخریب سیستمهای زهکشی گاز و ناتوانی در اجرای سیستم نیمه هوازی در مدفن

یکی از مهمترین اهدافی که طرح فوکوکا در پی دستیابی به آن است، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای از طریق ایجاد یک فضای مناسب، برای انجام فرآیندهای نیمه‌هوازی در مدفن، و در نتیجه کاستن از حجم تولید گاز متان است. در این میان زهکشهای قائم، ضمن انتقال گازهای تولیدی به محیط بیرون، باعث ورود و توزیع اکسیژن در داخل تودهٔ مواد زائد شده و از این طریق نقشی اساسی را بر عهده دارند.

در طرح اجرا شده این سیستم، زهکشی به دلایل گوناگونی، از جمله گسیختگی بر اثر جابجایی‌های صورت گرفته در توده مواد زائد و خاکریزهای محیطی، برخورد ماشین‌آلات مختلف در حین عملیات تخلیه، و تراکم زباله در شب و عدم وجود تدابیر مناسب جهت محافظت از آنها، از کار افتاده و به جز تعدادی انگشت شمار بقیه از بین رفته‌اند (شکل ۶). به این ترتیب انتظار از عملکرد این مدفن به عنوان یک مدفن نیمه‌هوازی و دستیابی به اهداف یاد شده کمی دور از انصاف خواهد بود.

هرچند تلاش شد طرح فوکوکا سرآغاز فصلی نوین در عرصه دفن مهندسی و بهداشتی مواد زائد جامد به خصوص در کلان شهر تهران باشد و به عنوان الگویی موفق در سراسر کشور ترویج گردد، ولی برخی مشکلات پدید آمده از جمله استفاده از این طرح آزمایشی به جای یک محل دفن واقعی، سبب شد که طرح آنگونه که باید به اتمام نرسد و نتواند کلیه انتظارات را برآورده سازد. وجود برخی از این نقص‌ها در مدفن اجرا شده، به معضلات عدیده‌ای تبدیل شده، که حتی ایستایی آنرا با تهدیدات جدی مواجه ساخته است.

مطالعه و شناخت هریک از عوامل مؤثر در این بحران، اولین گام در جهت پیشگیری از فجایعی است که ممکن است در آینده‌ای نه چندان دور مورد انتظار باشند؛ ضمن آنکه و تجربه‌ای برای طرحهای آتی محسوب می‌شود که امید است شاهد اجرای آنها در کشور باشیم.



شکل (۶) نمونه‌ای از معدود زهکشهای گاز موجود در محل.

بررسی پایداری و عملکرد مدفن پس از اجرا

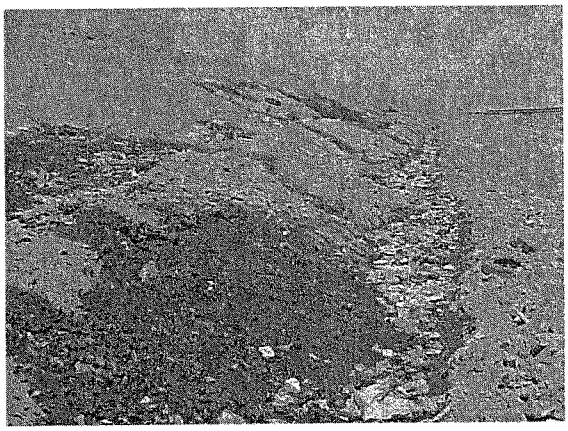
یک مدفن سطحی به طور کلی از اجزاء مختلفی تشکیل شده است، که بسته به کاربرد هر بخش لازم است مصالح و تجهیزات خاص آن بخش مورد استفاده قرار گیرد. خاکریزهای محیطی، پوشش‌های روزانه و میانی، سیستمهای زهکشی گاز و شیرابه، لایه‌های نفوذ ناپذیر کف و دیواره‌ها و بالاخره پوشش نهایی، از جملهٔ این اجزاء هستند که به طور مستقیم و یا غیر مستقیم با ایستایی مدفن در ارتباط هستند.

☐ مشخصات هندسی محل دفن

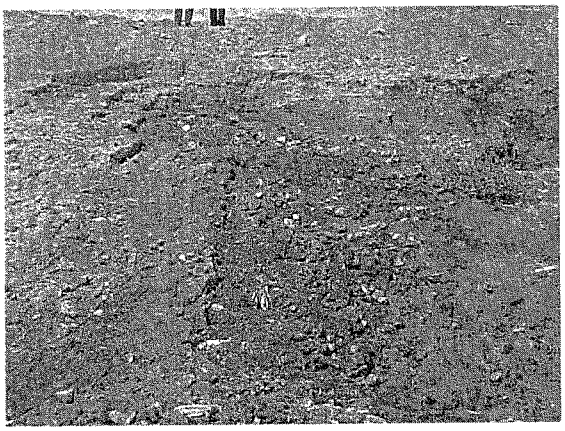
هم اکنون از زمان بهره‌برداری پروژه بیش از پنج سال می‌گذرد، و نزدیک به سه سال است که عملیات اجرایی آن به اتمام رسیده است. در طی این مدت شش خاکریز بر روی یکدیگر ساخته شده، و خاکریز ششم نیز به صورت نیمه کاره رها گشته و چنین به نظر می‌رسد که دیگر هیچگونه عملیات دفنی در آن صورت نخواهد گرفت. بر اساس مشاهدات، این شش خاکریز هم اینک به راحتی از یکدیگر قابل تفکیک نبوده، و در نگاه اول تنها چهار خاکریز، که بر روی هم قرار دارند، رؤیت می‌شوند.

خاکریز اول به دلیل اینکه پائین‌تر از سطح تراز فعلی زمین اجرا شده، و نیز به دلیل عدم ایجاد تراکم اولیه و اعمال فشار از طرف خاکریزهای فوقانی، به طور کامل با خاکریز دوم ادغام شده است. از طرفی نفوذ شیرابه در خاکریزهای تحتانی، خاک آنها را به شدت تحت تأثیر قرار داده، بطوری که این سستی در طی زمان باعث لغزش دو خاکریز شده، و عمل ادغام آنها در یکدیگر را تسریع نموده است. در مورد خاکریزهای سوم و چهارم نیز وضعیت مشابهی حکمفرماست، و این دو نیز تقریباً به همین شکل، به تدریج در یکدیگر ادغام شده‌اند (شکل ۵).

سطح تراز شیرابه در داخل مدفن را می‌توان از روی سطح مرطوب خاکریزها به سادگی حدس زد. این خط تراز تقریباً در وسط خاکریزهای ادغام شدهٔ سوم و چهارم و به شکل سراسری در طول خاکریز ادامه یافته است (شکل ۷). همچنین در این قسمتها نقاطی وجود دارد که فشار شیرابه باعث خروج آن از بدنه و جریان یافتن آن به شکل جوی‌های کوچک شده است. در همین منطقه به دلیل نفوذ شیرابه و تخریب ساختار خاک، لغزشهای موضعی به وجود آمده که در بعضی نقاط با پیوستن تعدادی از آنها به یکدیگر، این لغزشهای موضعی به عنوان یک عامل تهدید کنندهٔ پایداری مطرح می‌شوند (شکل ۸).

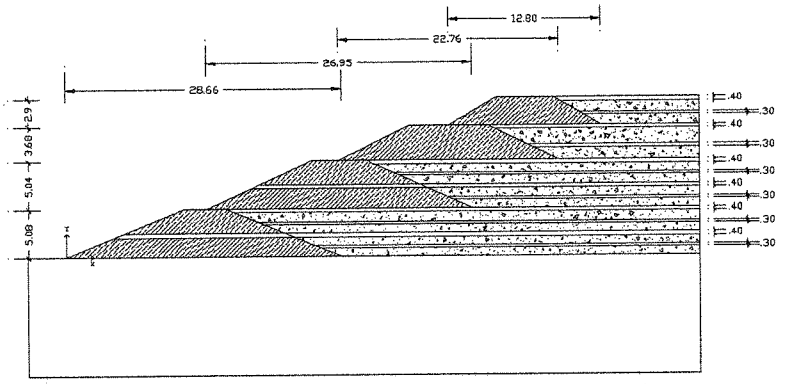


شکل (۷) امتداد خط خروج شیرابه از دیوارهٔ مدفن



شکل (۸) نمونه‌ای از لغزشهای موضعی در اثر خروج شیرابه از جداره

به این ترتیب با توجه به لزوم بررسی موقعیت فعلی مدفن، در مدلسازی کامپیوتری، هندسهٔ وضعیت موجود برابر مشاهدات دقیق و اندازه‌گیریهای صورت گرفته، از محل دفن فوکوکا مطابق شکل ۹ ترسیم و مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۹) مشخصات هندسی مورد استفاده در مدلسازی عددی مدفن

☐- خصوصیات مصالح

اصولاً در یک محل دفن سطحی می‌توان به طور کلی انتظار وجود دو نوع مصالح را داشت:

۱- خاک که در ساخت خاکریزهای محیطی و پوششهای روزانه، میانی و کف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- زباله که به تدریج در محل تخلیه، متراکم و دفن می‌گردد.

سایر مصالح همانند غشاءهای مصنوعی، بسته به ضرورت ممکن است در این میان به کار گرفته شده باشند. بنابراین خاک و زباله، تشکیل دهندهٔ اساس ساختار یک مدفن هستند، که باید پیش از هر اقدامی شناخت کافی نسبت به هریک از آنها ایجاد شود.

آزمایشهای مشروحی به منظور بدست آوردن پارامترهای مکانیکی و مقاومتی مصالح، بر روی خاک خاکریز، و زباله حمل شده به محل دفن، توسط عبدی (۱۳۸۰) انجام شد، که نتایج آن به طور خلاصه در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

همانطور که در این جداول مشخص است به علت نشت شیرابه از جداره‌ها، و بررسی اثر آن بر روی خاک در زمانهای مختلف، نمونه‌گیری از خاک به سه دسته تقسیم بندی شده که عبارتند از: خاک غیر آلوده، خاک نیمه آلوده و خاک کاملاً آلوده.

- خاک غیر آلوده خاکی است که تاکنون شیرابه به آن نرسیده است و ظاهری خشک دارد.
- خاک نیمه آلوده خاکی است که شیرابه به آن رسیده و آنرا کاملاً مرطوب و تیره رنگ کرده است.
- خاک کاملاً آلوده خاکی است که از شیرابه اشباع شده، و درطی مدت زمان زیادی که شیرابه روی آن اثر گذاشته، به صورت

یک خاک سیاه رنگ و لجنی در آمده است.

این سه نوع خاک می‌توانند به نحوی بیانگر اثر شیرابه روی خاک در زمانهای مختلف باشند.

در مورد مصالح پی نیز با توجه به وضعیت خاک محل، پارامترهای مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۱): خصوصیات مصالح خاکریز (عبدی، ۱۳۸۰)

پارامترهای مکانیکی خاک خاکریز	نوع خاک		
	خاک غیر آلوده	خاک نیمه آلوده	خاک آلوده
طبقه بندی خاک	SC-SW	SC-SP	SC
حداکثر وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۹*	۱۹/۷	۱۹/۸۵
رطوبت بهینه (٪)	۱۴	۱۳	۱۱/۴
زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	۳۸/۵	۳۴	۷/۶
چسبندگی (kPa)	۱۷/۳	۱۷/۹	۱۱/۷
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۰	۹	۳/۵
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳۵

* این اعداد مربوط به آزمایش تراکم بوده و میزان آن در محل تقریباً معادل $18\ kN/m^3$ است.

جدول (۲): خصوصیات مواد زائد جامد (عبدی، ۱۳۸۰).

پارامترهای مکانیکی مواد زائد جامد	
وزن مخصوص بواسطهٔ تراکم حداقل (kN/m^3) *	۶
وزن مخصوص بواسطهٔ تراکم حداکثر (kN/m^3) *	۱۰
زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	۲۷
چسبندگی (kPa)	۰
مدول الاستیسیته (MPa)**	۱/۵
ضریب پواسون**	۰/۲۵

* عددی که به عنوان وزن مخصوص مواد زائد جامد در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته، متوسط دو مقدار مذکور در جدول، یعنی $8\ kN/m^3$ انتخاب شده است.

** این عدد از روی نتایج تحقیقات انجام شده توسط [۱۸] و نیز [۱۰] استخراج شده است.

جدول (۳): خصوصیات خاک پی.

پارامترهای مکانیکی مربوط به مصالح پی	
وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۹
وزن مخصوص تر (kN/m^3)	۲۱
زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵
چسبندگی (kPa)	۴۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۳۰
ضریب پواسون	۰/۳

شاید استفاده از نتایج آزمایشهایی که عمدتاً بر روی مواد زائد جامد تازه در محیط آزمایشگاه صورت پذیرفته، برای تحلیل پایداری مدفن تکمیل شده، در ابتدای امر عمل چندان صحیحی به نظر نیاید. پاسخ این ابهام را با نگاهی به اعداد و ارقام ذکر شده در مراجع، برای زباله‌های قدیمی‌تر می‌توان دریافت. به عنوان مثال چنانچه در جدول (۴) دیده می‌شود، نه تنها با فساد

زبالـه کـاهش چشـمگیری در مقـدار ϕ_a آن دیده نمی‌شود، بلکه نسبت به نمونه‌هایی که به صورت مصنوعی در آزمایشگاه تهیه مـی‌شـوند، به دلیل سیمانته شدن، دارای چسبندگی ظاهری قابل ملاحظه‌ای نیز می‌گردد. این نکته می‌تواند توجیه قابل قبولی بـرای استفاده از پارامترهای حاصل در آزمایشگاه، در بررسی پایداری‌ها بدست دهد و حتی در برخی موارد سبب شود که نتایج تحلـیل تا حدی اطمینان بخش باشد. از اینرو در طول این پروژه کماکان همان نتایج بدست آمده از زبالهٔ تازه در تحلیل‌ها بکار گرفته شد.

جدول (٤): مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) مواد زائد جامد شهری (Daniel, 1993).

زباله ریزه شده (Shredded Refuse)	ϕ_a =24°	C_a =23 kP_a
زباله قدیمی (Old Refuse)	ϕ_a =33°	C_a= 16 kP_a
زباله‌های مصنوعی (Artificial Refuse)	ϕ_a = 41° تا 27°	C_a = 0
زباله تازه مصنوعی (Fresh Artificial Refuse)	ϕ_a =36°	C_a = 0

۳ـ تحلیل پایداری مدفن

همانطـور کـه قـبلاً اشـاره شـد، یکـی از مشـکلات پدید آمده در هنگام اجرای محل دفن فوکوکا، علاوه بر ساخت نامناسب خاکریزها، که ادغام برخی از آنها را در پی داشته، مسألهٔ نشت شیرابه از پیکرهٔ مدفن است.

نفـوذ شـیرابه از پیکـرهٔ مدفن، و از میان ترازهای سوم و چهارم، به طور حتم سبب تغییر در خصوصیات مکانیکی خاک این مـناطق شـده، بـه نحوی که هم اکنون برخی گسیختگی‌های موضعی در این بخشها قابل رؤیت است. از آنجایی که این احتمال وجـود دارد کـه ایـن گسـیختگی‌هـای موضعی به تدریج منجر به گسیختگی کلی مدفن شوند، بررسی دقیقتر چنین وضعیتی ضروری به نظر می‌رسید.

از ایـن رو بـرای فـراهم سـاختن امکـان مقایسـه و تبیین تأثیرات نامطلوب شیرابه، تحلیل پایداری با کمک مدل غیرخطی سـاخته شـده توسـط نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS 7.2 و در شرایط کرنش صفحه‌ای (Plane Starin)، بر مبنای مدل رفتاری موهـر کـولمب، در دو بخـش مجـزا انجـام شد. ابتدا با در نظر گرفتن شرایط هندسی موجود و بدون نشت شیرابه، و در مراحل بعدی تأثیرات خروج شیرابه در وضعیت زهکشی شده مورد بررسی و کنکاش قرار گرفت.

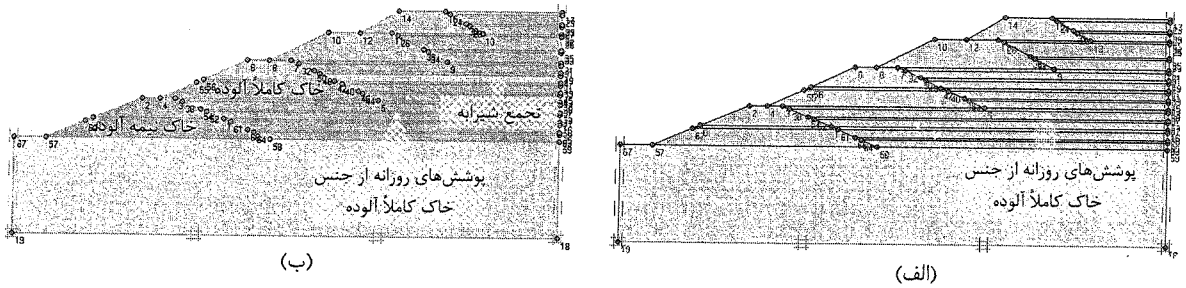
تشریح وضعیت موجود و هندسهٔ مدل

همانطـور کـه اشـاره شـد، تراوش و نشت شیرابه از فراز خاکریز اجرا شده، در تراز سوم صورت پذیرفته است. شیرابه پس از خـارج شـدن از پیکـرهٔ مـدفن، بـه تـدریج بـه سمت کانال پیرامونی که در کنارهٔ خارجی مدفن ساخته شده حرکت کرده و در مسـیرش در ایـن نواحـی، خاک را به شدت تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۷). مسلماً این تأثیر در ترازهای بالاتر بیشتر بوده، بـه طـوری کـه خـاک این قسمتها را کاملاً به رنگ سیاه درآورده است. این در حالیست که خاکریزهای اول و دوم، در مقایسه، رنگـی روشـن‌تر به خود گرفته‌اند. به نظر می‌رسد که نشت شیرابه در این مناطق ناشی از انباشت آن در بالای تراز خاکریز سوم باشـد. یعنـی بر اثر عدم تأمین نفوذپذیری لازم برای پوشش‌های روزانه و یا میانی، این قسمت به ناچار تحت تأثیر فشار ناشی از وزن خود و لایه‌های فوقانی، روزنه‌ای به بیرون پیدا کرده و از دیوارهٔ مدفن خارج شده است.

بـه مـنظور مدلسـازی تمامـی این رخدادها، در مرحلهٔ نخست، پس از ساخت کامل مدفن به شکل کنونی (شکل ۱۰-الف)، پارامتـرهای خاکریـز سـوم از خـاک غیر آلوده به نیمه آلوده تغییر داده شدند. در مرحلهٔ بعد همراه با تبدیل این خاک به خاک کـاملاً آلـوده، پارامتـرهای خاکریـزهای اول و دوم نیـز با خصوصیات خاک نیمه آلوده جایگزین شدند (شکل ۱۰-ب). در هر دو حالت، با توجه به تماس دائمی خاکِ پوششهای روزانه و میانی با شیرابه، جنس مصالح این بخش از خاک آلوده انتخاب شد.

وضـعیت شیرابهٔ انباشت شده در تراز فوقانی، از حیث میزان فشار وارد بر آن، و اینکه آیا اصلاً تحت فشارهای دیگری غیر از وزن خـود مـی‌باشد یا خیر، چندان مشخص نیست. به همین دلیل تحلیل‌ها در سه بخش مجزا انجام شد. در بخش اول تنها اثر

نشت شیرابه لحاظ شد. در بخش دوم انباشت در تراز سوم تحت وزن خود بررسی شد، و در بخش سوم بررسی‌ها تحت فشارهای جانبی اضافی صورت پذیرفت.

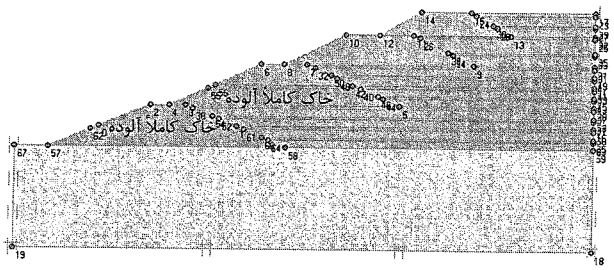


شکل (۱۰) نمایی از هندسهٔ مدفن در حالات مختلف
الف ـ در حالت در نظر گرفتن اثر پوشش‌های میانی ب ـ تجمع و نشت شیرابه

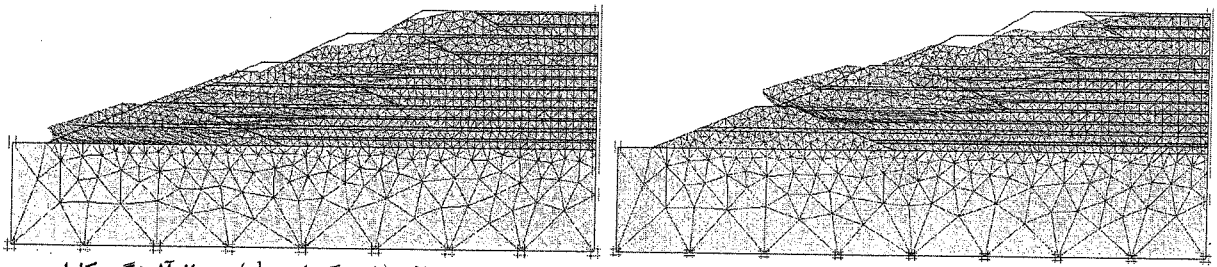
تحلیل پایداری مدفن در وضع کنونی آن

با توجه به تحلیل‌های استاتیکی انجام شده در زمانی که اثر نشت شیرابه در نظر گرفته می‌شود، ضریب اطمینان مدفن از مقدار «۱/۶» در حالت عدم نفوذ شیرابه، تا حدود «۱/۳» در هنگام نشت تنزل می‌کند که به هیچ عنوان کافی به نظر نمی‌رسد.

نکتهٔ قابل توجه این است که با گذشت زمان و استمرار احتمالی تراوش شیرابه از دیواره‌ها، خاکریزهای اول و دوم نیز کاملاً توسط شیرابه آلوده گشته (شکل ۱۱) و ضریب ایمنی حتی از این میزان هم کمتر شده و به حدود «۱/۱» می‌رسد. در این صورت همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، با تغییر مسیر حرکت سطوح لغزش باید یک گسیختگی کلی را در داخل مدفن انتظار داشت.



شکل (۱۱): هندسهٔ مدفن پس از آلودگی کامل خاکریزهای اول و دوم



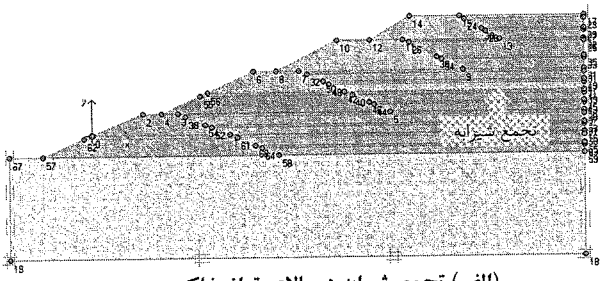
سازهٔ تغییر شکل یافته (با بزرگنمایی $\frac{1}{10}$) پیش از نشت شیرابه

سازهٔ تغییر شکل یافته (با بزرگنمایی $\frac{1}{5}$) پس از آلودگی کامل خاکریزهای اول تا سوم

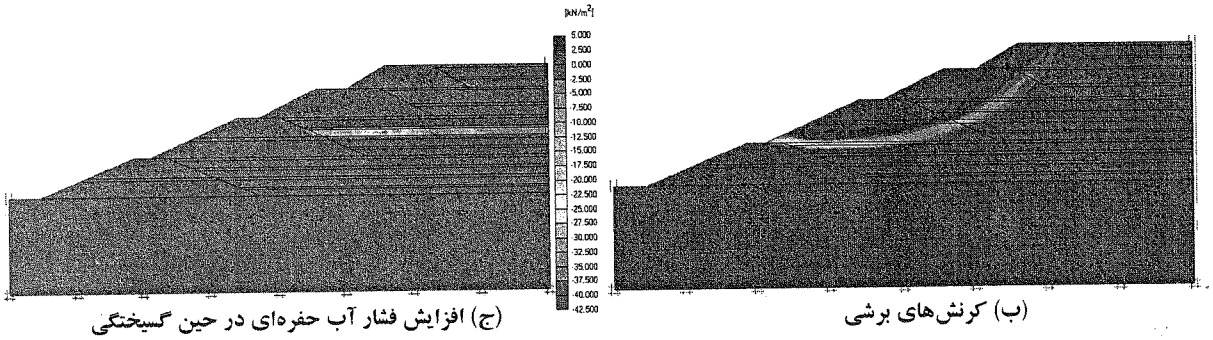
شکل (۱۲): نمایی از مدفن در حال گسیختگی

بررسی اثر تجمع شیرابه در ترازهای فوقانی در داخل مدفن

تجمع شیرابه در بالای تراز سوم و در حدود ارتفاع یک لایه (حدود ۱ متر)، تأثیر چندانی بر مقدار ضریب اطمینان مدفن ندارد. حتی در نظر گرفتن رفتار زهکشی نشده برای مصالح این بخش، به هنگام رخداد گسیختگی کلی نیز، به مقدار بسیار جزئی و در حدود ۲ درصد بر پایداری مدفن تأثیر می‌گذارد که چندان قابل اعتنا نیست. البته در این حالت کاهش تنش‌های مؤثر به خوبی قابل رؤیت است، ولی به میزانی نیست که قادر باشد ایستایی کلی مدفن را تحت تأثیر خویش قرار دهد، و سطوح گسیختگی همانند گذشته در حال شکل گیری هستند (شکل ۱۳).



(الف) تجمع شیرابه در بالای تراز خاکریز سوم



(ج) افزایش فشار آب حفره‌ای در حین گسیختگی

(ب) کرنش‌های برشی

شکل (۱۳) نمایی از مدفن در حال گسیختگی به هنگام تجمع شیرابه در بالای خاکریز سوم

در افزایش میزان این ارتفاع تا سطح سه لایه (حدود ۳/۸ متر) نیز تا زمانیکه شیرابه تنها تحت اثر فشار وزن خود است، کماکان وضع به همین منوال بوده و تغییراتی بیش از ۷/۵ درصد در ضریب اطمینان مشاهده نمی‌شود.

اگر فرض شود که شیرابهٔ تجمع یافته به نوعی تحت فشارهای دیگری غیر از وزن خود قرار گیرد، وضعیت کمی متفاوت خواهد بود. از آنجایی که افزایش فشار مسلماً منجر به کاهش محسوس‌تری نسبت به حالات قبل در تنش مؤثر این محدوده خواهد شد، احتمالاً پایداری مدفن را به میزان بیشتری تحت تأثیر قرار خواهد داد. نتایج حاصل از تحلیل چنین وضعیتی نشان می‌دهد وقتی تجمع شیرابه در حدود ارتفاع ۱ متر است، با افزایش فشار تا حداکثر ۹۰ کیلوپاسکال، تا ۱۱ درصد از ضریب اطمینان آن کاسته شده و به ۱/۲ خواهد رسید. این مقدار ۹ درصد بیش از حالتی است که شیرابه تحت فشار قرار نداشت.

با مقایسهٔ اعداد بدست آمده، چنین بر می‌آید که تجمع شیرابه به خودی خود در پایداری کلی مدفن تأثیر چندانی ندارد، بلکه اثرات جانبی ناشی از آن، مانند نشت و تراوش شیرابه از پیکرهٔ مدفن، و فساد خاک در این مناطق می‌تواند نقش بسیار پر اهمیت‌تری را در ناپایداری‌های بعدی مدفن بر عهده داشته باشد.

بررسی نقش هریک از اجزاء اصلی موجود در ساختار مدفن بر روی ایستایی به هنگام نشت شیرابه از میان خاکریزهای محیطی

در این بخش، به منظور روشن ساختن اهمیت تراوش و نشت شیرابه از دیواره‌ها و بررسی بیشتر این مسأله، ضمن انجام مطالعات پارامتریک بر روی خواص مصالح مختلف موجود در مدفن، شامل مواد زائد جامد، خاک خاکریز و خاک به کار رفته در لایه‌های پوشش روزانه و میانی، میزان نقش هر قسمت بر روی ایستایی مدفن، مورد توجه و بررسی قرار خواهد گرفت.

هدف اصلی از مطرح کردن این مبحث، در واقع تعیین میزان تأثیر ساخت بهینهٔ هر قسمت، بر پایداری مدفن به هنگام نشت شیرابه، و مقایسهٔ آن با دیگر حالتهای مطرح شده در این بخش می‌باشد. هندسه‌ای که در اینجا مورد استفاده قرار خواهد گرفت، شامل ساختار عمومی مدفن به همراه لایه‌های پوششی میانی، و خاکریزهایی است که با شیرابهٔ نشت کرده آلوده شده‌اند. در این مورد از تجمع شیرابه با توجه به تأثیر اندک آن صرفنظر شده است.

۱ـ اثر خصوصیات خاکریزهای محیطی

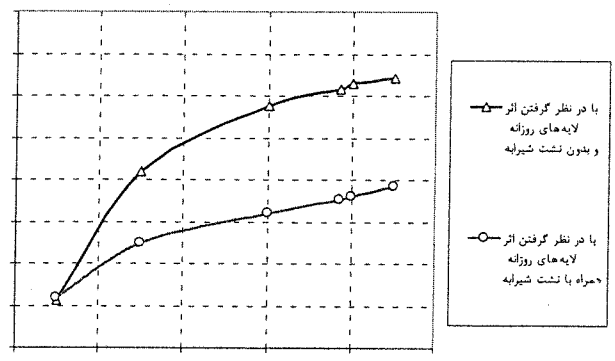
الف ـ اثر زاویه اصطکاک داخلی

شکل (۱۴) مقایسه‌ای بین حالتهای مختلف تراوش و عدم تراوش شیرابه صورت گرفته است. با توجه به نتایج ارائه شده، چنین بر می‌آید که تراوش شیرابه از میان دیوارهٔ مدفن، می‌تواند نقش بسزایی در کاهش حساسیت ضریب اطمینان مدفن نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک خاکریز ایفا کند، به طوریکه در حالت بهسازی مدفن و فراهم آوردن امکان ۱۷ درصدی افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۳۸/۵ درجه به ۴۵ درجه، شاخص پایداری مدفن تنها ۲ درصد بهبود می‌یابد (از ۳۵/۱ به ۱/۳۸). بنابراین اینطور به نظر می‌رسد، که در صورت نشت شیرابه از دیواره‌های مدفن، و فاسد شدن خاک این مناطق، دیگر بالا بودن پارامترهای مقاومتیِ خاکِ خاکریز تأثیر چندانی بر بهبود وضعیت پایداری مدفن نخواهد گذاشت.

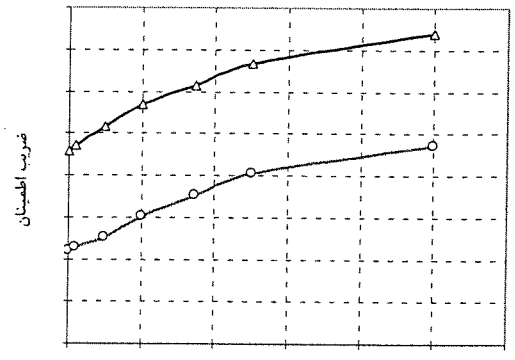
ب ـ اثر چسبندگی

در شکل (۱۵)، نمودار تغییرات ایستایی مدفن، بر حسب چسبندگی خاک خاکریز در حالتهای مختلف نشان داده شده است. با دقت در این شکل و مقایسهٔ نمودارهای آن، ملاحظه می‌شود که نمودار مربوط به این دو حالت، با تقریب خوبی با هم موازی هستند. بدین مفهوم که نشت شیرابه بدون تأثیر در نحوهٔ اثرگذاری این بخش، به شکل مؤثری از مقدار ضریب اطمینان‌ها کاسته است.

رخداد چنین وضعیتی در تمامی مقادیر مربوط به چسبندگی، و به گونه‌ای مشابه، در مورد زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک خاکریز، نقش بهسازی اجزاء مدفن، و پیشگیری از نشت شیرابه را بسیار حساس‌تر می‌سازد. چراکه در صورت پیش‌بینی وقوع چنین وقایعی در آیندهٔ یک مدفن، از آنجایی که نقش پارامترهای مقاومتی خاک خاکریز بسیار کمتر از گذشته خواهد شد، دیگر تلاش برای افزودن ایمنی مدفن از طریق بهبود ساخت این خاکریزها تحت این شرایط، به امری بیهوده بدل خواهد شد.



شکل (۱۴) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب زاویه اصطکاک داخلی خاک خاکریز



شکل (۱۵) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب چسبندگی خاک خاکریز

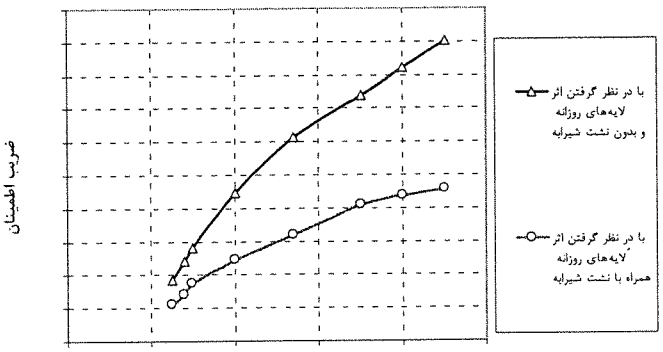
۲ـ اثر تغییر خواص مکانیکی مواد زائد جامد

الف ـ اثر زاویه اصطکاک داخلی

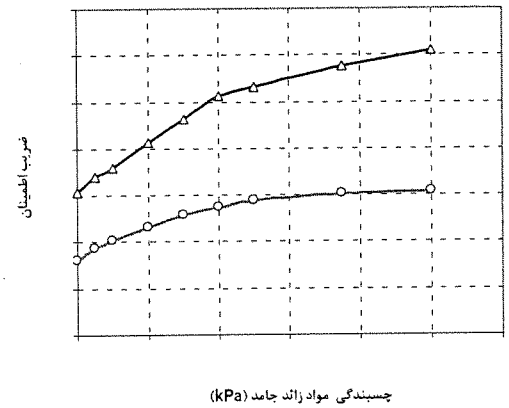
نشت شیرابه از پیکرهٔ مدفن، در کاستن از نقش خصوصیات تودهٔ مواد زائد نیز بی تأثیر نبوده است. نگاهی به مقایسهٔ صورت گرفته در نمودار شکل (۱۶) به خوبی صحت این موضوع را روشن خواهد ساخت؛ همانطور که دیده می‌شود، در مقادیر بالای ضریب اصطکاک، روند کاهش محسوس‌تر است.

ب ـ اثر ضریب چسبندگی

شکل (۱۷)، نمودار میزان تأثیر چسبندگی زباله بر پایداری مدفن را در حالت نشت شیرابه، در مقایسه با سایر حالات نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً نیز در بحث میزان تأثیر چسبندگی خاک خاکریز اشاره شد، در اینجا هم نشت شیرابه، عامل اساسی کاستن از مقادیر ضریب اطمینان مدفن است. شیب‌های تقریباً مساوی و بسیار کم این دو نمودار، می‌تواند توجیه مناسبی برای این موضوع به دست دهد.



شکل (۱۶): نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب زاویه اصطکاک داخلی مواد زائد جامد



شکل (۱۷): نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب چسبندگی مواد زائد جامد

۳ـ اثر تغییر خواص مکانیکی لایه‌های پوششی میانی

بعد از اتمام کار روزانه تخلیه، و با هدف جلوگیری از پراکندگی قطعات زباله توسط باد، کنترل بوی ناشی از تعفن در مدفن، و پیشگیری از انتشار عوامل آلاینده و بیماری‌زا از طریق تماس جانوران و حشرات بر روی مواد زائد متراکم شده لایه‌های پوششی پهن می‌شود. حضور متناوب این لایه‌ها در میان لایه‌های مختلف مواد زائد، با توجه به آلودگی خاک این مناطق و کاهش خواص مقاومتی آنها، در پایداری محل دفن مهم تلقی می‌گردد.

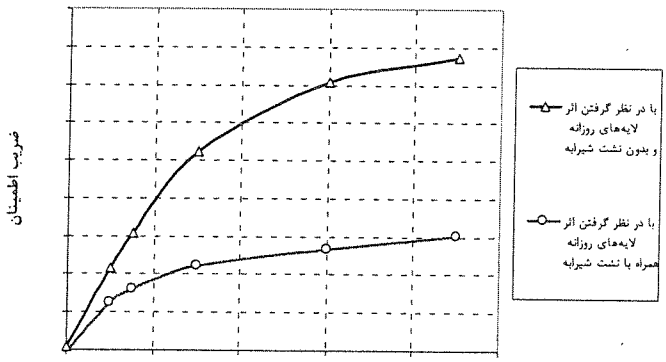
الف ـ اثر زاویه اصطکاک داخلی

در شکل ۱۸، نمودار تأثیر تراوش شیرابه، در مقایسهٔ با حالتی که هیچگونه تراوشی از مدفن صورت نپذیرفته، نشان داده شده است. کم شدن نرخ تغییرات ضریب اطمینان در حالت نشت شیرابه، سبب شده که تا حدودی از میزان اهمیت ساخت نامناسب پوشش‌های روزانه در ایجاد گسیختگی مدفن، به خصوص در مواقعی که جنس آن از خاک نسبتاً درشت دانه با ضریب اصطکاک بالای ۱۵ درجه باشد، کاسته شود. به عنوان مثال، افزایش ۵۰ درصدی ضریب اطمینان، که در ازای ۳۰۰ درصد تغییر در ضریب اصطکاک از ۷/۶ درجه به ۳۰ درجه رخ می‌داد، هم اکنون و با نشت شیرابه به کمتر از ۱۵ درصد نزول کرده است.

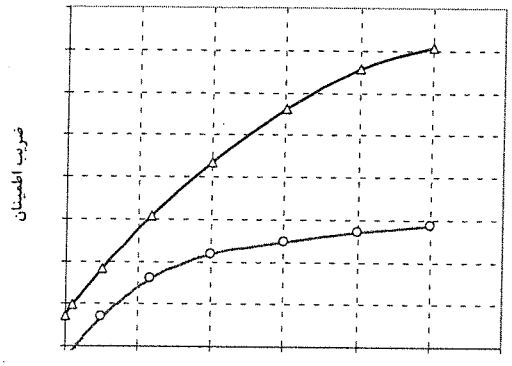
ب ـ اثر چسبندگی

در مورد تأثیرات چسبندگی نیز کماکان وضعیت مشابهی حاکم است. در اینجا هم همانطور که در نمودار شکل ۱۹ نمایش داده شده، افزایش چسبندگی در صورت تراوش شیرابه، تنها تا میزان ۲۰ کیلوپاسکال می‌تواند تأثیرات قابل تأملی در ضریب اطمینان ایجاد نماید؛ و پس از آن به تدریج با افزایش مقادیر چسبندگی، تلاش برای بهبود وضعیت پایداری از طریق افزایش چسبندگی این خاک نمی‌تواند آنچنان که باید موثر واقع شود.

تمامی این بررسی‌ها و تحلیل‌های پارامتریک نشان می‌دهد که نشت شیرابه عامل اصلی کاهش شاخص پایداری در طرح فوکوکای اجرا شده است. نقش پوششهای روزانه و میانی در پیدایش این معضل، مسأله‌ای نیست که به سادگی بتوان از آن صرفنظر کرد. به همین منظور و به دنبال یافتن دلایل اصلی آن، نتایج چندین آزمایش نفوذپذیری که به شیوه هد ثابت (Constant Head Permeability Test) انجام شده بود [۳]، مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۵). اینچنین به نظر می‌رسد که در حالت غیر متراکم، نفوذپذیری خاک در برابر آب، تقریباً «۳/۵» برابر نفوذپذیری با شیرابه است. دلیل آن را می‌توان در لزجت بیشتر شیرابه نسبت به آب، تغییر ماهیت ساختار خاک در مجاورت با شیرابه و نیز «تولید گاز توسط شیرابه» جستجو کرد. تولید گاز از این جهت حائز اهمیت است که ایجاد حباب در داخل خاک، می‌تواند به میزان مؤثری از جریان مایع در داخل خاک جلوگیری کند.



شکل (۱۸) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب زاویه اصطکاک داخلیخاک پوششهای میانی



شکل (۱۹) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب چسبندگی خاک پوششهای میانی

جدول (۵) نتایج آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت در خاک غیر متراکم

شرایط آزمایش	هد مایع (cm)	زمان (s)	مایع خروجی (cm^3)	ارتفاع نمونه (cm)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
آب	۹۲/۵	۱۹۵	۲۰۳	۸/۶	$۱/۲۹\times۱۰^{-۴}$
شیرابه	۹۲/۵	۱۹۵	۶۵	۸/۶	$۳/۶۹\times۱۰^{-۵}$

تکرار این آزمایشها در مورد نفوذپذیری خاک محل با حداکثر تراکم ممکن (γ_{dmax}=۱۹ kN/m^3 و ω_{opt}=٪۱۴)، نشان داد که پس از گذشت حدود سه ماه، هیچ خروج یا نشت شیرابه‌ای از ظرف آزمایش رخ نداده است. میزان نفوذ شیرابه به اندازهٔ تقریباً یک پنجم ارتفاع نمونه طی این مدت، در این مدت در مقاطع عرضی ایجاد شده، مؤید همین امر است (شکل ۲۰).

شکل (۲۰) نمونهٔ متراکم شدهٔ بیرون آمده از قالب نفوذپذیری پس از گذشت حدود سه ماه

به این ترتیب با توجه به لزوم نفوذپذیری کافی این لایه‌ها، برای هدایت شیرابه به سمت زهکشهایی که در کف مدفن تعبیه شده‌اند و تأثیرپذیری فوق‌العادهٔ آنها در برابر تراکم، می‌توان چنین دریافت که با این نحوهٔ اجرای پوششهای میانی و خاکریزهای محیطی، نشت شیرابه از پیکرهٔ خاکریز چندان هم دور از انتظار نبود. عدم تراکم کافی و توجه به اتصال مناسب خاکریزهای محیطی از یکسو، و انتخاب جنس پوششها از مصالح خاکی با نفوذپذیری کم، و تراکم آنها در اثر عبور و مرور وسائل حمل زباله و بعدها بر اثر وزن لایه‌های فوقانی، عملاً حرکت قائم شیرابه را ناممکن و جاری شدن آن را به سمت خارج مدفن از میان خاکریزها تسهیل نموده است. شواهد بیرونی از جمله خروج شیرابه از یک تراز خاص (فراز خاکریز سوم)، و در امتداد یک خط نسبتاً طولانی صحت این بررسی را تأیید می‌نماید.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل‌های پارامتریک مفصلی که «در وضعیت موجود مدفن» صورت پذیرفتند به طور خلاصه در این بخش برشمرده می‌شوند:

ـ نقش خاکریزهای محیطی

خاکریزهای محیطی علاوه بر ایجاد فضای مناسب برای دفن در بالای سطح زمین، نقش مهمی را در پایداری مدفن بر عهده دارند. اصولاً استفاده از مصالحی با زاویه اصطکاک داخلی مناسب، و چسبندگی حتی جزئی، می‌تواند به میزان زیادی در بهبود وضعیت ایستایی مدفن مؤثر باشد. ایجاد تراکم حداکثر در هنگام ساخت این بخش از مدفن، اکیداً توصیه می‌شود. همچنین از آنجایی که ساخت این خاکریزها به صورت تدریجی و مرحله به مرحله انجام می‌پذیرد، پیوستگی لازم بین خاکریزهای اجرا شده نیز باید در دو مرحلهٔ متفاوت ایجاد گردد، زیرا این محل‌ها دارای پتانسیل فوق‌العاده‌ای، برای تبدیل به مسیرهای فرار شیرابه، از داخل مدفن به سمت محیط خارج هستند.

ـ نقش تودهٔ مواد زائد

بیشتر حجم یک مدفن، از مواد زائد جامد تشکیل شده، که به دلیل عبور بخش اعظم سطح گسیختگی از میان این توده، نقش خصوصیات آن در پایداری، نسبت به سایر عناصر موجود در ساختار مدفن، بسیار برجسته و پراهمیت می‌باشد. بنابراین هر اقدامی که به بهبود وضعیت مقاومتی اجزاء تشکیل دهندهٔ آن بیانجامد، مطلوب بوده و افزایش ضریب ایمنی مدفن را در پی خواهد داشت.

یکی از راهکارهایی که برای بهبود وضعیت مقاومتی اینگونه مصالح پیشنهاد می‌شود، استفاده از تراکم است. تراکم علاوه بر اینکه سبب استفادهٔ بهینه از فضای موجود برای دفن می‌گردد، افزایش پارامترهای مقاومت برشی این مواد را نیز به دنبال خواهد داشت، که از این طریق کمک زیادی به پایداری هرچه بیشتر مدفن خواهد نمود.

ـ نقش لایه‌های پوششی روزانه و میانی

از آنجایی که دفن در مدفن غالباً به صورت تدریجی و لایه به لایه صورت می‌پذیرد، بین هر دو لایهٔ مواد زائد یک لایهٔ پوششی روزانه وجود خواهد داشت. با توجه به اینکه جنس این لایه‌ها عموماً از خاک است، لازم است از نفوذپذیری کافی برخوردار باشند، تا بتوانند شیرابهٔ تولیدی ترازهای فوقانی را به سمت کف مدفن و محل نصب زهکشهای جمع‌آوری شیرابه هدایت نمایند.

از آنجا که مسألهٔ نشت شیرابه در طرح «فوکوکای تهران»، در وهلهٔ اول به طور مستقیم با نحوهٔ اجرای این پوششها در ارتباط بود، به منظور به حداقل رساندن اثرات نامطلوب آن، رعایت موارد زیر می‌تواند از بروز مشکلات مشابه در طرح‌های آتی پیش‌گیری نماید:

۱ـ استفاده از مصالحی مانند خاکهای ماسه‌ای و سیلیسی، که کمتر تحت تأثیر شیرابه واقع می‌شوند، و در عین حال از نفوذپذیری بیشتری برخوردار هستند؛

۲ـ اجرای لایه‌هایی، با حداقل ضخامت ممکن؛

۳ـ به هم ریختن پوشش ایجاد شده در هنگام ایجاد لایهٔ فوقانی

۴ـ استفاده از غشاءهای مصنوعی ژئوممبرین (Geomembrane)، و پهن کردن و جمع‌آوری مجدد آن از روی لایه‌های مواد زائد، که ضمن استفادهٔ بهینه از آنها مشکل نفوذناپذیری لایه‌ها را به طور کامل حل خواهد نمود.

بـه دلـیل رابطهٔ تنگاتنگ موجود بین تودهٔ مواد زائد و لایه‌های پوشش میانی، تلاش در جهت بهبود خواص مکانیکی مصالح این لایه‌ها، به صورت محدود، می‌تواند افزایش در ضریب اطمینان مدفن را به دنبال داشته باشد. این افزایش تنها تا زمانی ادامه می‌یابد که برآیند خواص مقاومتی بهبود یافتهٔ لایه‌های پوشش روزانه، از مقادیر نظیر در تودهٔ مواد زائد بیشتر نگردد.

هـرچند به کار بستن توصیه‌های فوق تا حد زیادی می‌تواند موجب بهبود وضعیت پایداری در یک مدفن گردد، اما همانطور کـه مشاهده شد، با نشت شیرابه تقریباً تمامی تدابیری که برای این منظور پیش‌بینی شده بود، بی‌اثر شده و ضریب اطمینان در بهتـرین شرایط تنها ۱۵ درصد قابل افزایش است. این موضوع می‌تواند در عین حال بر درجهٔ اهمیت اجرای دقیق یکایک اجزاء مدفن تأکید داشته باشد.

تشکر و قدردانی

بدینوسـیله از مسـئولان سـازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران، که امکان این مطالعه را فراهم نمودند، همچنین از کارشناسـان مسـتقر در محـل دفن کهریزک تهران که همکاری صمیمانه‌ای را در طول مطالعات میدانی اعمال داشتند، تشکر و قدردانـی مـی‌شود، می‌نماید. مؤلفان از کارکنان آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به ویژه آقایان مهندس تقی بهرامی و مرتضی عبدی که در خلال مطالعات آزمایشگاهی کمک شایان توجهی مبذول داشتند کمال تشکر و سپاس را دارند.

مراجع

[۱] عالمـی، رسـول، "بررسـی عـددی اندرکـنش مـواد زائـد جامـد شـهری با خاک اطراف در روش دفن سطحی"، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن‌ماه ۱۳۸۱.

[۲] عالمـی، رسـول، "روشـهای طـرح و اجـرای محـل دفـن مـواد زائـد جامـد شـهری"، سـمینار کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۱.

[۳] عـبدی، مرتضـی، "بررسـی خـواص مکانیکـی مـواد زائـد جامد و تحلیل پایداری شیروانی انباشتگاه این مواد"، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفندماه ۱۳۸۰.

[۴] عـبدی، مرتضـی، "مدیـریت مـواد زائـد جامـد شـهری از دیـدگاه ژئوتکنـیک زیسـت محیطی"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفندماه ۱۳۷۹.

[۵] عـبدی، مرتضـی، فخاریان،کـاظم، ضـرورت بهسـازی محلهـای دفن مواد زاید جامد شهری در کشورء نخستین کنفرانس بهسازی زمین، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، اسفند ۱۳۸۰.

[۶] مدنـی شـاهرودی، رضـا، گنجـی، جـلال و نبـی بخـش، رامین، "شرحی بر انباشت زباله به روش فوکوکا"، سازمان بازیافت و تبدیل مواد، معاونت پژوهش و توسعه، ۱۳۷۷.

[7] Bagchi, A., "Design, Construction and Monitoring of Sanitary Landfills", John Wiley & Son Inc., 2nd ed., 1994, 361 pp.

[8] Brinkgreve, R.B.J. and Vermeer, P.A, "PLAXIS Manual", A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1998.

[9] Byrne, R.J., Kendal, J., and Brown, S., "Cause and Mechanism of Failure Kettleman Hills Landfill B_19 Unit IA." Stability and Performance of Slopes an Enbankments-II, ASEC GSP 31, 1992.

[10] Cuellar, V., Monte, J.L. & Valerio, J., "Static and Dynamic Elastic Moduli for Waste Fill", Proc. of the third int. cong. on environmental geotechnics, Lisboa, Portugal, 1998.

[11] Daniel, David E., "Geotechnical Practice for Waste Disposal", Chapman & Hall, 1993.

[12] Fukuoka City Environmental Bureau, "The Fukuoka Method, What Is the Semi-aerobic Landfill?", P & R Co., Japan, March 1999, 14 pp.

[13] Eid, H.T., Stark, T.D., Evans, W.D., and Sherry, P.E., "Municipal Solid Waste Slope Failure. I: Waste and Foundation Soil Properties", J.Geotech. and Geoenvir. Engrg., ASEC 126(5), 2000, pp. 397-407.

[14] Gilbert, R.B., Wright, S.G., Evans, W.D., and Liedtke, E., "Uncertainty in Back Analyses of Slopes", Uncertainty in the Geologic Environment, ASEC GSP 58, 1996, pp. 494-517.

[15] Gourc, J.P., Thomas, S. and Vuillemin, M., "Proposal of a Waste Settlement Survey Methodology", Proc. of the Third Int. Cong. on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, 1998, pp. 195-200.

[16] Jessberger, H.L., "Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction", ICE Geotechnical Engineering, 107(2), 1994, pp. 99-104.

[17] Kockel, R. and Jessberger, H.L., 1995, "Stability Evaluation of Municipal Solid Waste Slopes", Proc., 11th ECSMFE, Copenhagen, Denmark, Danish Geotechnical Society, Bulletin 11, Vol.2., 1995.

[18] Mahler, C.F. and Iturri, E.A.Z., "The Finite Element Method Applied to the Study of Solid Waste Landfills", Proc. of the third int. cong. on environmental geotechnics, Lisboa, Portugal, 1998, pp. 89-94.

[19] Pontes Filho, I., Machado Santos, S. and Juca, J.F.T., "Bearing Capacity on Solid Waste in Recife, Brazil", Proc.

of the Third int. Cong. on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, 1998, pp. 191-194.
[20] Siegel, R.A., Robertson, R.J., and Anderson, D.G., "Slope Stability Investigation at a Landfill in Southern California", Geotechnical of Waste Fills_Theory and Practice, ASTM STP 1070, A.Lava and D. Knowles, eds., ASTM, west Conshohocken, Pa., 1990, pp. 259-284.
[21] Singh, S., and Murphy, B.J., "Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills", Geotechnical of Waste Fills_Theory and Practice, ASTM STP 1070, A.Lava and D. Knowles, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., 1990, pp. 240-258.
[22] Stark, T.D., Eid, H.T., Evans, W.D., and Sherry, P.E., "Municipal Solid Waste Slope Failure. II: Stability Analyses", J.Geotech. and Geoenvir. Engrg., ASEC 126(5), 2000, pp. 408-419.