

تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای در برابر سیال اسیدی سازه‌های فروشویی توده‌ای

محمدامین وشادی¹، مهدی امینی^{2*}، ارژنگ زمانی³

- 1 - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، گروه مهندسی معدن، amin.veshadi@yahoo.com
- 2 - استادیار دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، mammi@ut.ac.ir
- 3 - دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده عمران.

(دریافت 25 آبان 1390، پذیرش 6 خرداد 1391)

چکیده

سیستم زهکش سازه‌های فروشویی توده‌ای ترکیبی از خاک‌های دانه‌ای و لوله‌های پلی‌اتیلنی مشبک است. ضریب نفوذپذیری خاک‌های مذکور تأثیر قابل-توجهی بر عملکرد سیستم زهکش دارد. این پارامتر اغلب در آزمایشگاه با آب انجام شده و بر مبنای آن ضخامت لایه زهکشی طراحی می‌شود ولی سیال موجود در توده‌های فروشویی اسیدی است که دانسیته و ویسکوزیته آن با آب متفاوت است. تاکنون ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای مورد استفاده در سیستم زهکش سازه‌های فروشویی توده‌ای در برابر این سیال اسیدی اندازه‌گیری نشده است. در این تحقیق، سه نمونه خاک دانه‌ای که به‌طور معمول در بستر توده‌های فروشویی استفاده می‌شود و یک نمونه سیال اسیدی از هیپ 2 سرچشمه انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، نفوذپذیری خاک-ها در برابر آب و سیال اسیدی اندازه‌گیری شد. در ادامه، با استفاده از ویسکوزیته و دانسیته سیال اسیدی، ضریب نفوذپذیری آن به صورت تئوری پیش‌بینی و نتایج تئوری و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که نفوذپذیری خاک‌های مورد مطالعه در برابر آب 40 تا 45 درصد بیشتر از سیال باردار اسیدی است. در پایان یک مثال موردی (توده فروشویی 4 سرچشمه) انتخاب و ضخامت زهکش شنی آن، بر مبنای نتایج این تحقیق، طراحی شد. بر مبنای این طراحی ضخامت زهکش این توده 0/17 متر به‌دست آمد.

کلمات کلیدی

سازه فروشویی توده‌ای، ضریب نفوذپذیری، خاک دانه‌ای، سیال اسیدی، آب.

1- مقدمه

$$H = \frac{j * (\sqrt{1+4I} - 1) * L * \tan b}{2 \cos b} * F_S \quad (1)$$

$$j = 1 - 0.12 \exp \left[- \left[\log \left(\frac{8I}{5} \right) \right]^2 \right]$$

$$I = \frac{q_h}{K_{Lt} * \tan^2 b}, K_{Lt} = \frac{K_{La}}{RF_{PC} * RF_{CC} * RF_{BC}}$$

پارامترهای مورد استفاده در این رابطه عبارتند از:

H : ضخامت زهکش شنی (m)

j, I : پارامترهای بدون بعد

L : فاصله بین لوله‌های زهکش فرعی هیپ (m)

b : زاویه شیب بستر (deg)

q_h : پاشش اسید روی هیپ ($m^3/s/m^2$)

K_{Lt} : ضریب نفوذپذیری طولانی مدت (m/s)

K_{La} : ضریب نفوذپذیری آزمایشگاهی (m/s)

RF_{PC} : ضریب کلوگینگ فیزیکی

RF_{CC} : ضریب کلوگینگ شیمیایی

RF_{BC} : ضریب کلوگینگ بیولوژیکی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب نفوذپذیری آزمایشگاهی

(k_{La}) تأثیر قابل توجهی در تعیین ضخامت زهکش شنی دارد.

این پارامتر به سیال و دانه‌بندی خاک بستگی دارد. در این تحقیق

ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای معمول مورد استفاده در بستر

سازه‌های فروشویی با استفاده از محلول باردار اسیدی و آب تعیین

می‌شود. سپس بر مبنای نتایج این آزمایش‌ها، رابطه‌ای تئوری

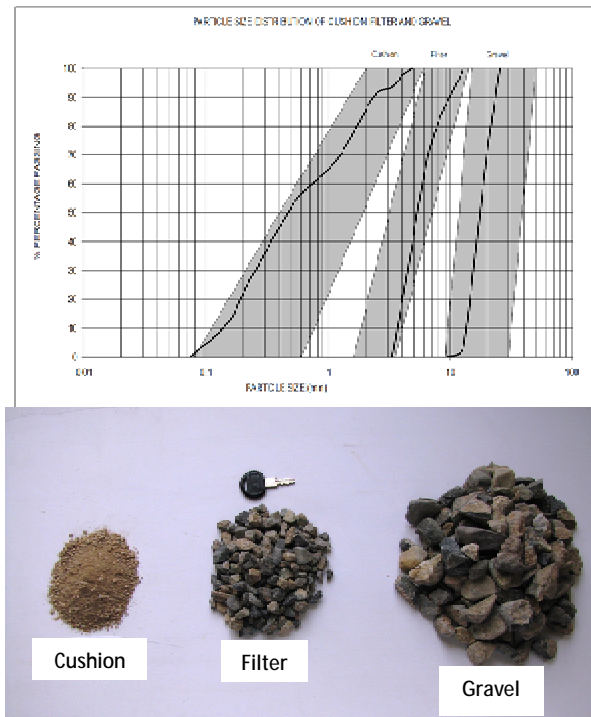
برای پیش‌بینی ضریب نفوذپذیری خاک‌ها در برابر سیال باردار

اسیدی پیشنهاد می‌شود.

به‌منظور ساخت سازه‌های فروشویی توده‌ای، سطح وسیعی با شیب بین 5 تا 10% انتخاب و به وسیله مصالح طبیعی و مصنوعی (خاک مخلوط و رس متراکم، لایه رس مصنوعی و لاینر ژئوممبران) ایزوله می‌شود [1]. لایه ایزوله اصلی بستر توده‌های فروشویی لاینر ژئوممبران است. ژئوممبران از جنس مواد پلیمری بوده و ضخامت آن بین 1 تا 2 میلی‌متر متغییر است. این لایه در برابر سوراخ‌شدگی بسیار حساس است و در صورت سوراخ شدن محلول باردار اسیدی از آن به زمین نشت می‌کند [2]، [3]، [4]. برای محافظت از لاینر ژئوممبران در برابر سوراخ‌شدگی یک لایه خاک ماسه‌ای با نام کاشین روی آن پهن می‌شود. روی کاشین، لایه زهکش شنی و شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلن مشبک قرار می‌گیرد. برای محافظت از زهکش شنی در برابر گرفتگی، روی آن یک لایه فیلتر پهن شده و سپس توده ماده معدنی به صورت پله-ای روی سطح فیلتر ریخته می‌شود. سپس روی سطح پله‌های معدنی سیال اسیدی می‌پاشند. سیال اسیدی در حین عبور از لایه معدنی، مس موجود در ذرات خاک را در خود حل کرده و تحت تأثیر وزنش به سمت بستر توده حرکت می‌کند [5]. محلول حاصل که حامل مس است به نام محلول باردار شناخته می‌شود. این محلول، از طریق سیستم زهکش (خاک‌های دانه‌ای موجود در بستر و شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلن مشبک) به حوضچه‌های اسید هدایت شده و از آنجا به کارخانه SX-EW ارسال می‌شود (شکل 1). در کارخانه لیچینگ مس از محلول جدا شده و سیال اسیدی با نام رافینیت، برای شستشوی مجدد، به روی توده معدنی بازگردانده می‌شود [6]، [7] و [8]. نفوذپذیری خاک‌های دانه-ای موجود در بستر توده‌های فروشویی (کاشین، شن و فیلتر)، نقش مؤثری در طراحی سیستم زهکش ایفا می‌کند.

در سال 1958، Darcy با انجام آزمایش روی ماسه‌های شسته‌شده، رابطه‌ای تجربی برای محاسبه دبی سیال عبوری از خاک‌های دانه‌ای ارائه کرد [9]. این رابطه سال‌ها برای طراحی ضخامت زهکش‌های ماسه‌ای و شنی مورد استفاده قرار می‌گرفت. در سال 2000، Giroud رابطه‌ای تحلیلی برای تعیین ضخامت زهکش شنی باطله انبارها ارائه کرد [10]. در سال 2007، مجدی و همکاران با استفاده از روش تحلیلی Giroud روابطی برای طراحی سیستم زهکش سازه‌های فروشویی ارائه کردند [11]، [12]. مطابق با این روابط ضخامت زهکش شنی سازه‌های فروشویی توده‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

مجاری لایه شنی توسط ذرات ریزدانه جلوگیری می‌کند. ولی به دلیل اینکه این لایه‌ها روی لاینر ایزوله اصلی بستر هیپ (لایه ژئوممبران) قرار می‌گیرند به زهکشی سیال باردار نیز کمک می‌کنند. بنابراین مشخصات فنی و ضخامت لایه‌های کاشین و فیلتر با توجه به وظایف اصلی آن‌ها انتخاب می‌شود و سپس تأثیر این لایه‌ها در زهکشی سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق خاک‌های انتخابی برای تعیین ضریب نفوذپذیری از نمونه‌های کاشین، شن و فیلترمورد استفاده در هیپ 2 سرچشمه انتخاب شدند. تصویر و منحنی دانه‌بندی این خاک‌ها در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2: منحنی‌های دانه‌بندی و نمونه خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق

3- سیستم نفوذپذیری مورد استفاده در این تحقیق

برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری خاک‌های مورد مطالعه در برابر سیال باردار اسیدی و آب، یک سیستم نفوذپذیری خاص مطابق با اصول ارائه شده در استاندارد ASTM-2434 [۱۳] ساخته شد (شکل 3). به دلیل استفاده از سیال اسیدی در آزمایشات، کلیه بخش‌های سیستم مذکور، ضد اسید (پلاکسی گلاس) انتخاب شد. همچنین، به منظور کنترل و ثابت نگه داشتن دمای سیال در طول آزمایش، یک عدد المنت حرارتی ضد اسید متصل به ترموکوپل در مخزن اسید تعبیه شد. در این سیستم قطر و ارتفاع سلول‌ها به ترتیب، 0/2 و 0/54 متر می‌باشند. با استفاده



شکل 1: زهکشی سیال باردار از طریق خاک‌های دانه‌ای موجود در بستر توده‌های فروشویی (توده فروشویی 1 معدن مس سرچشمه)

2- خصوصیات سیالات و خاک‌های مورد استفاده

سیال‌های مورد استفاده در این تحقیق آب مقطر و محلول با دار اسیدی سازه‌های فروشویی می‌باشند. به دلیل اهمیت موضوع و افزایش دقت نتایج، محلول باردار اسیدی از هیپ 2 سرچشمه تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. دمای سیال باردار خروجی از سازه‌های فروشویی به دمای محیط، دمای سیال اسیدی پاشش شده و واکنش بین سیال و کانی‌های مس اکسیدی وابسته است. بر مبنای اندازه‌گیری‌های میدانی در سازه‌های فروشویی مس سرچشمه، در این تحقیق تمامی آزمایشات در دمای 32 درجه سانتیگراد انجام شد. دانسیته سیال‌های انتخابی به وسیله اندازه‌گیری مستقیم و ویسکوزیته آن‌ها در دمای بالا با استفاده از دستگاه ویسکوزیته-سنج به دست آمد. این نتایج در جدول 1 نشان داده شده است. جدول 1: دانسیته و ویسکوزیته آب و محلول باردار اسیدی در دمای 32°C

سیال ها	دما	گرانروی	وزن واحد حجم
	(°C)	(mPa.s)	(KN/m ³)
آب	32	0/83	10/01
سیال باردار اسیدی	32	2/04	12/02

در سازه‌های فروشویی توده‌ای، لایه‌های کاشین، زهکش شنی و فیلتر روی لایه ژئوممبران قرار می‌گیرند. زهکشی سیال باردار وظیفه اصلی لایه شنی است ولی لایه‌های فیلتر و کاشین نیز به عنوان وظیفه فرعی در زهکشی سیال باردار تأثیر قابل توجهی دارند. در حقیقت کاشین از لاینر ژئوممبران در برابر سوراخ شدگی محافظت کرده و فیلتر از بسته شدن

مخازن تحتانی شده و پس از آن برای بازگشت به چرخه وارد مخزن ذخیره می‌شود. المنت قرار گرفته در مخازن بالای سلول‌ها نیز دمای سیال در حال چرخش را در 32 درجه سانتیگراد ثابت نگه می‌دارد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، ابتدا آزمایش‌ها با آب مقطر انجام شد و سپس مخازن از آب تخلیه و بعد از خشک شدن نمونه خاک‌ها، آزمایش‌ها با سیال باردار اسیدی تکرار شد.

از سیستم نفوذپذیری مذکور می‌توان ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای را در دمای دلخواه در برابر سیال‌های اسیدی و آب اندازه‌گیری کرد. برای انجام آزمایش‌ها، سیال با دبی ثابت از مخزن ذخیره توسط پمپ به مخازن بالای سلول‌ها منتقل می‌شود و بر اثر نیروی ثقل وارد سلول‌های انباشته از خاک‌های دانه‌ای می‌شود. سیال پس از عبور از خاک برای محاسبه دبی سیال عبوری، وارد



شکل 3: سیستم طراحی شده برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌ها دانه‌ای در دمای ثابت. (1) ترموکوپل (2) مخزن فوقانی برای ایجاد ارتفاع ثابت اسید (3) المنت حرارتی ضد اسید (4) لوله سرریز (5) سلول شفاف ضد اسید برای نمونه‌های شن، فیلتر و کاشین (6) مخزن تحتانی برای ایجاد ارتفاع ثابت (7) پمپ (8) مخزن ذخیره سیال باردار

3-1- نتایج آزمایش‌ها

طبق قانون دارسی ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای به

صورت زیر به دست می‌آید:

$$K_{La} = \frac{Q}{A \cdot i} \quad (2)$$

پارامترهای مورد استفاده در این رابطه عبارتند از:

Q : دبی خروجی سیال از سلول (m^3/s)

i : گرادیان (شیب) هیدرولیکی

K_{La} : ضریب نفوذپذیری آزمایشگاهی (m/s)

A : سطح مقطع نمونه (سلول) (m^2)

پارامترهای موجود در رابطه 2 را می‌توان به صورت زیر اندازه‌گیری کرد:

$$\begin{cases} i = \frac{\Delta h}{L} \\ Q = \frac{V}{\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

جدول 2: ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای بستر توده‌های فروشویی در برابر آب و سیال باردار اسیدی در دمای 32°C

ضریب نفوذپذیری (m/s)		خاک‌ها
در برابر آب	در برابر سیال باردار اسیدی	
0/12765	0/07435	شن
0/05343	0/02964	فیلتر
0/00156	0/00085	کاشین

4- پیش‌بینی تئوری ضریب نفوذپذیری زهکش شنی در برابر سیال باردار اسیدی

ضریب نفوذپذیری خاک‌ها را می‌توان با استفاده از رابطه تئوری زیر پیش‌بینی کرد [15]:

$$K_{La} = \frac{kg}{m} \quad (4)$$

پارامترهای مورد استفاده در این رابطه عبارتند از:

k : ضریب نفوذپذیری مطلق خاک (بدون وابستگی به سیال)

g : وزن واحد حجم سیال

m : گرانروی سیال

بنابراین ضریب نفوذپذیری زهکش شنی در برابر سیال باردار اسیدی و آب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K_{PLS} = \frac{kg_{PLS}}{m_{PLS}} \quad (5)$$

$$K_{Water} = \frac{kg_{Water}}{m_{Water}} \quad (6)$$

با تقسیم این دو رابطه بر یکدیگر ضریب نفوذپذیری زهکش شنی در برابر سیال باردار اسیدی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$K_{PLS} = \frac{m_{Water} g_{PLS}}{m_{PLS} g_{water}} K_{Water} \quad (7)$$

با جایگذاری نتایج ارائه شده در جدول 1 در رابطه 7، رابطه زیر برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای در برابر سیال باردار اسیدی در دمای 32 تعیین می‌شود:

$$K_{PLS} = 0.489 K_{Water} \quad (8)$$

با استفاده از رابطه 8 و نتایج ارائه شده در جدول 2 ضریب نفوذپذیری خاک‌های مورد مطالعه (کاشین، فیلتر، شن) را در

پارامترهای مورد استفاده در این رابطه عبارتند از:

Δh : اختلاف سطح سیال در مخازن فوقانی و تحتانی (m)

l : ارتفاع خاک موجود در سلول (m)

V : حجم سیال (m^3)

Δt : زمان (s)

با استفاده از سیستم نفوذپذیری ساخته شده (شکل 3) و روابط 2 و 3، ضریب نفوذپذیری خاک‌های شنی، کاشین و فیلتر در برابر آب مقطر و سیال باردار اسیدی اندازه‌گیری شد. هر یک از آزمایش‌ها 10 بار تکرار شد. مقدار متوسط ضریب نفوذپذیری خاک‌های فوق در برابر سیال‌های مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای در برابر آب به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سیال باردار اسیدی است. زیرا همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در جدول 1 مشخص است، گرانروی سیال باردار اسیدی بیشتر از آب بوده بنابراین حرکت آن از بین ذرات خاک دشوارتر است. از این‌رو اگر ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای مورد استفاده در بستر توده‌های فروشویی (K_{La}) با استفاده از آب اندازه‌گیری شود، استفاده از نتیجه این آزمایش برای طراحی سیستم زهکش (مطابق رابطه 1) ضخامت زهکش را کمتر از مقدار مورد نیاز پیش‌بینی می‌کند. در این شرایط، سیستم زهکش نمی‌تواند سیال اسیدی ورودی به توده معدنی را به طور کامل زهکشی کند و سطح سیال در توده به مرور زمان افزایش می‌یابد. افزایش سطح اسید در توده فروشویی مشکلات عمده‌ای برای فرآیند هیدرومتالورژی به وجود می‌آورد که بعضی از آن‌ها عبارتند از:

- کاهش پایداری توده فروشویی در اثر افزایش فشار اسید حفره‌ای روی سطح لاینر ژئوممبران
- افزایش زمان ماند اسید و ماده معدنی و انحلال کانی‌های مزاحم
- افزایش نشت اسید از لایه‌های بستر توده در اثر افزایش فشار هیدرواستاتیک اسید
- افزایش احتمال روان‌گرایی توده فروشویی [14]

استفاده از رابطه 1 در سه حالت زیر طراحی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند:

- با K_{La} استفاده از سیال باردار اسیدی اندازه‌گیری شده است.
- با K_{La} استفاده از آب مقطر اندازه‌گیری شده و نتیجه آزمایش مطابق با رابطه 8 برای سیال باردار اسیدی اصلاح شده است.
- با K_{La} استفاده از آب مقطر اندازه‌گیری شده و نتیجه آزمایش مستقیماً مورد استفاده قرار گرفته است.

5-1- توصیف مثال موردی:

هیپ 4 معدن مس سرچشمه برای فروشوی و استحصال مس از 10 میلیون متر مکعب خاک اکسیدی مس در سال 1389 در مساحتی در حدود 220000 متر مربع طراحی و ساخته شد. این هیپ در حقیقت توسعه هیپ 1 سرچشمه از بخش شمال غربی آن می‌باشد (شکل 4). سیال باردار خروجی از این هیپ، همانند هیپ‌های 1، 2 و 3، از طریق لوله‌های پلی‌اتیلنی به یک خط لوله مرکزی منتقل و سپس برای استحصال مس به کارخانه لیچینگ ارسال می‌گردد. در شکل 5 نمایی از ساخت این هیپ و توالی لایه‌های مورد استفاده در بستر آن نشان داده شده است. سیستم زهکش این توده شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی مشبک می‌باشد که به صورت "استخوان ماهی" به یکدیگر متصل و در خاک‌های دانه‌ای قرار گرفته‌اند. شماتیک کلی این سیستم در شکل 6 قابل مشاهده است [12]. در این سیستم محلول باردار از طریق خاک‌های دانه‌ای موجود در بستر توده، به ویژه لایه شنی، زهکشی شده و به سمت لوله‌های مشبک فرعی هدایت می‌شود. سپس از طریق این لوله‌ها، محلول به لوله اصلی منتقل و از طریق آن به خارج از توده فروشوی زهکشی می‌گردد. بنابراین وظیفه اصلی خاک‌های دانه‌ای بستر، انتقال محلول باردار به لوله‌های فرعی می‌باشد.

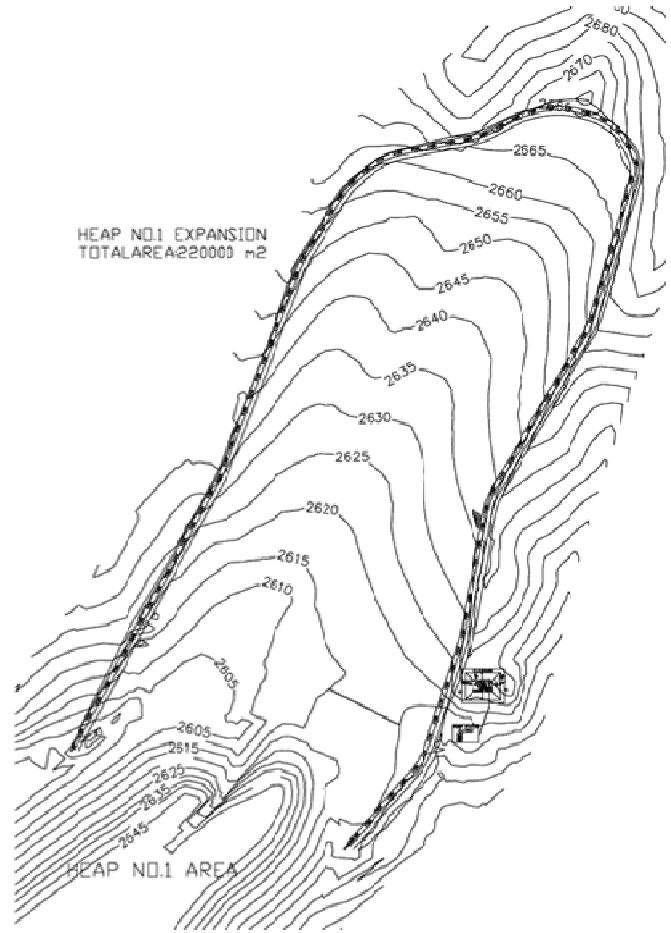
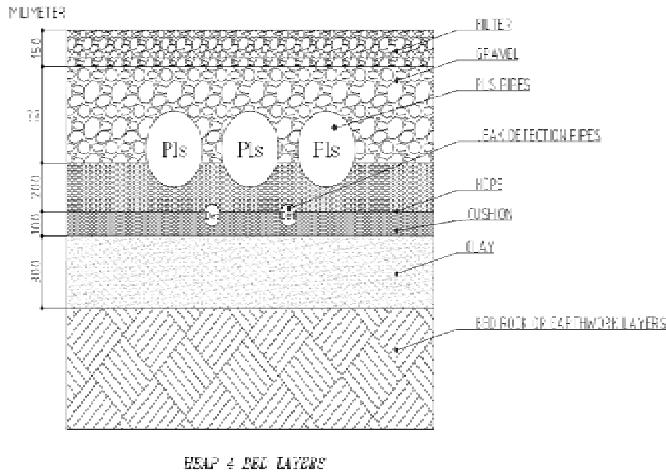
برابر سیال باردار اسیدی به صورت تئوری محاسبه و نتایج آن در جدول 3 نشان داده شده است. مقایسه این نتایج با یکدیگر نشان‌دهنده تطابق مطلوب نتایج تئوری و آزمایشگاهی با یکدیگر است. بنابراین می‌توان از رابطه 8 برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای در برابر سیال باردار اسیدی بستر توده‌های فروشوی استفاده کرد. با توجه به این‌که اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری خاک‌ها در برابر سیال باردار اسیدی در آزمایشگاه ملاحظات و تجهیزات ویژه‌ای را می‌طلبد نتیجه بالا بسیار ارزشمند است.

جدول 3: ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای بستر توده‌های فروشوی در برابر آب و سیال باردار اسیدی در دمای 32 درجه

خاک‌ها	ضریب نفوذپذیری (m/s) در برابر سیال باردار اسیدی	
	اندازه‌گیری شده	محاسبه شده
شن	0/0743	0/0622
فیلتر	0/0296	0/0261
کاشین	0/00085	0/00076

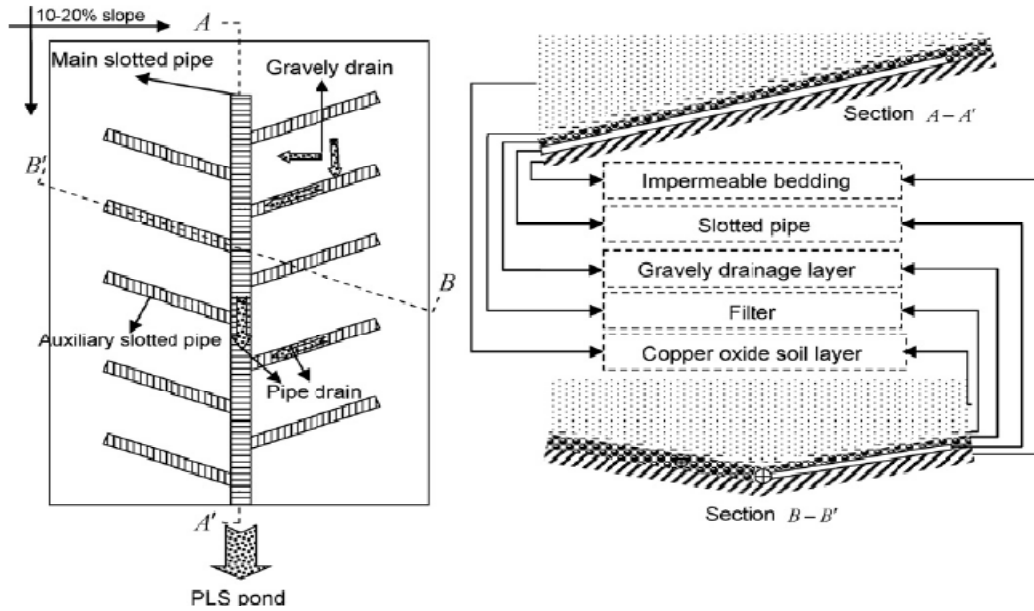
5- مطالعه موردی (توده فروشوی 4 سرچشمه)

ضریب نفوذپذیری آزمایشگاهی خاک‌های دانه‌ای بستر توده‌های فروشوی تأثیر قابل توجهی در طراحی سیستم زهکش این سازه‌ها دارد. همانطوریکه در این مقاله نشان داده شد، آزمایش مربوطه باید با استفاده از سیال باردار اسیدی انجام شود تا سیستم زهکش سازه متناسب طراحی گردد. در شرایطی که به دلیل مسائل ایمنی امکان انجام آزمایش با سیال باردار اسیدی وجود ندارد توصیه می‌شود، آزمایش با آب انجام شده و نتایج آن مطابق با رابطه 8 اصلاح شوند. برای ارزیابی نتایج ارائه شده در این مقاله، سیستم زهکش سازه فروشوی 4 مس سرچشمه با



شکل 5: نمایی از زیرسازی هیپ 4 مس سرچشمه

شکل 4: توپوگرافی بستر توده فروشویی 4 مس سرچشمه (طرح توسعه هیپ 1)



شکل 6: شماتیک سیستم زهکش مورد استفاده در هیپ 4 سرچشمه [12]

2-5- طراحی ضخامت زهکش شنی توده فروشویی

های زهکش هدایت می کند. بنابراین سطح اسید در توده افزایش نمی‌یابد. در شرایطی که آزمایش نفوذپذیری با آب انجام شود و نتیجه آن مطابق با رابطه 8 اصلاح شده و بر مبنای آن سیستم زهکش هیپ طراحی گردد ضخامت زهکش شنی 0/2 متر بدست می‌آید. در این حالت ضخامت زهکش هیپ 0/03 متر بیشتر از مقدار واقعی (0/17 متر) است. بر این مبنای، خاک‌های دانه‌ای بستر هیپ می تواند کل اسید ورودی به توده را به لوله‌های زهکش منتقل کرده و سطح اسید در توده افزایش نمی‌یابد. ولی اگر طراحی سیستم زهکش بر مبنای نتیجه آزمایش نفوذپذیری با آب مقطر طراحی شود ضخامت زهکش شنی 0/1 متر می شود. بر مبنای رابطه 1 این لایه می تواند $8/8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{S}/\text{m}^2$ سیال باردار اسیدی را زهکشی نماید. ولی، همانطوریکه در بالا ذکر گردید، برای جلوگیری از افزایش سطح اسید در توده معدنی لایه شنی باید $1/48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{S}/\text{m}^2$ سیال باردار را زهکشی و به سمت لوله‌های فرعی موجود در بستر هدایت نماید. در این حالت، لایه فوق تنها 60% از سیال باردار را زهکشی کرده و 40% از آن در هیپ باقی می‌ماند. به مرور زمان سیال باقی مانده در هیپ موجب افزایش سطح اسید در توده معدنی می‌شود که مشکلات عمده‌ای را برای فرآیند هیدرومتالورژی در پی خواهد داشت. همانطوریکه در این مثال مشخص گردید، اگر طراحی سیستم زهکش بر مبنای آزمایش‌های انجام شده با آب طراحی گردد ضخامت لایه زهکش شنی کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می شود که برای فرآیند لیچینگ مشکل‌آفرین خواهد بود.

برای طراحی ضخامت زهکش شنی در این هیپ، ابتدا میزان سیال زهکشی شده توسط لایه‌های کاشین و فیلتر محاسبه شده و سپس ضخامت لایه شنی با توجه به سیال باقی مانده طراحی می‌گردد. با توجه به نقشه توپو گرافی بستر هیپ (شکل 4)، گزارش برنامه‌ریزی تولید کارخانه و داده‌های ارائه شده در جداول 2 و 3 پارامترهای مورد نیاز برای تعیین دبی زهکشی شده توسط فیلتر و کاشین تعیین گردید که نتایج آن در جدول 4 قابل مشاهده می‌باشد. در ستون انتهایی این جدول، مطابق با رابطه 1، دبی زهکشی شده توسط این دو لایه محاسبه و ارائه شده است. کل اسید پاششی روی توده معدنی $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{S}/\text{m}^2$ می‌باشد. همانطوریکه از جدول 4 مشخص است $5/2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{S}/\text{m}^2$ اسید پاششی توسط لایه‌های فیلتر و کاشین زهکشی می‌شود. بنابراین باقی مانده اسیدپاششی ($1/48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{S}/\text{m}^2$) باید توسط لایه شنی زهکشی شود. بر این اساس پارامترهای مورد نیاز برای طراحی ضخامت زهکش شنی این هیپ تعیین و در جدول 5 نشان داده شده است. در ستون انتهایی این جدول، مطابق با رابطه 1، ضخامت زهکش شنی مورد نیاز برای این توده فروشویی محاسبه و ارائه شده است. همانطوریکه ملاحظه می‌گردد، اگر زهکش شنی بر مبنای نتایج آزمایش نفوذپذیری با سیال باردار طراحی گردد، لازم است 0/17 متر خاک با قالب شنی روی کل بستر هیپ پهن گردد. در این شرایط خاک‌های دانه‌ای بستر توده فروشویی (0/2 متر کاشین، 0/17 متر شن و 0/15 متر فیلتر) کل اسید ورودی به توده فروشویی را زهکشی کرده و به داخل لوله-

جدول 4: پارامترهای مورد نیاز برای تعیین دبی زهکشی شده توسط فیلتر و کاشین در سازه فروشویی 4 سرچشمه

متغیر مصالح	H (m)	F_s	b (Deg)	L (m)	K_{la} (mS^{-1})	RF_{BC}	RF_{PC}	RF_{CC}	q_l ($\text{m}^3\text{S}^{-1}\text{m}^{-2}$)
فیلتر	0/20	2	8	140	0/02964	1/5	2	1/5	5×10^{-7}
کاشین	0/15	2	8	140	0/00085	1/5	2	1/5	2×10^{-8}

جدول 5: پارامترهای مورد نیاز برای طراحی ضخامت زهکش شنی سازه فروشویی 4 سرچشمه

متغیر سیال	H (m)	F_s	b (Deg)	L (m)	K_{la} (mS^{-1})	RF_{BC}	RF_{PC}	RF_{CC}	q_l ($m^3S^{-1}m^{-2}$)
سیال باردار اسیدی (اندازه گیری شده)	0/17	2	8	140	0/07435	1/5	2	1/5	$1/48 \times 10^{-7}$
سیال باردار اسیدی (محاسبه شده)	0/20	2	8	140	0/06229	1/5	2	1/5	$1/48 \times 10^{-7}$
آب	0/10	2	8	140	0/12765	1/5	2	1/5	$1/48 \times 10^{-7}$

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ضریب نفوذپذیری خاک‌های دانه‌ای موجود در بستر توده‌های فروشویی (کاشین، شن و فیلتر) در برابر آب و سیال باردار اسیدی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهند در دمای $32^{\circ}C$ ضریب نفوذپذیری زهکش شنی در برابر سیال باردار اسیدی $0/07435 \text{ m/s}$ و در برابر آب $0/12765 \text{ m/s}$ است همان‌گونه که مشاهده می‌شود اختلاف ضریب نفوذپذیری $41/75$ درصد است. زیرا این سیال ویسکوزتر از آب بوده و بنابراین حرکت آن از بین دانه‌های خاک مشکل‌تر است. چون اندازه‌گیری مستقیم ضریب نفوذپذیری خاک‌ها در برابر سیال باردار اسیدی ملاحظات و تجهیزات ویژه‌ای را می‌طلبد، با انجام این آزمایشات رابطه تئوری $k_{pls}=0.489 k_{water}$ برای پیش‌بینی پارامتر مذکور ارائه شد. بنابراین توصیه می‌شود، در صورت امکان، برای طراحی ضخامت زهکش شنی توده‌های فروشویی آزمایش نفوذپذیری با سیال باردار انجام شود. ولی اگر امکانات انجام آزمایش بالا وجود ندارد لازم است آزمایش نفوذپذیری با آب مقطر انجام شده و نتیجه آن مطابق رابطه بالا اصلاح و سپس سیستم زهکش بر مبنای آن طراحی شود. استفاده از نتایج این تحقیق برای طراحی سیستم زهکش سازه فروشویی 4 مس سرچشمه نشان می‌دهد اگر آزمایش نفوذپذیری با آب مقطر انجام شده و نتیجه آن، بدون اصلاح، برای طراحی لایه شنی استفاده شود، ضخامت لایه به‌طور

تقریبی نصف مقدار مورد نیاز بدست می‌آید. این نتیجه منجر به افزایش سطح اسید در توده فروشویی می‌شود که برای فرآیند لیچینگ خطرآفرین است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت ملی صنایع مس ایران، شرکت خدمات فنی و مهندسی کانی مس و شرکت ژئوتکنیک زمین‌ساخت-آرما انجام شده است که نویسندگان مقاله برخورد لازم می‌دانند از مدیران این شرکت‌ها تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- [1] S. KarimiNasab, A. Hojat and M. R. MollaeiFard, 2007, "Technical factors for selecting optimum heap leach pad sites", E&M. J., pp. 54-59.
- [2] J.P. Giroud and R. Bonaparte, 1989, "Leakage through liners constructed with Geomembranes-Part I", Geomembrane Liners, Geotextiles and Geomembranes 8(2), pp. 27-67.
- [3] J.P. Giroud and R. Bonaparte, 1989, "Leakage through liners constructed with Geomembranes - Part II: Composite Liners", Geotextiles and Geomembranes 8(2), pp. 71-111.
- [4] J.P. Giroud, 1997, "Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to Geomembrane defects", Geosynthetics International, Vol. 4, pp. 335-348.
- [5] Kampf, S.K., Salazar, M. and Tylor, S.W., 2002, "Preliminary investigation of effluent drainage from mining heap leach facilities", Vadose Zone Journal, Vol.

1, pp. 186-196.

[6] M. E. Smith., A. Zhao., 2004 “*Drainage net for improved service and cost reduction in heap leaching*”, GRE Engineering Solution Magazine.

[7] R.T.Thiel, M. E. Smith, 2004, “*State of the practice review of heap leach pad design issues*”, J. Geotext. Geomembr. 22 555–568.

[8] AminiChermahini, M., 2005, “*Block to block stability analysis and its application in heap leaching structures*”, MSc., Thesis, Submitted to the School of Mining Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Iran.

[9] Darcy, H., 1856, “*les fontainespubliques de la ville de Dijon*”, Dalmont, Paris.

[10] Giroud, J.P., Zorenberg, J.G, Zhao, A.,2001, “*hydraulic design of geosynthetic and granular liquid collection layers*”, Geosynthetics International, pp. 285-380.

[11] Majdi., M., Amini., S. KarimiNasab.,2007, “*Adequate drainage system design for heap leaching structures*”, Journal of Hazardous Material, 147, pp. 288-296.

[12] Majdi., M. Amini., A., AminiChermahini., 2009, “*an investigation on mechanism of acid drain in heap leaching structures*”, Journal of Hazardous Material, 165, pp. 1098-1108.

[13] ASTM D2434 - 68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head).

[14] Olson, S.M. and T.D. Stark, 2003, “*Yield strength ratio and liquefaction analysis of slope and embankment*”, Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Eng., ASCE, pp. 727-737.

[15] B. M. Das. 2007, “*Advanced soil mechanics*”, Taylor and Francis.