

اثر سیستم پوشش تک لایه در کنترل زهاب اسیدی سدهای باطله معادن

کاظم بدو*^۱ و مهرداد ارجمند قره‌قشلاقی^۲

^۱ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه
^۲ کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲، پذیرش: ۹۶/۶/۲۷، نشر آنلاین: ۹۶/۶/۲۸)

چکیده

در صنعت معدن از سیستم‌های پوششی روی مواد زائد معدنی به عنوان روشی مؤثر برای کاهش تولید زهاب اسیدی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها استفاده از سیستم پوششی تک لایه است که در آن، تراز آب نزدیک سطح باطله‌ها باقی می‌ماند. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی عددی، رفتار این نوع پوشش در کنترل اکسیژن ورودی از پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریوهای مختلفی برای مدل‌سازی تعریف گردید که شامل چهار نوع پروفیل خاک سیستم پوشش شامل مصالح ریزدانه، درشت دانه و یا ترکیب ریزدانه و درشت دانه بود. با در نظر گرفتن شرایط تراز آب مختلف، این پروفیل‌ها برای توانایی مصالح باطله برای حفظ درجه اشباع بالا، برای کاهش حداکثر عمق نفوذ و شار اکسیژن، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج محاسبات نشان داد که با کاهش عمق تراز آب، درجه اشباع خاک در پوشش افزایش یافته و موجب عملکرد مناسب پوشش می‌شود. برای یک عمق آب مشخص، نفوذ اکسیژن قویاً به اندازه دانه‌های خاک و مقدار فشار ورود هوای باطله‌ها بستگی دارد. عمق تراز آب مؤثرترین پارامتر کنترلی بر ورود اکسیژن می‌باشد؛ طوری که هیچ پروفیلی با تراز آب یک متر اجازه اکسیداسیون باطله‌ها را نداد و شار اکسیژن ناچیز می‌شود. مصرف اکسیژن در پوشش باعث کاهش شار اکسیژن ورودی، عمق نفوذ اکسیژن و غلظت آن در سطح مشترک پوشش و باطله‌ها می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سد باطله، زهاب اسیدی معدن، پوشش خاکی، اکسیداسیون، مدل‌سازی عددی.

۱- مقدمه

های سطحی، زیرزمینی و خاک همراه است. کاهش و جلوگیری از تولید زهاب اسیدی در طول چند دهه اخیر از مسائل چالشی و مورد توجه محققین بوده است. جلوگیری از تولید زهاب اسیدی نیازمند جلوگیری از اکسیداسیون با محدود کردن دسترسی اکسیژن به باطله‌های واکنش‌پذیر می‌باشد که می‌تواند با اجرای لایه/لایه‌های پوششی مناسب روی مواد باطله، کنترل شود (Dobchuk, 2002). ضریب دیفیوژن اکسیژن به طور قابل توجهی در درجات اشباع بزرگتر از ٪ ۸۵ کاهش می‌یابد (O'Kane و همکاران، ۱۹۹۵؛ Aubertin و همکاران، ۲۰۰۰؛ Aachib و همکاران، ۲۰۰۴).

پوشش‌های مختلفی به عنوان روشی مؤثر برای پیش‌گیری یا کاهش تولید AMD در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب نوع پوشش بر مبنای ملاحظات اقتصادی و فنی می‌باشد. یک پوشش خاکی لایه

زهاب اسیدی معدن^۱ (AMD) به مواد شسته شده اسیدی حاوی فلزات سنگین و سولفات‌ها اطلاق می‌شود. زهاب از اکسایش کانی‌های سولفیدی به ویژه پیریت در باطله‌های کارخانه فرآوری سولفید و دмп‌های باطله کم عیار معادن سولفیدی و ذغال حاصل می‌شود و یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است که صنعت معدن با آن مواجه است (Wheeland و Feasby, 1991). کانی‌های سولفیدی در اثر وجود اکسیژن و آب، اکسید می‌شوند تا این که اسید سولفوریک تولید شود. محیط با pH پایین، حلالیت بسیاری از فلزات را افزایش داده و سیال تولید شده می‌تواند دارای غلظت بالایی از فلزات باشد (Dubrovsky و همکاران، ۱۹۸۴؛ Blowes و Jambor, 1990). آلودگی ناشی از زهاب اسیدی معدن در مناطق معدنی با مشکلات مربوط به آلودگی آب

1. Acid Mine Drainage (AMD)

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۱۴۱۸۹۹۱

آدرس ایمیل: k.badv@urmia.ac.ir (ک. بدو)، mehrdadarjmand88@yahoo.com (م. ارجمند قره‌قشلاقی).

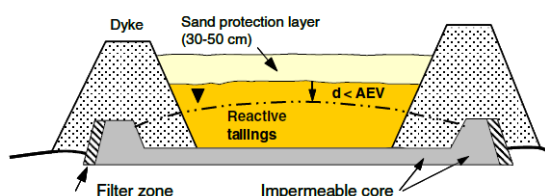
این تحقیق بر روی نوعی پوشش خاکی که به صورت تک لایه بر روی سد باطله ایجاد می شود، بحث کرده و رفتار این پوشش در کنترل گاز اکسیژن ورودی از سیستم پوشش نهایی را مورد ارزیابی قرار می دهد. در این مطالعه از کد کامپیوتری VADOSE/W استفاده شده است. این نرم افزار یک نرم افزار المان محدود دو بعدی و از بسته نرم افزاری Geo-Studio می باشد. فرمول بندی نرم افزار، آنالیز مسائل ساده و پیچیده را از آنالیز ساده تراوش ناشی از بارش، تا مسائل پیچیده شامل ذوب برف، تعرق گیاه، تبخیر سطحی، رواناب و دیفیوژن گاز (رادون و اکسیژن) را شامل می شود (Geo Slope, ۲۰۰۸).

۲- مطالعات پیشین

Dagenais و همکاران (۲۰۰۶) با مطالعه عددی رفتار سیستم پوششی تک لایه با تراز آب بالا آمده از جنس مصالح ماسه ای را ارزیابی کرده و اثر پارامترهای مختلفی مانند خواص و ضخامت لایه پوشش، عمق تراز آب و خواص هیدرولیکی باطله ها را با مدل سازی عددی با نرم افزار Soil Cover بررسی کردند. نتایج مطالعات این محققین نشان داد که وقتی عمق تراز آب کمتر از نصف AEV مصالح باشد، باطله های پوشش شده با لایه ماسه ای ۳۰ سانتی متری برای مدت زمان ۶۰ روزه می توانند به صورت اشباع باقی بمانند و در نتیجه، چنین درجه اشباعی مانع جریان اکسیژن خواهد شد. نتایج شبیه سازی برای بررسی اثر ضخامت لایه ماسه ای، اهمیت این پارامتر را بر پروفیل های محتوای آب برای باطله ها نشان داد. بدون وجود لایه ماسه ای، درجه اشباع در نزدیک سطح باطله ها ۷۰ تا ۷۴ درصد بوده، در حالی که در اثر وجود لایه ماسه ای، درجه اشباع در باطله ها بالای ۹۵ درصد باقی ماند. لایه ماسه ای در محدود کردن تبخیر مؤثر بوده و باعث می شود باطله ها نزدیک به اشباع باقی بمانند. Demers و همکاران (۲۰۰۹) رفتار پوشش تک لایه از جنس باطله های سولفور زدوده را بررسی کردند. باطله های سولفور زدوده، به عنوان لایه نگهدارنده رطوبت عمل کرده تا دیفیوژن اکسیژن را محدود کنند و سولفید باقی مانده آنها می تواند مقداری از اکسیژن را که از میان پوشش دیفیوژن پیدا می کند، مصرف کرده تا کارایی پوشش بهتر شود. این افراد با آزمایش های ستونی ابزاربندی شده، رفتار پوشش را بررسی کردند. نتایج کار این محققین نشان می دهد که پوشش سولفور زدوده با تراز آب بالا آمده، می تواند انتقال اکسیژن را کاهش داده و تولید زهاب اسیدی را کاهش دهد. در ستون با تراز آب پایین تر، جریان های بالایی در بالا و انتهای ستون محاسبه شد. تأثیر محتوای سولفید بر جریان اکسیژن در ته ستون مشهود بود؛ طوری که باعث کاهش جریان اکسیژن شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ضخامت پوشش (۰/۵ تا ۱ متر) پارامتر عمده ای در کاهش انتقال اکسیژن

لایه می تواند متکی بر اثرات جبهه موینگی باشد. روش دیگر اجرای پوشش های تک لایه است که در آن، تراز آب نزدیک سطح باطله ها باقی می ماند (Demers و همکاران، ۲۰۰۹). مدل مفهومی از سیستم پوشش تک لایه با تراز آب بالا آمده، در شکل (۱) نشان داده شده است. به عنوان یک قاعده کلی، تراز آب از نظر موقعیت مکانی باید طوری باشد که ارتفاع باطله های بالای آن، کمتر از مقدار فشار ورود هوای مصالح^۱ (AEV) باشد. ایجاد تراز آب بالا آمده در حوضچه باطله ها روشی است که از خواص موینگی باطله ها استفاده می کند تا از دیفیوژن اکسیژن جلوگیری نموده و تولید AMD را کنترل کند (Quangrawa و همکاران، ۲۰۰۵). یکی از فواید اصلی این روش، بهبود پایداری ژئوتکنیکی سدهای احاطه کننده مواد باطله، در مقایسه با پوشش آبی، به علت تراز موینگی (سطح فریاتیکی) پایین و فشارهای آب حفره ای کوچک تر می باشد. همچنین از ریسک فرسایش ناشی از آب و یخ در امتداد وجوه داخلی سدها کاسته شده و در مقایسه با پوشش آبی یا سیستم های پوششی چند لایه، از هزینه کمتری برخوردار است (Mend, ۱۹۹۶). در واقع، اساس پوشش تک لایه، کنترل محل تراز سطح آب است تا این که در اثر خاصیت موینگی، مواد باطله در وضعیت نزدیک به اشباع باقی بمانند. این روش بر این اصل استوار است که ضریب دیفیوژن اکسیژن در محیط متخلخل اشباع یا نزدیک به اشباع خیلی پایین بوده و جریان اکسیژن ایجاد شده، باعث کاهش نرخ اکسیداسیون کانی های سولفیدی می شود (Quangrawa و همکاران، ۲۰۰۹).

محققین متعددی روی رفتار و خصوصیات لایه های پوشش اجرا شده روی مواد زائد معدنی (سدهای باطله) مطالعه کرده اند. با توجه به این که در کشور ایران بهره گیری از ظرفیت معادن مورد توجه بوده است، دانستن معیارهای طراحی سیستم پوشش برای محل های دفع مواد زائد معدنی ضروری به نظر می رسد. در مناطقی که آب های سطحی و زیرزمینی به وسیله زهاب اسیدی معادن آلوده شده باشند، تصفیه و پاکسازی منابع آب جهت مصارف شرب و صنعتی، بسیار مشکل و پرهزینه خواهد بود.



شکل ۱- مدل مفهومی تراز آب بالا آمده درون باطله ها برای کاهش تولید زهاب اسیدی معدن (Quangrawa و همکاران، ۲۰۰۹)

1. Air Entry Value (AEV)

باطله واکنش پذیر می باشد که دارای ضخامت ۳/۲ متر است. پروفیل های Fine-Fine (FF) و Coarse-Coarse (CC) به ترتیب شامل مصالح پوشش و باطله از جنس مصالح ریزدانه و درشت دانه می باشند. پروفیل Fine-Coarse (FC) شامل پوشش از جنس مصالح ریزدانه و مواد باطله از جنس مصالح درشت دانه می باشد و پروفیل Coarse-Fine (CF) شامل پوشش از جنس مصالح درشت دانه و مواد باطله از جنس مصالح ریزدانه می باشد. دو پروفیل اضافی شامل پروفیل Base-Fine (BF) و Base-Coarse (BC) در شکل (۲) نشان داده شده اند که بیانگر سناریوهای مینا، باطله های ریزدانه (بدون پوشش) و باطله های درشت دانه (بدون پوشش) می باشند. این پروفیل ها برای ارزیابی کارایی پوشش با تخمین جریان اکسیژن به باطله های پوشش شده استفاده می شوند.

۲-۳-۲- مدل سازی عددی

از نرم افزار VADOSE/W برای تحلیل عددی مسئله استفاده شد (Geo Slope، ۲۰۰۸). شبکه بندی امان محدود استفاده شده در آنالیزها، دارای مش یکنواخت مستطیلی است. هندسه مدل شامل دو لایه می باشد که لایه بالایی مربوط به مصالح پوشش و لایه پایینی مربوط به مصالح باطله می باشد.

۳-۲-۱- معادلات حاکم

برنامه کامپیوتری VADOSE/W انتقال حرارت و آب را کوپل کرده تا جریان آب، حرارت و بخار را از میان خاک اشباع و غیر اشباع شبیه سازی کند. انتقال اکسیژن وابسته به درجه اشباع مصالح می باشد؛ لیکن محاسبه جریان آب و حرارت را تحت تأثیر قرار نمی دهد و جریان اکسیژن به طور جداگانه شبیه سازی می شود. معادلات مشخصه حاکم برای جریان آب و انتقال حرارت با استفاده از روابط (۱) و (۲) بیان می شوند.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial \left[\frac{P}{\rho g} + y \right]}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial \left[\frac{P}{\rho g} + y \right]}{\partial y} \right] + Q = \lambda \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right] + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{ty} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q_t + c_p v_x \frac{\partial T}{\partial x} + c_p v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن، P فشار، P_v فشار بخار رطوبت خاک، m_v شیب تابع محتوای حجمی آب، k_x و k_y هدایت هیدرولیکی در جهت های x و y ، Q جریان مرزی اعمال شده می باشد.

از میان پوشش نمی باشد؛ گرچه برای شرایط صحرایی که تبخیر و تعرق بالا است، ضخامت پوشش می تواند عامل مهمی باشد.

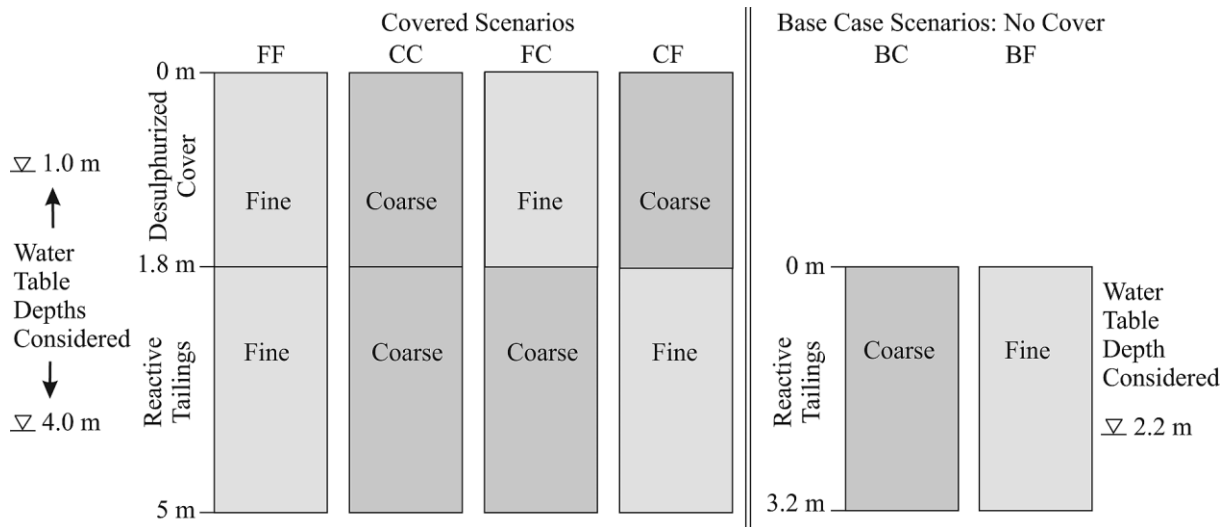
Quangrawa و همکاران (۲۰۰۹) چگونگی جلوگیری از AMD با بالا آمدن سطح ایستابی را با انجام آزمایش های ستونی و تحلیل پارامترها بررسی کردند. تأثیر ارتفاع سطوح ایستابی مختلف با اندازه گیری pH و همچنین غلظت یون های اصلی شامل سولفات، آهن، روی، مس و سرب بررسی شد. با برقرار کردن عمق تراز آب زیر سطح باطله ها در حدود نصف AEV مصالح، نتایج مطالعه نشان داد که سیستم تراز آب بالا آمده، می تواند در کاهش تولید زهاب خیلی مؤثر باشد. عوامل اصلی کنترل کننده، هدایت هیدرولیکی و AEV باطله ها، عملکرد سیستم تراز آب بالا آمده را با محدود کردن عدم اشباع شدگی ناشی از زهکشی، بهبود می بخشد.

Dobchuck و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر پوشش از جنس باطله های با سولفید پایین را بر روی مواد باطله سد باطله معدن دتور^۲ ارزیابی کردند. هدف این سیستم پوششی، کاهش ورود اکسیژن با استفاده از درجه اشباع بالای ۸۵ درصد و نیز مصرف اکسیژن در پوشش بود. ضریب دیفیوژن اکسیژن به طور قابل توجهی در درجه اشباع های بالاتر از ۸۵ درصد کاهش می یابد. تحقیق این افراد شامل مطالعه صحرایی، مطالعه آزمایشگاهی و مدل سازی عددی بود. بررسی صحرایی شامل ابزاربندی حوضچه باطله ها برای اندازه گیری داده های هواشناسی، تراز آب و محتوای آب بود. نمونه های باطله در بررسی آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی و ژئوشیمیایی ارزیابی شدند. هدف مدل سازی عددی ارزیابی پروفیل غلظت اکسیژن و جریان اکسیژن در پروفیل های مختلف بود. مدل یک بعدی جریان غیر اشباع و دیفیوژن اکسیژن برای پیش بینی پروفیل های محتوای آب، عمق نفوذ اکسیژن و جریان دیفیوژنی اکسیژن، استفاده شد. برای جریان غیر اشباع از نرم افزار Soil Cover و برای مدل دیفیوژن اکسیژن، از روش عددی تفاضلات محدود استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که پوشش به کار رفته در کل سد باطله، نفوذ اکسیژن را به درون باطله های سولفیدی خیلی کاهش نمی دهد.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- سناریوهای مدل شده

در کارهای پژوهشی معمولاً روال کار چنین است که سناریوهای محتمل مختلفی برای تحقیق علمی در نظر گرفته می شوند. در تحقیق حاضر، سناریوهای مدل شده در نرم افزار برای پوشش سد باطله، پروفیل های نشان داده شده در شکل (۲) می باشد. ضخامت پوشش ۱/۸ متر بوده و مصالح زیر پوشش، مصالح



شکل ۲- پروفیل‌های خاک سناریوهای پایه (بدون پوشش- شکل راست) و سناریوهای دارای پوشش (شکل چپ) در مدل‌سازی عددی

درجات اشباع پایین تر حرکت اکسیژن در یک محیط متخلخل، به علت ضریب دیفیوژن پایین اکسیژن در آب نسبت به هوا از طریق حفرات جزئی پر شده از هوا می‌باشد. وقتی درجه اشباع افزایش می‌یابد، دیفیوژن هم از طریق فاز آبی و هم فاز گازی خواهد بود و تحقیق نشان داده است که حرکت اکسیژن در محیط متخلخل اساساً به وسیله دیفیوژن می‌باشد (Nicholson و همکاران، ۱۹۸۹، Collin، ۱۹۸۷، Yanful و همکاران، ۱۹۹۳).

برای دیفیوژن مولکولی یک بعدی در یک محیط متخلخل غیر اشباع که اکسیژن را در یک نرخ مرتبه اول مصرف می‌کند، جریان اکسیژن لحظه‌ای و غلظت اکسیژن در مکان Z و زمان t با استفاده از قانون اول و دوم فیک (معادلات (۵) و (۶)) تعیین می‌شوند:

$$F(z, t) = -D_e \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\theta_{eff} C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} (D_{eff} \frac{\partial C}{\partial y}) - k_r C \quad (6)$$

در این معادلات، C غلظت اکسیژن در هوای منفذی (برحسب جرم بر واحد حجم)، θ_{eff} تخلخل معادل برای دیفیوژن که به صورت $\theta_w + H\theta_a$ تعریف می‌شود، θ_a محتوای حجمی هوا، θ_w محتوای حجمی آب، H ثابت تعادل هانری، D_{eff} ضریب دیفیوژن مؤثر (m^2/s) و k_r ضریب نرخ واکنش مؤثر $(1/year)$ می‌باشد.

۳-۲-۲- شرایط اولیه و مرزی

برای توصیف سناریوها در نرم‌افزار VADOSE/W چهار نوع شرط مرزی به کار رفته است که شامل شرط مرزی از نوع داده‌های هواشناسی و شرط مرزی غلظت اکسیژن 280 گرم بر متر مکعب (غلظت طبیعی اکسیژن در هوا) در بالای ستون مدل‌سازی شده و شرط مرزی تراز آب و غلظت صفر اکسیژن مدل شده در ته ستون مدل‌سازی شده می‌باشد. شرایط اولیه برای گره‌ها شامل فشار، دما

D_v ضریب انتشار بخار، γ هد ارتفاعی، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب جاذبه، t زمان، L_v گرمای نهان تبخیر، Kt_x و Kt_y مقادیر هدایت حرارتی در جهت X و Y ، T دما، Q_t جریان مرزی دمای به کارگرفته شده، c_p مقدار گرمای ویژه حجمی، λ_t ظرفیت گرمایی حجمی ظاهری خاک و v_x و v_y سرعت داری در جهت-های x و y می‌باشد. فشار بخار از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$P_v = P_{vs} \left(e^{\frac{-P_w}{\rho R T}} \right) = P_{vs} h_{rair} \quad (3)$$

که در آن، P_{vs} فشار بخار اشباع برای آب خالص آزاد، w جرم مولکولی بخار آب، R ثابت جهانی گازها، T دما برحسب درجه کلونین و h_{rair} رطوبت نسبی هوا می‌باشد.

تبخیر واقعی با استفاده از روش پنمن- ویلسون محاسبه می‌شود (معادله (۴)) که در آن، E تبخیر واقعی (mm/day) ، Γ شیب منحنی فشار بخار اشباع- دما در دمای متوسط هوا (kPa/oC) ، Q انرژی تابشی خالص در سطح (mm/day) ، v ثابت سایکرومتریک، $E_a = f(u) P_a (B-A)$ ، $U_a, f(u) = 0.35(1 + 0.15 U_a)$ ، p_a فشار بخار در هوای بالای سطح تبخیر سرعت باد (km/hr) ، A معکوس رطوبت نسبی هوا و B معکوس رطوبت نسبی در سطح خاک می‌باشد.

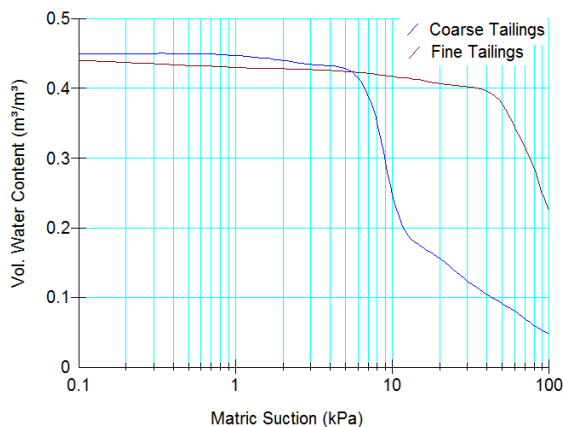
$$E = \frac{\Gamma Q + v E_a}{v A + \Gamma} \quad (4)$$

در نرم‌افزار، معادلات (۱) تا (۴) به طور هم زمان به روش المان محدود حل می‌شوند تا نرخ تبخیر واقعی (E) ، فشار بخار (P_v) ، فشار آب (P) و دما (T) به دست بیایند.

انتقال گاز در محیط متخلخل اساساً به وسیله دیفیوژن مولکولی یا آدوکشن از میان فضای حفرات انجام می‌گیرد. در

جدول ۱- مشخصات مصالح برای داده‌های کار Dobchuck و

پارامترها	باطله‌های ریزدانه	باطله‌های درشت‌دانه
N	۰/۴۴	۰/۴۵
K_{sat}	1×10^{-7} m/s	1×10^{-6} m/s
AEV	۵۰ kPa	۸ kPa
m_v	$6/5 \times 10^{-5}$	$6/5 \times 10^{-5}$
G_s	۲/۸۹	۲/۸۹



شکل ۳- منحنی مشخصه رطوبتی برای مصالح باطله ریزدانه و درشت‌دانه

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی برای دو نمونه انتخاب شده از کار دبیچوک و همکاران و سناریوهای تعریف شده مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نتایج مدل‌سازی عددی شامل نمودارهای درجه اشباع، نمودارهای غلظت اکسیژن و جریان‌های اکسیژن برای سناریوهای مختلف ارائه شده است.

۴-۱- نتایج مربوط به نمودارهای درجه اشباع

در این قسمت، نتایج حاصل از نمودارهای درجه اشباع برای سناریوهای با تراز آب ۱ متر و ۴ متر ارائه شده است. به دلیل حجم زیاد نمودارها از آوردن نمودارها برای سناریوهای با تراز آب ۱ متر صرف نظر شده است.

نتایج مربوط به پروفیل شامل پوشش حاوی مصالح ریزدانه روی مصالح باطله ریزدانه (پروفیل FF) برای تراز آب ۴ متر، در شکل (۴) نشان داده شده است. این سناریو برای بیشتر سال دارای درجه اشباع بیشتر از ۸۵ درصد می‌باشد. AEV ۵۰ کیلو پاسکال باطله‌های ریزدانه، از غیر اشباع شدن باطله‌ها جلوگیری می‌کند. سناریوی با تراز آب ۱ متر برای کل سال مدل شده دارای درجه اشباع بیشتر از ۸۵ درصد بوده و بنابر این اکسیداسیونی اتفاق نخواهد افتاد.

نتایج مربوط به پروفیل CC (پروفیل همگن از جنس مصالح درشت دانه) و تراز آب ۴ متر در شکل (۵) نشان داده شده است. در هر

و غلظت اولیه گاز اکسیژن می‌باشند. برای شرایط اولیه فشار از تراز آب اولیه، برای دما از دمای روز اول و برای غلظت گاز اکسیژن از غلظت اولیه صفر استفاده شد.

۳-۲-۳- داده‌های ورودی به نرم‌افزار

برای اجرا کردن برنامه VADOSE/W داده‌های هواشناسی و پوشش گیاهی، مشخصات خاک شامل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و هدایت حرارتی باید به نرم‌افزار وارد شوند. همچنین ضریب واپاشی برای مصالح مدل شده در شبیه‌سازی جریان گاز اکسیژن مورد نیاز هستند. در این مطالعه، از داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده معدن Detour که در پایان‌نامه دبیچوک (Dobchuck, ۲۰۰۲) منتشر شده بود استفاده گردید. پوشش گیاهی از نوع علف و با کیفیت خوب به کار برده شد. داده‌های پوشش گیاهی لازم ورودی به نرم‌افزار شامل شاخص سطح برگ (LAI)، تابع حد رطوبت گیاه، عمق ریشه و طول دوره رشد می‌باشند.

داده‌های مصالح استفاده شده در این تحقیق از کار دبیچوک و همکاران (Dobchuck, ۲۰۱۳) انتخاب شد که مشخصات آنها در جدول (۱) و منحنی مشخصه رطوبتی این نمونه‌ها در شکل (۳) آورده شده است. تابع نفوذپذیری غیر اشباع برای این مصالح از روش ونگنوختن در نرم‌افزار VADOSE/W به دست آمد. ظرفیت گرمایی ویژه جرمی و هدایت حرارتی خاک دو پارامتر ورودی برنامه می‌باشند که انتقال حرارت را در خاک توصیف می‌کنند. محتوای آب و رفتار حرارتی خاک می‌توانند همدیگر را تحت تأثیر قرار دهند، زیرا خاک غیر اشباع شامل هوا، آب و ذرات جامد می‌باشند و هوا و آب رفتار حرارتی متفاوتی دارند. از مقادیر معمول در راهنمای نرم‌افزار برای خواص حرارتی مدل استفاده شد. توجه شود که مصالح پوشش نیز از جنس مصالح باطله هستند که سولفید آنها به مقدار کم کاهش یافته تا مصالح مناسب برای استفاده به عنوان مصالح پوشش فراهم گردد. ضریب نرخ واکنش مؤثر (kr) برای باطله‌های سولفور زدوده ریزدانه (مصالح پوشش ریزدانه) برابر ۴۴/year و برای باطله‌های سولفور زدوده درشت دانه (مصالح پوشش درشت دانه) برابر ۳/۴۴/year می‌باشد. برای باطله‌های سولفیدی ریزدانه این مقدار ۱۹۱/year و برای باطله‌های سولفیدی درشت‌دانه برابر ۱۴/year می‌باشد. همچنین، ضریب نفوذپذیری اشباع برای باطله‌های ریزدانه برابر 1×10^{-7} m/s و برای باطله‌های درشت‌دانه 1×10^{-6} m/s می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق سناریوهای مختلف برای بررسی دیفیوژن اکسیژن از میان لایه پوشش انتخاب گردید که این سناریوها در شکل (۲) نشان داده شدند.

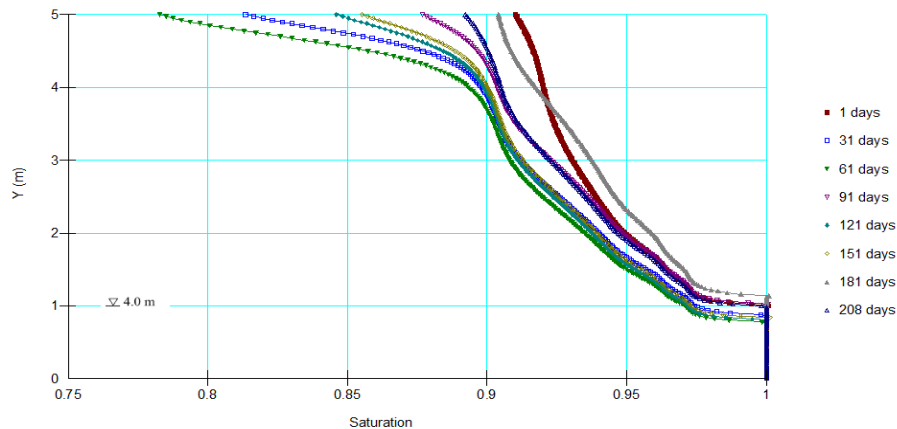
سناریو، غیر اشباع شدگی قابل توجهی در سطح وجود دارد. نتایج سناریوی با تراز آب ۴ متر در شکل (۷) آورده شده است که نشان می‌دهد کل ۱/۸ متر پوشش، برای بیشتر سال دارای متوسط درجه اشباع ۳۷ درصد می‌باشد، در حالی که باطله‌های ریزدانه تقریباً اشباع می‌باشند. نتایج سناریوی با تراز آب ۱ متر نشان می‌دهد ۰/۴ متر از باطله‌های سطحی برای بیشتر سال، در کمتر از ۸۵ درصد درجه اشباع باقی می‌مانند.

۴-۲- نتایج مربوط به نمودارهای غلظت اکسیژن

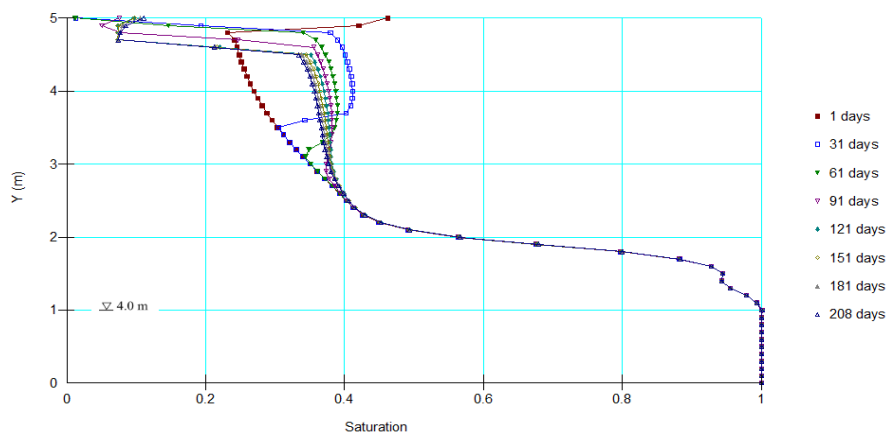
نمودارهای غلظت اکسیژن برای پروفیل FF در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند. در اثر درجه اشباع بالا، در حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، نفوذ اندک به درون باطله-ها صورت گرفته و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، به درون باطله‌های واکنش پذیر نفوذی انجام نگرفته است. اثر مصرف اکسیژن در پوشش نشان می‌دهد عمق نفوذ اکسیژن در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، کمتر شده است (شکل (۹)).

دو سناریو، در سطح باطله‌ها غیر اشباع شدگی وجود دارد. پروفیل باطله‌های همگن درشت‌دانه با تراز آب ۴ متر به علت AEV پایین باطله‌های درشت دانه، به پایین ترین درجه اشباع منجر می‌شود. شکل (۵) نشان می‌دهد که درجه اشباع بیشتر باطله‌های بالای تراز آب، برای کل سال مدل شده، کمتر از ۸۵ درصد می‌باشد. فقط تقریباً ۰/۶ متر از باطله‌ها بالای تراز آب بیشتر از ۸۵ درصد درجه اشباع باقی مانده‌اند. درجه اشباع نزدیک سطح پوشش در کل طول سال بین ۱ و ۴۶ درصد تغییر می‌کند. نتایج سناریوی با تراز آب ۱ متر نشان می‌دهد تقریباً ۰/۴ متر از باطله‌های سطحی برای کل سال مدل شده، کمتر از ۸۵ درصد درجه اشباع می‌باشند. نتایج مربوط به پروفیل FC که دارای اثر جبهه موینگی می‌باشد، نشان می‌دهد در سناریوی با تراز آب ۴ متر (شکل (۶)) پوشش از جنس مصالح ریزدانه درجه اشباع بالایی نسبت به مصالح درشت دانه داشته (اثر جبهه موینگی)، اما مقدار کمی پایین درجه اشباع ۸۵ درصد می‌باشد. در سناریوی با تراز آب ۱ متر، کل باطله-ها در کل سال مدل شده، در بیشتر از ۸۵ درصد درجه اشباع باقی‌مانده‌اند.

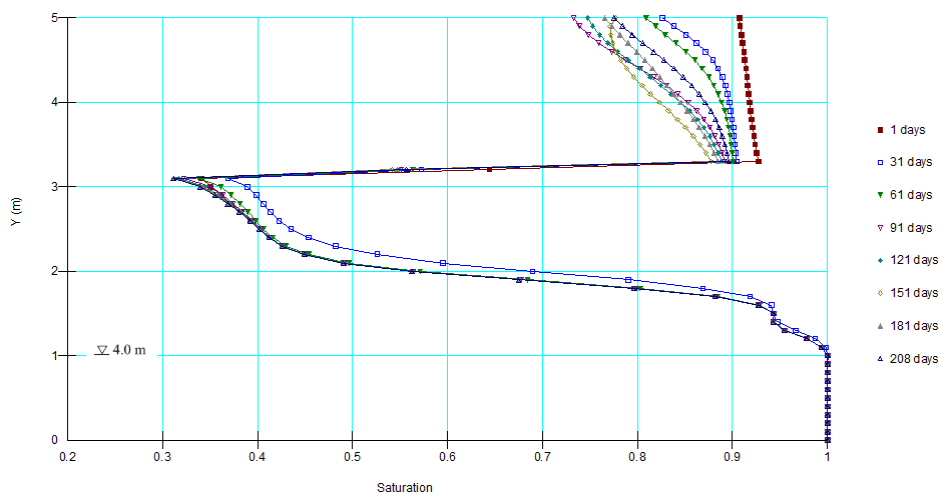
نتایج درجه اشباع برای پروفیل CF نشان می‌دهد در هر دو



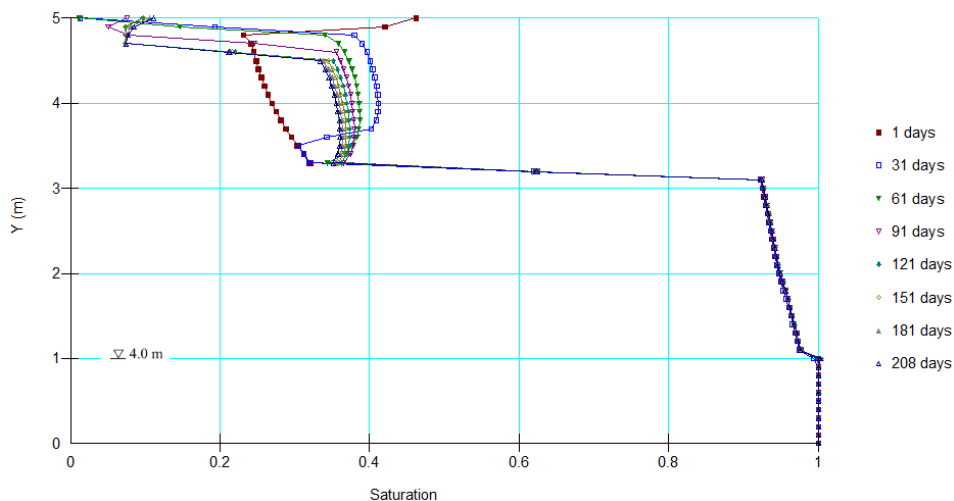
شکل ۴- نمودار درجه اشباع برای پروفیل FF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب



شکل ۵- نمودار درجه اشباع برای پروفیل CC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب



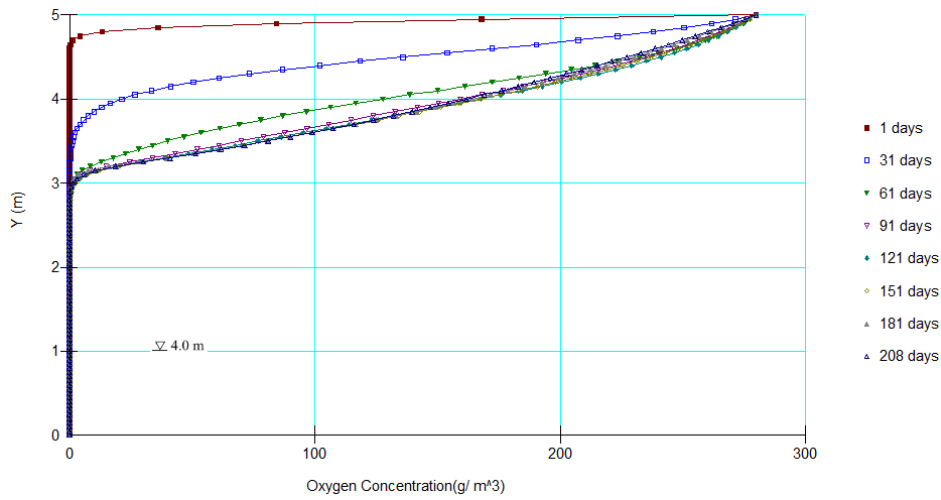
شکل ۶- نمودار درجه اشباع برای پروفیل FC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب



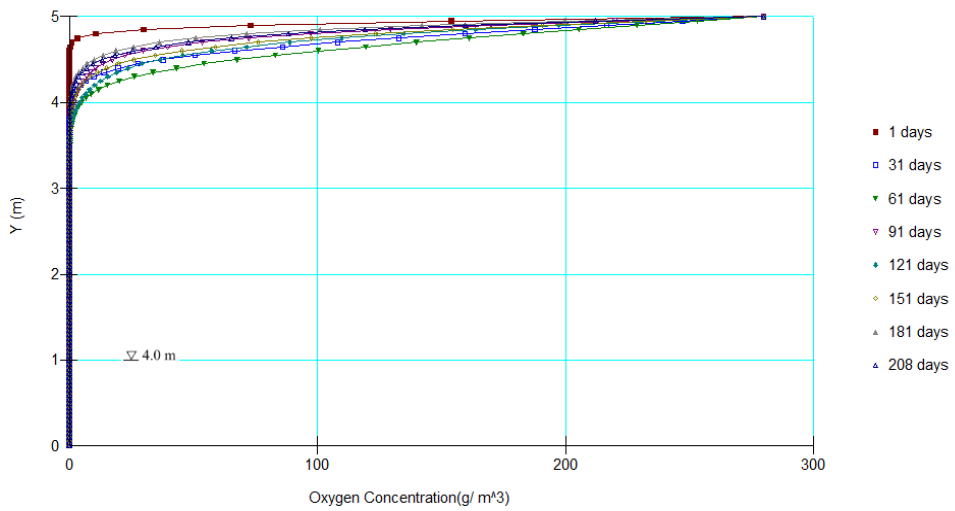
شکل ۷- نمودار درجه اشباع برای پروفیل CF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودارهای غلظت اکسیژن برای پروفیل FC با اثر جبهه مویبگی و تراز آب ۴ متر نشان داده شده است. شکل (۱۲) پروفیل غلظت اکسیژن را در حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش نشان می‌دهد که منجر به گرادیان تند غلظت اکسیژن در سطح مشترک باطله‌های ریزدانه و درشت‌دانه می‌شود. در این شبیه‌سازی با توجه به این که در لایه مواد باطله ریزدانه، درجه اشباع کمتر از ۸۵ درصد بود، اکسیژن از میان باطله‌های ریزدانه نفوذ می‌کند و وقتی اکسیژن به باطله‌های درشت‌دانه می‌رسد، مقاومت کمی به دیفیوژن از طریق باطله‌های درشت‌دانه وجود داشته و غلظت کمی از اکسیژن از طریق قسمت غیر اشباع باطله‌های درشت‌دانه نفوذ می‌کند. در روز ۲۰۸ این غلظت ۲ درصد می‌باشد. برخلاف این سینتیک اکسیداسیون در پوشش ریزدانه اکسیژن را مصرف کرده و مانع از رسیدن آن به سطح مشترک باطله‌های ریزدانه شده و اکسیژن با غلظت خیلی پایین به درون باطله‌های درشت دانه نفوذ می‌کند.

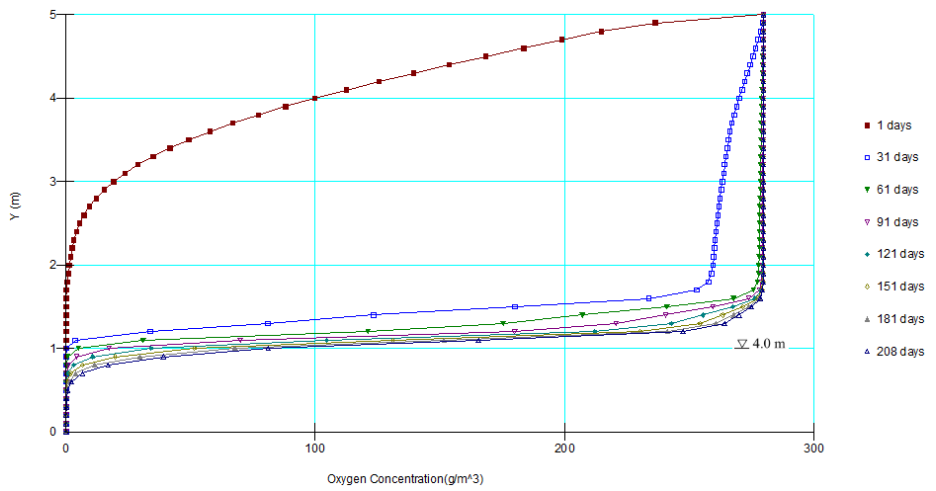
نمودارهای غلظت اکسیژن برای پروفیل CC با تراز آب ۴ متر در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، اثر مصرف اکسیژن بر عمق نفوذ اکسیژن قابل توجه است. وقتی که مصرف اکسیژن در پوشش در نظر گرفته نمی‌شود، درجه اشباع پایین در پروفیل CC با تراز آب ۴ متر منجر می‌شود اکسیژن به عمق بیشتر از ۴ متر تجاوز کند (شکل (۱۰)). وقتی که مصرف اکسیژن در پوشش در نظر گرفته می‌شود، پروفیل تقریباً بعد از ۹۰ روز به یک حالت پایا رسیده و اکسیژن به عمق نزدیک ۴ متر می‌رسد (شکل (۱۱)). غلظت اکسیژن در سطح مشترک باطله‌ها در حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش بین ۱۹/۷ و ۲۰/۸ درصد و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش بین ۱۰/۹ و ۱۲/۳ درصد در حال تغییر می‌باشد.



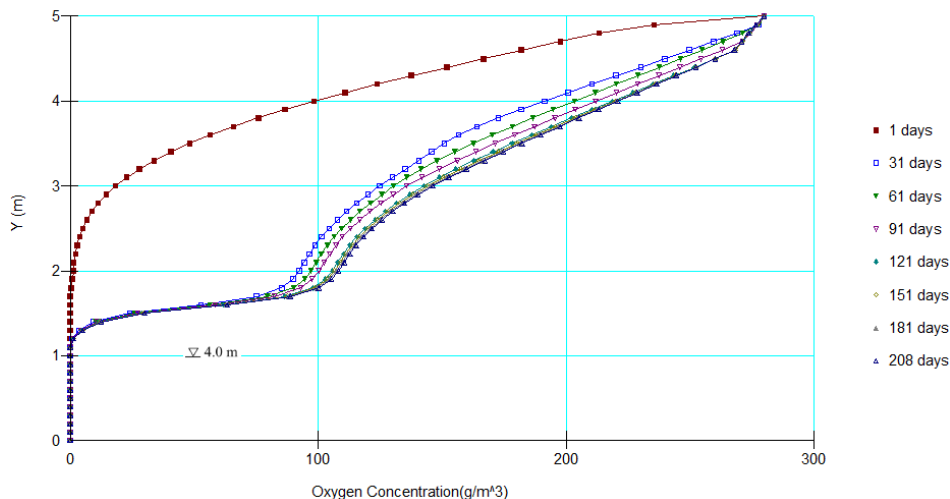
شکل ۸- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل FF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



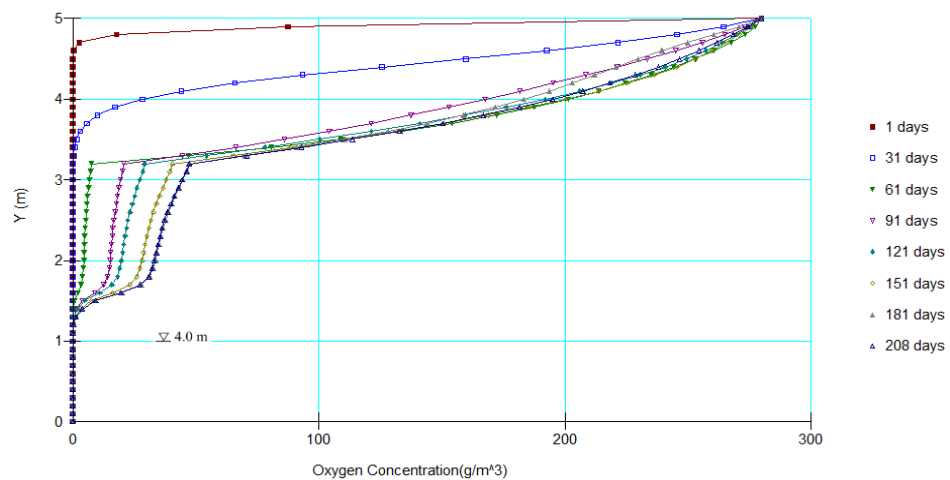
شکل ۹- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل FF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



شکل ۱۰- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل CC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



شکل ۱۱- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل CC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



شکل ۱۲- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل FC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش

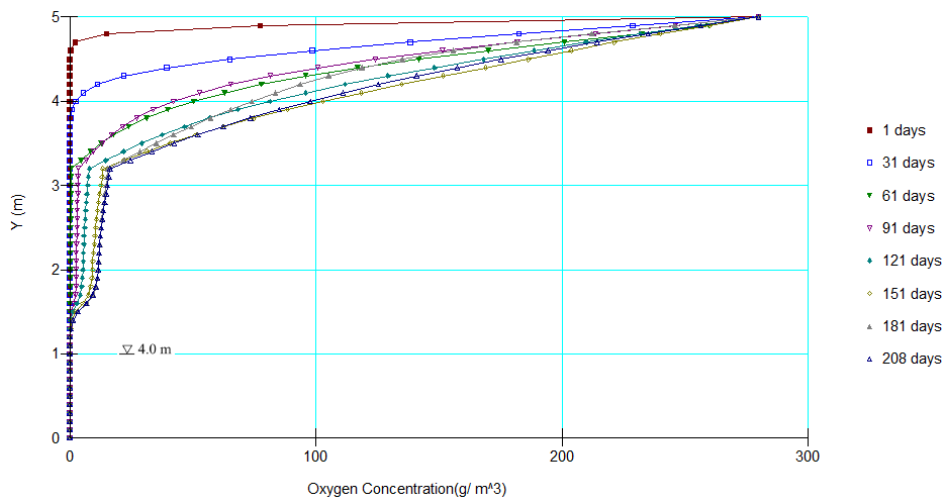
لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش ۲/۲ متر و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، ۲/۱ متر می‌باشد. به علت اشباع بودن باطله‌های ریزدانه و جنس مصالح ریزدانه، نفوذ اکسیژن به درون باطله‌های ریزدانه صورت نگرفته است.

۴-۳- نتایج مربوط به جریان اکسیژن محاسبه شده

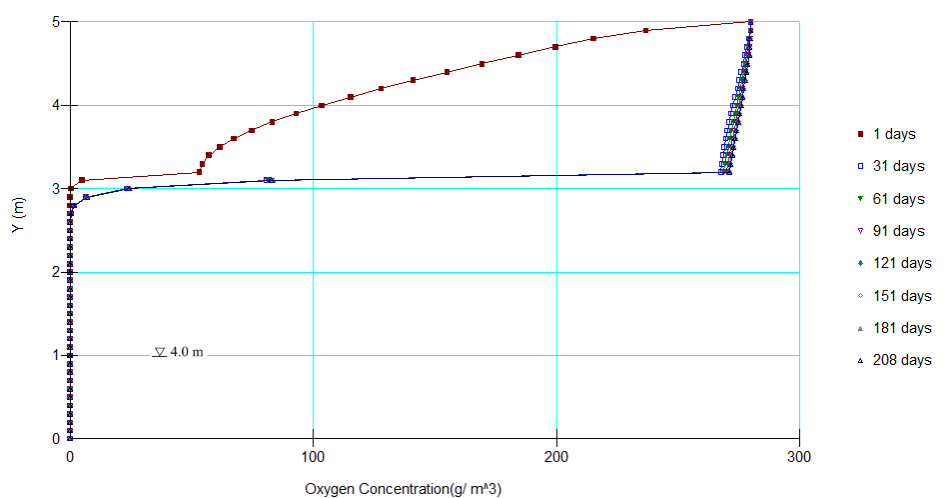
برای پیش‌بینی اکسیداسیون سولفید با استفاده از مدل‌سازی عددی، ضروری است جریان اکسیژن در پروفیل مواد باطله به دست آید. نرم‌افزار VADOSE/W قادر است جریان اکسیژن را به صورت جریان تجمعی گذرنده از یک سطح فرضی ($A=L \times B$) در طول یک دوره زمانی حساب کند که L طول و B عرض می‌باشد و معمولاً مقدار B ، واحد است. در قالب ۱۶ سناریو، برای هر پروفیل، جریان سطحی و جریان در سطح مشترک بین پوشش سولفور زوده و باطله‌های سولفیدی تعیین گردید که در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

عمق نفوذ اکسیژن در حالت بدون لحاظ مصرف اکسیژن در پوشش برابر ۳/۷ متر و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش برابر ۳/۶ متر می‌باشد. هم‌چنین غلظت اکسیژن در حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش در سطح مشترک پوشش و باطله‌ها بین صفر درصد و ۳/۵ درصد و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن بین صفر و ۱/۲ درصد در حال تغییر است.

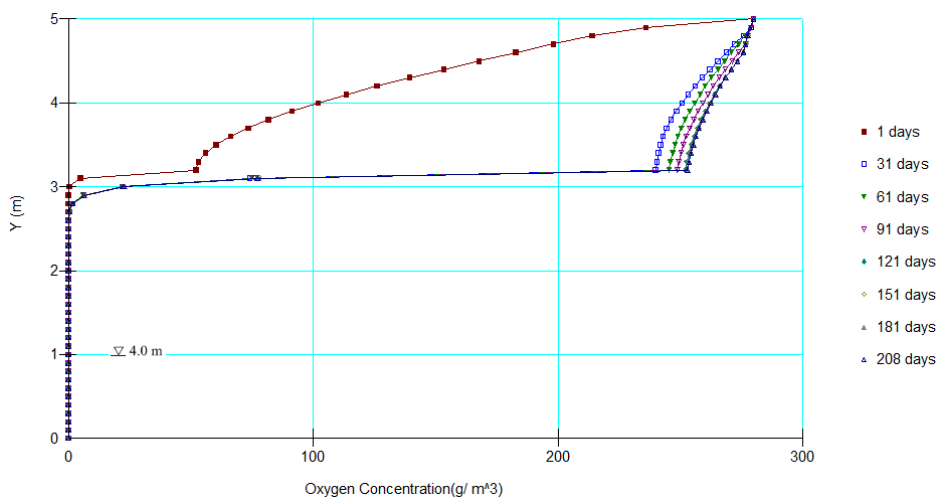
نتایج نمودارهای غلظت اکسیژن برای پروفیل CF با تراز آب ۴ متر در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. پروفیل‌های اکسیژن در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش و بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن برای تراز آب ۴ متر خیلی شبیه هستند. غلظت اکسیژن در ته باطله‌های درشت دانه (سطح باطله‌های ریزدانه) در حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش به مقدار حالت پایدار ۲۰ درصد رسیده و در حالت با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، به مقدار حالت پایدار ۱۹ درصد رسیده است. عمق نفوذ اکسیژن در حالت بدون



شکل ۱۳- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل FC، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



شکل ۱۴- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل CF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش



شکل ۱۵- نمودار غلظت اکسیژن برای پروفیل CF، تراز آب ۴ متر و پوشش گیاهی خوب با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش

دارد. سناریوهای ۱۱ و ۱۲ جریان اکسیژن را برای پروفیل FC با تراز آب ۴ متر نشان می‌دهد. در حالت مصرف اکسیژن نسبت به حالت بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش، جریانی که به سطح باطله‌ها وارد می‌شود، افزایش یافته و جریان سطح مشترک کاهش می‌یابد. سناریوهای ۱۳ تا ۱۶ نتایج جریان اکسیژن را برای پروفیل CF نشان می‌دهد.

برای تراز آب سطحی وقتی مصرف اکسیژن در پوشش در نظر گرفته می‌شود، جریان سطحی افزایش یافته و جریان سطح مشترک باطله‌ها کاهش می‌یابد. برای تراز آب عمیق، مصرف اکسیژن در پوشش جریان اکسیژن را در سطح افزایش داده و در سطح مشترک باطله‌ها کاهش می‌دهد و این اثر مثبت مصرف اکسیژن را بر کارایی پوشش درشت‌دانه نشان می‌دهد.

پروفیل CC کمترین کارایی را داشته و ماکزیمم جریان اکسیژن در این پروفیل اتفاق می‌افتد. در حالت تراز آب ۴ متر، حداقل جریان محاسبه شده به پروفیل FF و CF مربوط می‌باشد که توانایی باطله‌های ریزدانه برای ماندن در درجه اشباع بالا را نشان می‌دهد. در ضمن در اثر مصرف اکسیژن در پروفیل FC جریان خیلی پایینی محاسبه شده است. در مجموع، برای تمامی پروفیل‌ها به جز پروفیل CC، جریان اکسیژن از ۱۰ مول بر متر مربع بر سال کمتر می‌باشد که تأییدی بر کارایی همه سناریوها می‌باشد.

مقایسه جریان‌های اکسیژن محاسبه شده برای سناریوهای با لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش و بدون لحاظ کردن مصرف اکسیژن در پوشش نشان می‌دهد، وقتی مصرف اکسیژن در پوشش در نظر گرفته می‌شود، جریان سطحی اکسیژن بیشتر است. مصرف اکسیژن در پوشش سولفور زدوده وقتی که تراز آب ۱ متر می‌باشد، جریان اکسیژن را تقریباً به صفر کاهش می‌دهد. وقتی که تراز آب ۴ متر می‌باشد، جریان سطحی اکسیژن به علت کاهش درجه اشباع و افزایش محتوای هوا، بیشتر می‌باشد. وقتی که پروفیل شامل باطله‌های درشت‌دانه می‌باشد، جریان سطح مشترک قابل توجهی مشاهده می‌شود.

پروفیل همگن CC با تراز آب ۱ متر و بدون اکسیداسیون سولفید در پوشش، منجر به جریان‌های تقریباً صفر شده است و در اثر اکسیداسیون سولفید در پوشش، جریان ۳/۷۴ مول بر متر مربع بر سال در سطح باطله‌ها ایجاد شده است. در حالت تراز آب ۴ متر، جریان سطحی و جریان در سطح مشترک باطله‌ها، به علت کاهش درجه اشباع و افزایش پوکی برای دیفیوژن خیلی بالا هستند و بنابر این، کنترل تولید AMD در این سناریوها سخت می‌باشد (سناریوهای ۷ و ۸).

سناریوهای ۹ و ۱۰ جریان اکسیژن را برای پروفیل با اثر جبهه مویبگی (FC) با تراز آب ۱ متر نشان می‌دهد. در این سناریوها، درجات اشباع خیلی بالا بوده و جریان کوچکی در سطح و جریان بسیار کوچکی در سطح مشترک باطله‌ها وجود

جدول ۲- جریان‌های اکسیژن محاسبه شده در پروفیل مواد باطله برای سناریوهای مختلف

شماره سناریو	نام پروفیل	تراز آب	مصرف اکسیژن در پوشش	جریان سطحی (mol/m ² .year)	جریان سطح مشترک پوشش - باطله (mol/m ² .year)	E(%) = (1 - $\frac{F_C}{F_0}$) * 100% (کارایی سیستم پوشش)
۱	BC	۲/۲	بله	۱۰۴	-	-
۲	BF	۲/۲	بله	۱۱	-	-
۳	FF	۱	بله	۲	~	۱۰۰
۴	FF	۴	بله	۸	~	۱۰۰
۵	CC	۱	خیر	۰/۵	~	۱۰۰
۶	CC	۱	بله	۳/۷۴	~	۱۰۰
۷	CC	۴	خیر	۶۲/۴	۵۸/۲	۴۴
۸	CC	۴	بله	۸۰/۴	۵۴/۹۵	۴۷
۹	FC	۱	خیر	۰/۲	~	۱۰۰
۱۰	FC	۱	بله	۱/۷۶	~	۱۰۰
۱۱	FC	۴	خیر	۱۰/۲	۹/۴	۹۱
۱۲	FC	۴	بله	۵۲/۸	۲/۸	۹۷
۱۳	CF	۱	بله	۵/۷	~	۱۰۰
۱۴	CF	۱	خیر	۰/۶	~	۱۰۰
۱۵	CF	۴	بله	۳۴/۹	۴/۵	۵۹
۱۶	CF	۴	خیر	۹/۹	۴/۸۲	۵۶

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار VADOSE/W رفتار سیستم پوشش تک لایه در کنترل گاز اکسیژن ورودی از آن مورد ارزیابی قرار گرفت. ۱۶ سناریو برای مدل سازی تعریف گردیدند که شامل چهار پروفیل FF، CC، CF و FC می باشند. بعد از آنالیز مدل مورد نظر در نرم افزار، نتایج برای دو نمونه از کار دپچوک و همکاران ارائه گردید. مهم ترین نتایج به دست آمده در این تحقیق، به شرح زیر می باشد:

۱- پروفیل های درجه اشباع برای پیش بینی پتانسیل دیفیوژن اکسیژن به درون باطله ها می توانند به کار روند. در پروفیل همگن درشت دانه (پروفیل CC) و پروفیل باطله های درشت دانه روی باطله های ریزدانه (پروفیل CF)، بدون در نظر گرفتن تراز آب، عدم اشباع شدگی قابل توجهی در باطله های درشت دانه وجود دارد. باطله های ریزدانه روی درشت دانه (پروفیل FC) و باطله های همگن ریزدانه (پروفیل FF)، توانایی باطله های ریزدانه را برای حفظ کردن درجه اشباع بالا در بالای تراز آب نشان دادند. باطله های ریزدانه روی درشت دانه (پروفیل FC) با تراز آب ۴ متر، مقداری عدم اشباع شدگی نشان داده و گویای این است که در این سناریو، پتانسیل برای نفوذ اکسیژن از طریق پوشش وجود دارد. بر مبنای نتایج نمودارهای درجه اشباع، نتیجه گرفته می شود که برای همه سناریوها به جز سناریوی باطله های همگن ریزدانه (پروفیل FF) و باطله های ریزدانه روی درشت دانه (پروفیل FC) با تراز آب سطحی (۱ متر)، پتانسیل برای دیفیوژن اکسیژن به سطح باطله ها وجود دارد.

۲- با کاهش عمق تراز آب، درجات اشباع در پوشش افزایش یافته، موجب عملکرد مناسب پوشش شده و دیفیوژن اکسیژن محدود می شود.

۳- برای عمق آب داده شده، نفوذ اکسیژن شدیداً به اندازه دانه ها و AEV باطله ها بستگی دارد.

۴- پروفیل CC با تراز آب ۴ متر، بدترین سناریو بوده و به علت AEV پایین، به کمترین درجه اشباع منجر شده و حداکثر عمق نفوذ اکسیژن و جریان اکسیژن در این پروفیل اتفاق می افتد. بهتر است باطله های درشت دانه را با مصالح پوشش درشت دانه پوشش نداده و با پوششی از جنس مصالح ریزدانه می توان جریان ها را به مقدار قابل قبولی کاهش داد.

۵- مدل سازی مصرف و دیفیوژن اکسیژن، اثر مصرف اکسیژن را بر پروفیل های غلظت اکسیژن و جریان اکسیژن نشان می دهد. در نظر گرفتن مصرف اکسیژن باعث کاهش جریان اکسیژن ورودی به باطله های سولفیدی می شود و در برخی پروفیل ها آن را به صفر کاهش می دهد. همچنین مصرف اکسیژن باعث می شود عمق نفوذ اکسیژن کاهش یافته و غلظت سطح مشترک پوشش و باطله ها، در اثر مصرف اکسیژن در پوشش، کاهش یابد.

۶- حداکثر عمق نفوذ اکسیژن در پروفیل های CC و FC اتفاق می افتد که پتانسیل باطله های درشت دانه را برای نفوذ اکسیژن نشان می دهد. برای پروفیل های CF و FF که شامل باطله های ریزدانه واکنش پذیرند، نفوذ اکسیژن به درون باطله های ریزدانه خیلی کم می باشد.

۷- غلظت سطح مشترک پوشش و باطله ها در اثر مصرف اکسیژن در پوشش کاهش می یابد.

۸- در حالت تراز آب ۴ متر، حداقل جریان اکسیژن در پروفیل های CF و FF اتفاق می افتد که توانایی باطله های ریزدانه برای ماندن در درجه اشباع بالا را نشان می دهد. همچنین برای پروفیل FC و در حالت مصرف اکسیژن در پوشش، جریان ۲/۸ مول بر مترمربع بر سال محاسبه شده است که اثر مثبت مصرف اکسیژن در پوشش را نشان می دهد.

۹- نتایج مدل سازی نشان می دهد که عمق تراز آب، قوی ترین کنترل بر ورود اکسیژن می باشد که هیچ پروفیلی با تراز آب ۱ متر اجازه اکسیداسیون باطله ها را نداده و جریان های اکسیژن در حالت تراز آب ۱ متر، تقریباً برابر صفر می شوند. بنابر این، کنترل تراز آب باید اولویت اصلی برای طراحی پوشش تک لایه باشد. حفظ کردن تراز آب، این اطمینان را خواهد داد که اکسیداسیون در باطله های واکنش پذیر، قابل اغماض خواهد بود.

۱۰- به جز پروفیل CC، برای پقیه پروفیل ها جریان های محاسبه شده برای اکسیژن کمتر از ۱۰ مول بر متر مربع بر سال می باشند که تأییدی بر کارایی پوشش ها می باشد. پروفیل FF بهترین سناریوی ممکن بوده که جریان صفر اکسیژن برای آن محاسبه شده است.

۱۱- به عنوان یک نتیجه گیری کلی می توان بیان نمود که کل پوشش سولفور زدوده در معدن، در ۸۵ درصد درجه اشباع باقی نمانده و پوشش سولفور زدوده در معدن، نفوذ اکسیژن را به درون باطله های سولفیدی، به مقدار پایین در کل سد باطله کاهش نمی دهد.

۶- مراجع

- Aachib M, Mbonimpa M, Aubertin M, "Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media with applications to soil covers", *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, 156 (1), 163-193.
- Aubertin M, Aachib M, Authier K, "Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL", *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18, 215-233.
- Blowes DW, Jambor JL, "The pore water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings", *Waite Amulet, Quebec, Canada, Applied Geochemistry*, 1990, 5, 327-346.
- Collin M, "Mathematical modeling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of

- pyritic mine tailings", Licentiate Treatise, Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1987.
- Dagenais AM, Aubertin M, Bussiere B, "Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table", In Proceeding of the 63rd Canadian IPA Geotechnical Conference and 1st Joint CGS/CNC-Permafrost Specialty Conference, Calgary 12-16, Canadian Geotechnical Society, 1197-1204, September 2006.
- Demers I, Bussier B, Mbonimpa M, Benzaazoua M, "Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings cover", Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46, 454-469.
- Dobchuk B, "Evaluation of the effectiveness of a desulphurized tailings cover at Detour Lake Mine", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, 2002.
- Dobchuk B, Nichol C, Wilson GW, Aubertin M, "Evaluation of a single layer de-sulphurized tailings cover", Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50, 777-792.
- Dubrovsky NM, Morin KA, Cherry JA, Smyth D, subsurface contaminant migration in a sand aquifer", Water Pollution Research Journal of Canada, 1984, 19 (2), 55-89.
- Geo-SLOPE International Ltd., "Vadose zone modeling with VADOSE/W2007", Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- Mend, "Review of the use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings", Mine Environmental Drainage (MEND) Program, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, Report Mend 2.17.1, 1996.
- Nicholson RV, Gilham RW, Reardon EJ, "Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barrier", Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26, 1-8.
- O'Kane M, Wilson GW, Barbour SL, Swanson DA, "Aspects on the performance of the till cover 95 system at Equity Silver Mines", Ltd. In Sudbury, Conference on Mining and the Environment, Sudbury, Ontario, Canada, 1995.
- Quangrawa M, Aubertin M, Molson J, Zagury GJ, Bussier B, "An evaluation of the elevated water table concept using laboratory columns with sulphidic tailings", Proceedings of Geosask-2005, 58th Canadian geotechnical conference and 6th joint Iah-CNC, Saskatoon, Canada, 2005.
- Quangrawa M, Aubertin M, Molson J, Bussier B, Zagury J, "Preventing acid mine drainage with an elevated water table: long term column experiments and parameter analysis", Water, Air and Soil Pollution, 2009, 213, 437-458.
- Wheeland KG, Feasby G, "Innovative decommission technologies via Canada's Mend program", In Proceedings of 4th International conference on Hazardous Material Control/ Superfund 91, Washington, D.C., Hazardous Material Control Research Institute, 23-28, 3-5 December 1991.
- Yanful EK, "Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings", Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119, 1207-1228.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Single-Layer Cover System to Control Acid Mine Drainage in Tailings Dam

Kazem Badv^{*}, Mehrdad Arjmand

Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 21 January 2017; Accepted: 18 September 2017

Keywords:

Tailings dam, Acid mine drainage, Soil cover, Oxidation, Numerical modeling

1. Introduction

Acid mine drainage (AMD) produced by oxidation of sulphide minerals contained in mining wastes remains one of the critical environmental challenges for the mining industry (Wheeland and Feasby, 1991). The oxidation reaction can cause acidification and heavy metals release in surface and ground water (Dagenais et al., 2005). Use of cover system on mine waste is an effective method for prevention or reduction of acid mine drainage creation (Quangrawa et al., 2005). Use of single layer cover is a method in which the water level remains near the tailings surface (Demers et al, 2009). In this research, the behavior of single cover in controlling oxygen diffusion through cover system was evaluated.

2. Methodology

2.1. Modelling scenarios

In this study different scenarios were defined that include four different profiles: fine cover over fine tailings (FF), coarse cover over coarse tailings (CC), coarse cover over fine tailings (CF) and fine cover over coarse tailings (FC). These scenarios were defined to represent different real situations in the field. The water table was considered at two different depths of 1 m and 4 m. The thickness of the de-sulphurized cover was assigned a single value of 1.8 m. The material below 1.8 m depth was assigned as potentially acid-generating sulphidic tailings.

2.2. Finite Element Modeling

The finite element based software package VADOSE/W, was used for the numerical modeling and analysis. VADOSE/W simulations were performed for various combinations of model profiles and depth to water table. Each simulation was 208 days in duration which represents the duration of the summer season through which there is no snow and ground temperatures are above freezing. Numerical modeling results including saturation profiles, oxygen diffusion profiles and oxygen fluxes were evaluated to investigate cover performance.

3. Results and discussion

The purpose of this research was to evaluate the effectiveness of a tailings cover as a barrier to reduce oxygen diffusion into the sulphidic tailings. The cover is designed to function in two ways: first, by maintaining a high level of saturation to reduce the oxygen diffusion coefficient, and second, by creating oxygen sink where

* Corresponding Author

E-mail addresses: k.badv@urmia.ac.ir (Kazem Badv), mehrdadarjmand88@yahoo.com (Mehrdad Arjmand).

the small percentage of remaining oxidized sulphide minerals can consume any oxygen that may diffuse into the cover layer. Based on the numerical modeling results, it was possible to make conclusions regarding the effectiveness of the cover. The numerical modeling yielded three types of information: saturation profiles, oxygen concentration profiles, and oxygen fluxes.

The saturation profiles were sufficient to make predictions with respect to the potential for oxygen diffusion into the tailings. The homogeneous coarse tailings profile and the coarse over fine tailings profile both produced considerable desaturation in the coarse tailings regardless of the water table depth. Both of these profiles show potential for oxygen diffusion. The fine over coarse profile, illustrating the effect of a capillary break, remained fully saturated to the surface for the shallow water table. The 4 m water table scenario showed the fine tailings layer reaching 85 % saturation approximately 1 m from the surface, for most of the model year. The fine over fine tailings profile was the best scenario and remained at saturation greater than 85 %.

To predict the extent of sulphide mineral oxidation from the numerical modeling results, it was necessary to predict the oxygen flux at different locations throughout the tailings profile. According to Elberging and Nicholson (Elberging and Nicholson, 1996) the oxidation rates in mine tailings can be estimated by evaluating the Fickian flux of oxygen through the surface of the tailings and assuming that this is the rate at which oxygen is consumed by sulphide mineral oxidation throughout the entire profile. The oxygen diffusion and consumption modeling illustrated the effect of accounting for kinetic oxidation of the sulphide minerals on the resulting oxygen flux through the tailings. Accounting for kinetic oxidation was found to reduce the oxygen flux entering the sulphidic tailings. The depth of water table is the most important factor to control oxygen diffusion so that tailings oxygen flux in the 1 m water table was approximately zero. Except profile CC, for other profiles calculated fluxes are lower than $10 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{year}$ that indicate all covers work effectively. FF profile is the best scenario, because fluxes in this scenario are zero. Profiles CF and FF with 4 m water table have minimum oxygen flux that indicate ability of fine tailings to remain at high saturations. Also for profile FC with oxidation within the cover flux of $2.8 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{year}$ is calculated that indicates positive effect of oxygen consumption in cover. CC profile is the worst scenario that maximum flux occurs in this scenario and therefore it is recommended that the coarse tailings should not be covered by coarse material.

Oxygen concentration profiles show that maximum oxygen penetration depth occurs in profiles CC and FC that indicate potential of coarse tailings for oxygen diffusion. Oxygen consumption in cover causes reduction in depth of oxygen diffusion and concentration of cover and tailings interface. By adding the sand layer on top of FC profile, oxygen will not penetrate reactive tailings. For the given water table, oxygen penetration strongly depends on grain size and air entry value (AEV) of tailings.

4. Conclusions

In this study the efficiency of cover in controlling oxygen diffusion through cover system was evaluated. Results showed that with decreasing water table depth, saturations in cover increased and improved cover activity and oxygen diffusion restricted. Based on saturation diagrams, it was concluded that there is potential for oxygen diffusion into the tailings surface for all the scenarios except the homogeneous fine tailings and the fine over coarse tailings with a shallow water table. CC profile due to low AEV of coarse tailings, has the lowest saturation. For the given water table, oxygen diffusion strongly depends on grain size and AEV of tailings. The depth of water table is the most important factor to control the oxygen diffusion; so that tailings oxygen flux in the 1 m water table were approximately zero. Maximum oxygen penetration depth occurs in profiles CC and FC that indicate potential of coarse tailings for oxygen diffusion. For profiles CF and FF that include reactive fine tailings, oxygen penetration into fine tailings is very low. Profiles CF and FF with 4 m water table have minimum oxygen flux that indicate the ability of fine tailings to remain at high saturations. Also for profile FC with oxidation within the cover, flux of $2.8 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{year}$ is calculated that indicate positive effect of oxygen consumption in cover. Except profile CC for other profiles, calculated fluxes are lower than $10 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{year}$ that indicate all covers work effectively. FF profile is the best scenario, because fluxes in this scenario are zero. Oxygen consumption in cover causes reduction of oxygen flux and in some profiles oxygen flux reduces to zero and causes reduction in depth of oxygen penetration and concentration of cover and tailings interface. By adding the sand layer on top of FC profile, saturations in all thickness of fine grained cover layer were more than 90 % and this high saturation will restrict oxygen diffusion. Also oxygen will not penetrate reactive tailings. The general conclusion from this research is that the de-sulphurized tailings cover is likely not reducing oxygen penetration into the sulphidic tailings to low levels over the entire tailings surface.

5. References

Dagenais A M, Aubertin M, Bussier B, Martin V, "Large scale applications of covers with capillary barrier effects to control the production of acid mine drainage", Post-Mining 2005, Nancy, France, November 16-17, 2005.

- Demers I, Bussiere B, Mbonimpa, M., and Benzaazoua, M. "Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings cover", *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46, 454-469.
- Elberging B, Nicholson RV, "Field determination of sulphide oxidation rates in mine tailings", *Water Resources Research*, 1996, 32, 1773-1784.
- Quangrawa M, Aubertin M, Molson J, Bussiere B, Zagury J, "Preventing acid mine drainage with an elevated water table: long term column experiments and parameter analysis", *Water, Air and Soil Pollution*, 2009, 213, 437-458.
- Wheeland KG, Feasby G, "Innovtive decommission technologies via Canada's Mend program", In *Proceedings of 4th International conference on Hazardous Material Control/Superfound-91*, Washington, D.C., Hazardous Material Control Research Institute, 23-283, 5 December 1991.