اثر نمکهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر جذب باکتری *سودوموناس فلورسنس* در جریان غیراشباع

کامبیز رستمی[1] علی‌اکبر محبوبی[2] محمدرضا مصدقی[3] علی‌اکبر صفری سنجانی[3]

(دریافت ۸۵/۱۱/۱۲ پذیرش ۸۸/۲/۸)

چکیده

خاک بستر مناسبی برای رشد و انتقال ریزجانداران مختلف است. اخیراً انتقال ریزجانداران بیماری‌زا در خاک و تأثیر خاک بر میزان جذب و انتقال آنها به‌دلیل احتمال آلودگی آبهای سطحی و زیرزمینی و بیماری‌های ناشی از آنها، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. خاکهای مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران به خاطر داشتن مقادیر بالای کانی‌های کربناته و سولفاته به‌ویژه آهک و گچ می‌توانند در جذب و پالایش باکتری‌های مختلف نقش داشته باشند. در این پژوهش اثر مقادیر مختلف دو نمک کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر جذب و پالایش باکتری *سودوموناس فلورسنس* در ستون‌های شنی در شرایط رطوبتی غیراشباع بررسی شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد نمک کربنات کلسیم و سه سطح ۰، ۵ و ۱۰ درصد سولفات کلسیم در ترکیب با شن بودند. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و طرح آماری به‌کار رفته کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل بود. مخلوطهای مورد نظر به‌طور یکنواخت در ستون‌های پیرکس به‌طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۷ سانتی‌متر ریخته شد و شرایط ماندگار غیراشباع روی آنها اعمال گردید. سوسپانسیونی با غلظت 10^6 باکتری در سانتی مترمکعب روی ستون‌ها اعمال شد و تا حجم آب خروجی ۵ برابر حجم آب منفذی (PV) ستون‌ها آبشویی ادامه یافت. بلافاصله پس از اتمام آبشویی، میزان باکتری باقی‌مانده در لایه‌های ۵- ۰، ۱۰-۵، ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد اثر تیمارهای کربنات و سولفات کلسیم بر میزان پالایش باکتری درلایه‌های ۵-۰، ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متری ستون‌ها در سطح آماری ۱ درصد و در لایه ۲۰-۱۵ سانتی‌متری در سطح ۵ درصد، معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل تیمارهای کربنات کلسیم×سولفات کلسیم بر میزان پالایش فیزیکی سطح ۱ درصد، معنی‌دار بود. نیمرخ غلظت باکتری باقی‌مانده و ضریب پالایش، به خوبی کاهش میزان پالایش باکتری با عمق را نشان داد؛ به‌طوری که ضریب پالایش تیمارهای کربنات کلسیم و کربنات کلسیم×سولفات کلسیم در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. پالایش فیزیکی، اعوجاج منافذ و کاهش سرعت ظاهری آب منفذی در تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم را می‌توان از عوامل مهم در پالایش باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع در تمام لایه‌ها ذکر کرد. بنابراین می‌توان گفت وجود نمکهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم در خاک می‌تواند عامل مهمی در پالایش باکتری و در نتیجه کاهش آلودگی منابع آبی باشد.

واژه‌های کلیدی: *سودوموناس فلورسنس*، جذب، پالایش، شرایط جریان غیراشباع، حجم آب منفذی، آلودگی.

Pseudomonas Fluorescens Adsorption Affected by Calcium Carbonate and Calcium Sulfate under Unsaturated Flow Conditions

Kambiz Rostami[1] *Aliakbar Mahboubi*[2] *Mohammadreza Mosaddeghi*[3]
Aliakbar Safari Sinegani[3]

(Received Feb. 1, 2007 Accepted Apr.28, 2009)

Abstract

Soil is a suitable medium for the growth and transport of different microorganisms. Recently, an increasing interest has been shown in the transport and fate of microorganisms in porous media due to the concern for potential outbreaks of diseases caused by surface and groundwater contamination. Soils in arid and semi-arid regions as in Iran contain considerable amounts of sulfates and carbonates which may influence the adsorption and filtration of bacteria. This research was carried out to determine the adsorption and filtration of *Pseudomonas fluorescens* through sand columns mixed with different amounts of calcium carbonate and calcium sulfate under unsaturated flow conditions. Four levels of calcium carbonate: 0, 5, 10, and 20 %w/w and three levels of gypsum: 0, 5, and 10 %w/w were mixed with sand and the treatments were arranged in a (completely randomized) factorial design with three replicates. The prepared mixtures were poured homogenously into Pyrex

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (نویسنده مسئول) (۰۸۳۷) ۲۲۳۲۷۵۶ krostami_mh@yahoo.com
۲- استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۳- دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

1. M.sc. Graduate, Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, (Corresponding Author) (+ 98 837) 22372756 krostami_mh@yahoo.com
2. Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan
3. Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan

Archive of SID
www.SID.ir

pyrex cylinders with height of 20 cm and internal diameter of 7 cm. A constant concentration (10^6 CFU m^{-1}) of cylinders 20 cm high and 7 cm in internal diameter. A constant concentration (10^6 CFU m^{-1}) of bacteria suspensions was supplied at the upper boundary limit of the columns in a steady state flow and was followed for five pore volumes (PV). The bacteria concentration was measured at 0-5, 5-10, 10-15, and 15-20 cm sections of the columns immediately after leaching. The results showed that calcium sulfate and calcium carbonate were able to significantly influence the filtration of bacteria in all measured sections. The combination of carbonate sulfate and calcium carbonate treatments also significantly increased the physical filtration of bacteria along the columns. The retained bacterial profiles and the filtration coefficient obviously showed that the bacteria were held mostly in the upper layers of the columns. Enhanced physical filteration, tortuosity, and reduced apparent pore water velocity are known to be important in bacterial filtration under unsaturated conditions along the column layers. Therefore, these results imply that soils with calcium carbonate and calcium sulfate may play an important role in bacterial filtration and, thereby, in reducing the pollution of water resources.

Keywords: *Pseudomonas Fluorescens*, Adsorption, Filtration, Unsaturated Flow Conditions, Pore Volume, Pollution.

۱- مقدمه

انتقال باکتری‌ها به‌ویژه باکتری‌های بیماری‌زا از راه کاربرد نامناسب کودهای دامی و فاضلابهای شهری در زمین‌های کشاورزی، آلودگی محیط زیست، آبهای زیرزمینی و چاههای آب شرب را به‌همراه دارد [۱ و ۲]. ویژگی‌های مختلفی از خاک و باکتری بر انتقال و پالایش باکتری‌ها مؤثر می‌باشند. مقدار رطوبت، سرعت آب، توزیع اندازه ذرات، pH، رسانایی الکتریکی، هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم و میزان گچ خاک بر انتقال و پالایش باکتری‌ها نقش مؤثری دارند [۳، ۴ و ۵]. ویژگی‌هایی از باکتری مانند نوع، اندازه، آب‌گریزی و توانایی حرکت باکتری‌ها در سیال نیز بر حرکت آنها تأثیر گذار هستند.

در پژوهشهای انجام شده از میزان رطوبت به‌عنوان عامل مهمی در انتقال و پالایش باکتری‌ها نام برده شده است. دیوید و همکاران[1] در پژوهشی در مورد حرکت و پالایش باکتری *سودوموناس فلورسنس*[2] در ستون‌های شن (کوارتز) با رطوبتهای مختلف به این نتیجه رسیدند که در رطوبتهای زیاد، حرکت باکتری آسان‌تر انجام گرفته و میزان جذب و پالایش باکتری به‌ویژه در لایه‌های بالایی بیشتر می‌باشد [۶]. ولوم[3] و کاسل[4] نیز گزارش کردند که حدود ۹۰ درصد از باکتری‌های پالایش شده در لایه ۳ سانتی‌متری بالایی ستون‌های شن مورد آزمایش قرار دارد [۷]. بیتون و همکاران[5] گزارش کردند که باکتری *کلبسیلا آیروژنز*[6] در خاک شنی با رطوبت زیاد، آسان‌تر انتقال می‌یابد [۸].

سرعت جریان آب عامل مهمی در انتقال باکتری است به‌طوری که در خاکهای اشباع به‌دلیل وجود جریان‌های ترجیحی[7] توزیع سرعت جریان در منافذ، بسیار ناهمگن بوده و در نتیجه املاح و باکتری به‌سرعت و تا عمق بیشتری انتقال می‌یابند [۹].

ذرات خاک با توجه به سطح ویژه و نوع بار الکتریکی می‌توانند در جذب یا دفع باکتری مؤثر باشند. خاکهای درشت‌بافت نسبت به خاکهای ریزبافت (در صورت نبود جریان ترجیحی) به‌دلیل سطوح جذبی کمتر، در انتقال باکتری‌ها توانایی بیشتری دارند [۱۰ و ۱۱]. نوع و مقدار بار الکتریکی ذرات خاک تعیین کننده نوع و قدرت جذب گونه‌های مختلف در خاک است. بار الکتریکی خالص اکثر باکتری‌ها منفی است. از این رو در خاکهایی که بار وابسته به pH دارند، در pHهای پایین، جذب بیشتری از باکتری‌ها در خاک انتظار می‌رود. گلداشمیت و همکاران[8] با بررسی تأثیر pH بر حرکت باکتری‌ها در خاک به این نتیجه رسیدند که در pHهای خنثی تا اسیدی در مقایسه با شرایط قلیایی، جذب باکتری‌ها بر روی سطوح ذرات خاک بیشتر انجام می‌گیرد [۱۲]. pH خاک بر pH آب نفوذی در خاک تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه باکتری‌ها بیشتر در pH خنثی تا اسیدی زندگی می‌کنند، تأثیر pH بر جذب باکتری‌ها، به ویژگی‌های خاک نیز بستگی دارد [۱۳]. معمولاً سطوح با بار مثبت دارای توان جذب باکتری بیشتری نسبت به سطوح با بار منفی هستند [۱۱].

در پژوهشی که دیوید و همکاران در مورد تأثیر نمکهای موجود در آب بر حرکت باکتری *E.coli* انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که پساب ساختگی در مقایسه با آب دارای مقادیر مختلفی از نمکهای KCl و $CaCl_2$، اثر کمتری بر خروج باکتری دارد [۶]. این ترتیب می‌تواند به‌دلیل اثر کمتر پساب بر قدرت یونی و وجود اسید هومیک در آن باشد. کلرید کلسیم به موجب اثر زیادی که بر افزایش قدرت یونی می‌گذارد بیشترین اثر کاهشی را بر انتقال داشته و کلرید پتاسیم نقش بینابینی دارد.

بوچر و همکاران[9] گزارش کردند که وجود هیدروکسیدهای فلزی Fe و Al، در جذب باکتری نقش مهمی دارند به‌طوری که از

[1] David et al.
[2] *Pseudomonas Fluorescens*
[3] Wollum
[4] Cassel
[5] Bitton et al.
[6] *Klebsiella aerogenes*
[7] Preferential flows

[8] Goldschmitt
[9] Buchter et al.

Archive of SID
www.SID.ir

انتقال سریع آنها در محیط‌های متخلخل می‌کاهند [۱۴]. رستمی و همکاران در سال ۲۰۰۵ گزارش کردند که گچ صنعتی عامل مهمی در پالایش باکتری محسوب می‌گردد به‌طوری که با افزایش مقدار آن در شن ساحلی، میزان انتقال باکتری کاهش و میزان جذب و پالایش در آن بیشتر می‌شود.

یکی از فاکتورهای مهم در انتقال باکتری‌ها، اندازه و چگالی آنها می‌باشد [۱۵]. کاهش اندازه باکتری‌ها سبب کاهش پالایش فیزیکی و افزایش انتقال آنها می‌شود. به این دلیل باکتری‌های با قطر کوچک در طول کانال‌های موجود در مسیر انتقال در محیط‌های متخلخل، بهتر می‌توانند منتقل شوند [۱۶].

انتقال باکتری‌هایی که آب‌گریزند ممکن است به سبب اتصال آنها به سطوح موجود در محیط متخلخل کم شده و یا به تأخیر بیافتد. به‌عبارت دیگر، آب‌گریزی سطحی باکتری‌ها بر انتقال آنها تاثیر می‌گذارد. یعنی باکتری‌های آب‌گریز[1] بیشتر از باکتری‌های آب‌دوست[2] به سطح ذرات خاک می‌چسبند. بار سطحی سلول نیز در این میان بر انتقال باکتری مؤثر است [۱۷].

باکتری‌های دارای تحرک بیشتر نسبت به باکتری‌های با تحرک کمتر و یا فاقد حرکت، در خاک آسان‌تر منتقل می‌شوند. رینولدز و همکاران[3] نشان دادند که گونه‌هایی از *اشرشیاکولی* که دارای تحرک می‌باشند نسبت به گونه‌های غیرمتحرک در شرایط اشباع و سکون آب، انتقال سریع‌تری دارند [۱۶]. در شرایط رطوبتی اشباع، بسته به نوع باکتری، ممکن است تحرک‌پذیری باکتری در انتقال نقش داشته باشد [۲].

با توجه به اهمیت بررسی اثر نمکهای مختلف بر انتقال و پالایش باکتری‌ها در محیط‌های متخلخل و کمبود پژوهش‌های مرتبط، این پژوهش به بررسی اثر مقادیر مختلف دو نمک مهم در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران یعنی کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر میزان پالایش و جذب باکتری *سودوموناس فلورسنس* در شرایط رطوبتی غیراشباع پرداخت.

۲- مواد و روشها

۲-۱- تیمارهای مورد استفاده

این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی بر روی ستون‌های شنی انجام گرفت. شن مورد استفاده در این پژوهش از نوع شن ساحلی بود. مقدار کربنات کلسیم موجود در شن مورد استفاده پس از چندین بار شست و شو با آب شهر و آب مقطر ۷/۵ درصد (با روش تیتراسیون) ولی این شن فاقد ماده آلی بود. در ترکیب شن مورد استفاده شکلهای مختلف اکسیدهای آهن و آلومینیوم وجود داشت (جدول ۱). تیمارهای آزمایشی شامل درصدهای وزنی مختلف کربنات کلسیم تولید شرکت مرک[4] (صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد) و سولفات کلسیم مرک (صفر، ۵ و ۱۰ درصد) بود که با شن مخلوط گردید. اندازه ذرات شن، کربنات کلسیم و سولفات کلسیم در دامنه ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر انتخاب شد. به این منظور ابتدا به کربنات کلسیم و سولفات کلسیم پودری، آب اضافه شد و پس از خشک و جامد شدن، آسیاب و اندازه ذرات در دامنه ذکر شده با الک جدا گردید.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مخلوط‌های آزمایشی در جدول ۲ آورده شده است. در تیمارهای آزمایشی، چگالی حقیقی به‌روش پیکنومتر و چگالی ظاهری با در نظر گرفتن جرم خشک و حجم مخلوط‌ها در سیلندرها محاسبه شد. تخلخل کل نیز با داشتن مقادیر چگالی حقیقی و چگالی ظاهری محاسبه گردید. pH مخلوط‌ها با استفاده از دستگاه pH متر دیجیتالی مدل متروم[5]، رسانایی الکتریکی آنها با رسانایی‌سنج نوع دیجیتالی مدل متروم در نسبت‌های ۵:۱ مخلوط به آب و ضریب آبگذری اشباع[6] (K_s) آنها به روش آزمایشگاهی بار ثابت[7] تعیین گردید [۱۸].

جدول ۱- مقدار شکلهای اکسیدهای آهن و آلومینیوم موجود در شن مورد استفاده

شکل	مقدار ($g\ kg^{-1}$)
آهن بی‌شکل	۲/۱
آهن بلوری	۸/۳۴
آلومینیوم بی‌شکل	۰/۳۲
آلومینیوم بلوری	۱/۱

۲-۲- باکتری مورد استفاده در آزمایش‌های آبشویی

باکتری مورد استفاده در این پژوهش، سوش *سودوموناس فلورسنس* بود. این باکتری از جمله باکتری‌های گرم منفی با دو تاژک قطبی و قدرت تحرک زیاد می‌باشد که در خاک و بسیاری از محیط‌های دیگر قادر به رشد است. این باکتری از جنبه کشاورزی، آلودگی و تجزیه آلاینده‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. انتقال سوش‌های بیماری‌زای باکتری *سودوموناس* از نیمرخ خاک و ورود آن به آبهای زیرزمینی از جنبه آلودگی محیط زیست دارای اهمیت است. همچنین سوش‌های دیگر این باکتری در کشاورزی و رفع

[1] Hydrophobic Bacteria
[2] Hydrophilic Bacteria
[3] Reynolds et al.
[4] Merck
[5] Metrohm
[6] Saturated Hydraulic Conductivity
[7] Constant-head Method

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مخلوط‌های مورد استفاده

درصد وزنی در مخلوط		pH	رسانایی الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	چگالی حقیقی ($Mg\ m^{-3}$)	چگالی ظاهری ($Mg\ m^{-3}$)	ضریب آبگذری اشباع ($cm\ h^{-1}$)	تخلخل کل (%)
$CaCO_3$	$CaSO_4$						
۰	۰	۷/۱	۰/۰۶	۲/۶۷	۱/۴۸	۹۷/۲	۴۴/۵
۰	۵	۷/۰	۲/۷۷	۲/۷۰	۱/۴۳	۵۸/۰	۴۷/۰
۰	۱۰	۷/۲	۲/۹۶	۲/۶۹	۱/۳۸	۵۳/۴	۴۸/۷
۵	۰	۷/۸	۰/۱۲	۲/۶۰	۱/۳۷	۳۶/۳	۴۷/۳
۵	۵	۷/۱	۲/۱۹	۲/۵۹	۱/۳۳	۲۴/۵	۴۸/۶
۵	۱۰	۷/۳	۲/۲۸	۲/۶۰	۱/۳۳	۱۶/۵	۴۸/۸
۱۰	۰	۷/۶	۰/۱۱	۲/۴۳	۱/۳۱	۴۵/۴	۴۶/۱
۱۰	۵	۷/۲	۲/۱۹	۲/۶۴	۱/۳۳	۱۲/۲	۴۹/۶
۱۰	۱۰	۷/۲	۲/۳۹	۲/۵۸	۱/۲۲	۱۱/۳	۵۲/۷
۲۰	۰	۸/۱	۰/۲۲	۲/۴۲	۱/۱۹	۴۰/۷	۵۱
۲۰	۵	۷/۰	۲/۲۵	۲/۵۸	۱/۲۰	۱۱/۱	۵۳/۵
۲۰	۱۰	۷/۲	۲/۵۸	۲/۵۷	۱/۱۲	۹/۳	۵۶/۴
$CaSO_4$ خالص		۶/۸	۳/۴۷	—	—	—	—
$CaCO_3$ خالص		۸/۲	۰/۲۷	—	—	—	—

آلودگی‌های لایه‌های زیرین خاک، اهمیت دارند. این باکتری توانایی زیادی در تولید کلات‌های آلی دارد که این کلات‌ها در فراهم‌سازی برخی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه مانند آهن، نقش مهمی ایفا می‌کنند. این باکتری همچنین قادر است به خاطر توان تجزیه بالا، آلاینده‌های آلی را تجزیه نموده و در حل نمودن فسفر معدنی و تجزیه لیگنین نیز مؤثر باشد. این باکتری در محیط‌های کشت King B و S1 خالص‌سازی گردید. در محیط کشت S1 مدت ۷ تا ۱۰ روز طول کشید تا باکتری رشد کند. برای استفاده از باکتری به‌صورت سوسپانسیون، باکتری به‌درون محیط مایع NB[1] با قدرت نگهداری باکتری منتقل شد. غلظت مورد استفاده در تمام سوسپانسیون‌های مصرفی 10^6 باکتری[2] در سانتی‌متر مکعب ($CFU\ cm^{-3}$) بود که از محیط مایع NB ساخته شد. غلظت ورودی[3] (C_0) برای تمامی تیمارهای آزمایشی یکسان و در طول آزمایش‌های آبشویی ثابت (تزریق پله‌ای[4]) در نظر گرفته شد. برای تمام آزمایش‌های آبشویی علاوه بر کشت، از لام هموسیتومتر[5] و میکروسکوپ نوری نیز برای تعیین C_0 استفاده‌گردید.

۲-۳- استقرار ستون‌ها و برقراری شرایط جریان غیراشباع ماندگار

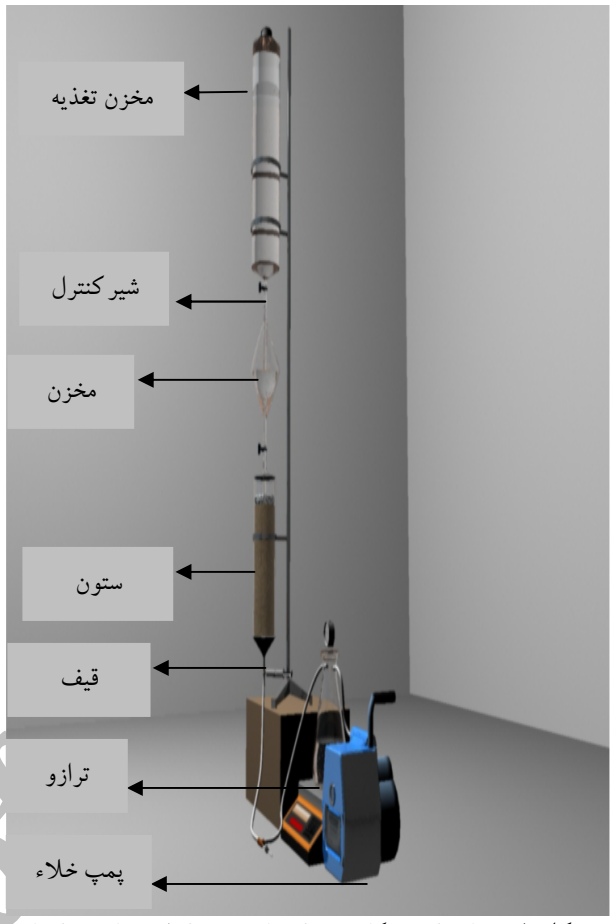
در این پژوهش ستون‌های مورد استفاده، از جنس پیرکس با قطر داخلی ۷ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و سطح مقطع ۳۸/۴۶ سانتی‌متر مربع بود. ستون‌ها تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از مخلوط‌های مورد نظر پر گردیدند. در بالای هر ستون یک مخزن اصلی به‌عنوان مخزن تغذیه‌کننده ستون‌ها و یک مخزن ثانوی به‌عنوان مخزن کمکی برای برقراری جریان غیراشباع ماندگار استفاده شد. حجم سوسپانسیون ورودی در واحد زمان روی ستون‌ها برابر $178/86\ cm\ h^{-1}$ بود. همچنین یک پمپ مکنده در زیر هر ستون برای ایجاد شرایط غیراشباع ماندگار و جلوگیری از اشباع شدن انتهای ستون‌ها نصب گردید (شکل ۱). مکشهای مختلفی از ۴/۲ تا ۹/۱ کیلوپاسکال در تیمارهای مختلف اعمال شد. تمام وسایل مورد استفاده (مخزن اولیه، مخزن ثانویه و ستون‌های آبشویی) پیش از استفاده در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ اتمسفر به‌مدت ۱۵ دقیقه سترون شدند. شدت جریان $4/65\ cm\ h^{-1}$ برابر با نصف کمترین K_s اندازه‌گیری شده بود (تیمار ۲۰درصد کربنات کلسیم در ترکیب با ۱۰درصد سولفات کلسیم) روی تمامی ستون‌های آبشویی اعمال گردید.

۲-۴- آزمایش‌های آبشویی

همان‌گونه که گفته شد پس از استقرار ستون‌های آبشویی و برقراری شرایط جریان غیراشباع ماندگار، تزریق باکتری به‌صورت پله‌ای انجام گرفت. ستون‌های مورد آزمایش از راه مخزن اصلی دارای سوسپانسیون باکتری، از بالا تغذیه گردیدند. سوسپانسون باکتری با همان شدت جریان یکسان ($4/65\ cm\ h^{-1}$) از راه مخزن

[1] Nutrient Broth
[2] Colony Forming Units (CFU)
[3] Influent Concentration
[4] Step Injection
[5] Hemocytometer

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- شمایی از دستگاه مورد استفاده در شرایط جریان غیراشباع ماندگار

اصلی[1] روی تمامی ستون‌ها اعمال شد. در طول آزمایش شرایط مرزی[2] نوع اول برقرار گردید. در این شرایط، سوسپانسیون از مخزنی که به‌خوبی مخلوط شده و دارای غلظت ثابتی است به صورت پیوسته به سطح ستون خاک می‌رسد و سیستم هیچ اثری روی مخزن و غلظت ورودی ندارد. هر چند در واقع به‌علت وجود پخشیدگی و انتشار در سیستم (ناشی از متفاوت بودن غلظت در مرز ورودی با دیگر نقاط سیستم) یک لایه مرزی به‌وجود می‌آید. شرایط مرز خروجی اعمال شده به سیستم از نوع شرایط مرزی محدود[3] بود. این شرایط معمولاً برای سیستم‌هایی که طول مسیر انتقال، محدود و مشخص دارند (مانند ستون‌های آزمایشگاهی) به کار می‌رود.

شرایط اولیه[4] سیستم برای انتقال باکتری طوری ایجاد شد که غلظت باکتری در طول ستون‌های آزمایشی ثابت و برابر صفر بود.

برای ایجاد این شرایط همان‌گونه که گفته شد تمام وسایل مورد استفاده پیش از شروع آزمایش‌های آبشویی در درون اتوکلاو قرار داده و سترون شدند. سپس به مقدار ۵ برابر حجم آب منفذی[5] ستون‌ها، سوسپانسیون باکتری برای آبشویی مصرف شد. بلافاصله پس از اتمام آبشویی، ستون‌های آزمایشی به‌طور افقی گذاشته شده و در شرایط سترون به چهار قسمت مساوی ۵-۰، ۱۰-۵، ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری تقسیم شدند. سپس از هر قسمت در شرایط کاملاً سترون پس از مخلوط کردن کل آن لایه، نمونه یک گرمی برداشته و در لوله آزمایش دارای ۹ میلی‌لیتر هگزامتا فسفات سدیم سترون شده، ریخته شد. پس از آن، این مجموعه به‌مدت ۳۰ دقیقه تکان داده و سپس لرزانده شد و به این وسیله باکتری‌های پالایش شده، استخراج شدند. در نهایت از سوسپانسیون به‌دست آمده، رقت مناسب ساخته شد و در محیط کشت NA[6] کشت و با روش شمارش کلونی[7] شمارش گردید. سپس غلظت یا مقدار باکتری باقی‌مانده[8] (C_r) در ستون‌ها، اندازه‌گیری و محاسبه شد. همچنین در پایان هر آزمایش، غلظت باکتری‌های خروجی نیز اندازه‌گیری و با غلظت اولیه (10^6 باکتری در سانتی متر مکعب) مقایسه گردید.

۲-۵- تجزیه و تحلیل داده‌ها

طرح آزمایشی مورد استفاده، فاکتوریل با دو فاکتور مقدار کربنات کلسیم و سولفات کلسیم در مخلوط با شن و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. با استفاده از نرم افزار SAS، داده‌های برداشت شده تجزیه و تحلیل شد. متغیرهای وابسته مورد بررسی غلظت باکتری باقی‌مانده نسبی (C_r/C_0) در لایه‌های ۵-۰، ۱۰-۵، ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری ستون‌ها، ضریب پالایش[9] (λ_f) و حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده (Z_{max}) باکتری بود.

ضریب پالایش (λ_f) باکتری به‌عنوان یک پارامتر کمّی در سنجش میزان پالایش باکتری در مسیر انتقال به‌گونه زیر محاسبه گردید

$$\lambda_f = \ln\left(\frac{C_{av}}{C_0}\right) \times \frac{1}{X} \qquad (1)$$

که در آن:

C_{av} غلظت متوسط باکتری در زهاب خروجی در طول آزمایش، C_0 غلظت ورودی باکتری و X طول ستون آزمایشی می‌باشند. حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده (Z_{max}) باکتری نیز پارامتر کمی است که نشان می‌دهد باکتری‌ها در محیط‌های متخلخل تا چه عمقی قادرند انتقال یابند که به‌صورت زیر محاسبه شد:

[1] Decanter
[2] Boundary Conditions
[3] Finite System
[4] Initial Conditions

[5] Pore Volume (PV)
[6] Nutrient Agar
[7] Colony Count
[8] Residual Concentration
[9] Filtration Coefficient

Archive of SID
www.SID.ir

$$Z_{max} = \ln C_0 \times \frac{1}{\lambda_f} \quad (۲)$$

مقایسه میانگین‌ها به روش حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) انجام گرفت. نیمرخ پالایش باکتری به‌صورت C_r در برابر عمق ستون‌های آبشویی، و λ_f و Z_{max} در برابر تیمارهای آزمایشی با استفاده از نرم افزار Excel ترسیم شد.

۳- نتایج و بحث

اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم و اثر متقابل آنها بر مقدار باکتری پالایش شده در لایه های ۵-۰، ۱۰-۵، ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری ستون‌های شنی در شرایط رطوبتی غیراشباع در جدول ۳ آورده شده است. اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر میزان پالایش باکتری در لایه‌های ۵-۰، ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متری ستون‌ها در سطح آماری ۱ درصد و در لایه ۲۰-۱۵ سانتی‌متری در سطح آماری ۵ درصد، معنی‌دار شد. اثر متقابل تیمارهای کربنات کلسیم×سولفات کلسیم بر پالایش باکتری در تمام لایه‌ها در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار شد. همچنین نتایج، بیان‌کننده تغییر میزان پالایش باکتری با عمق در ستون‌های آبشویی بود. در شرایط رطوبتی غیراشباع، عوامل فیزیکی بیشتر از عوامل شیمیایی در پالایش و انتقال باکتری مؤثرند. علاوه بر پالایش فیزیکی[1]، اعوجاج منافذ[2] و سرعت ظاهری آب منفذی[3] بر میزان پالایش باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع مؤثرند. همچنین با مقایسه غلظت باکتری‌های خروجی و ورودی برای هر تیمار، مشخص گردید که تیمارها به‌میزان قابل توجهی سبب کاهش غلظت باکتری‌ها در زهاب خروجی شده‌اند.

در پژوهشی که دیوید و همکاران در مورد جذب باکتری *سودوموناس فلورسنس* سوش P_{17} در ستون‌های شن (کوارتز) انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که میزان جذب باکتری با رطوبت خاک رابطه عکس دارد [۶]. در ستون‌هایی که دارای درجه اشباع ۸۴ درصد و ۱۰۰درصد بودند، به‌جز در لایه ۲ سانتی‌متری سطح بالایی ستون‌ها، میزان جذب باکتری در بقیه طول ستون‌ها با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشت. در شرایط رطوبتی ۴۶ درصد اشباع در مقایسه با ۸۴ درصد و ۱۰۰درصد اشباع، میزان جذب باکتری در طول ستون‌ها در سطح آماری ۵ درصد به‌گونه معنی‌داری بیشتر بود. در کل میزان جذب باکتری با افزایش عمق کاهش یافته بود.

۳-۱- اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر پالایش باکتری در لایه‌های ۵-۰ و ۱۰-۵ سانتی‌متری

اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم و اثر متقابل آنها بر مقدار باکتری *سودوموناس فلورسنس* پالایش شده در لایه ۵-۰ سانتی‌متری ستون‌های آزمایشی در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین غلظت باکتری پالایش شده در بین تیمارهای شاهد (بدون افزودن کربنات کلسیم)، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد کربنات کلسیم (میانگین همه تیمارهای سولفات کلسیم) و در لایه ۵-۰ سانتی‌متری، مربوط به تیمار ۲۰درصد کربنات کلسیم بود (جدول ۴). پالایش فیزیکی باکتری در لایه‌های بالایی به‌دلیل گیر افتادن بیشتر باکتری‌ها، نسبت به لایه‌های پایین‌تر بیشتر بوده است. این در حالی است که پالایش شیمیایی به دلیل سطوح جذبی تقریباً در کل ستون یکسان می‌باشد. نتایج پژوهشهای دیوید و همکاران در سال ۲۰۰۱ در مورد باکتری *سودوموناس* در ستون‌های شن نیز گویای این مطلب است. در لایه مذکور، تیمار ۵ درصد سولفات کلسیم بر میزان پالایش باکتری نسبت به تیمار شاهد و ۱۰درصد سولفات کلسیم اثر گذارتر بود. به دلیل حل نشدن تمامی کانی سولفات کلسیم و نیز محدود بودن سطح انتقال باکتری، تیمار سولفات کلسیم توانست بر میزان پالایش باکتری مؤثر باشد.

اثر متقابل تیمارها (کربنات کلسیم×سولفات کلسیم) بر میانگین مقدار باکتری پالایش شده در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار بود.

[1] Physical Filtering
[2] Pore Tortuosity
[3] Pore Water Velocity

جدول۳-تحلیل واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت باکتری باقی‌مانده نسبی (C_r/C_0) در لایه‌های مختلف ستون‌های شن

منبع تغییر	درجه آزادی	نسبت F			
		۰-۵ سانتی‌متری	۵-۱۰ سانتی‌متری	۱۰-۱۵ سانتی‌متری	۱۵-۲۰ سانتی‌متری
سولفات کلسیم	۲	۱۵/۵۳**	۷/۰۶**	۴۱/۴۸**	۳/۶۹*
کربنات کلسیم	۳	۱۹/۰۲**	۲۶/۸۱**	۴۴/۸۲**	۳/۷۷*
سولفات کلسیم×کربنات کلسیم	۱۱	۱۳/۲۲**	۱۶/۶۱**	۲۳/۶۹**	۳/۴۹**

** و * به ترتیب نشان دهندهٔ تأثیر معنی‌دار در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارهای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم بر غلظت باکتری باقی‌مانده نسبی (C_t/C_0) در لایه‌های ۵-۰ و ۱۰-۵ سانتی‌متری

منبع تغییر	سولفات کلسیم			
کربنات کلسیم	۰	٪۵	٪۱۰	میانگین
۵-۰ cm				
۰	۰/۲۸	۱/۷۸	۰/۴۷	۰/۸۴
٪۵	۰/۴۱	۱/۷۹	۰/۸۳	۱/۰۱
٪۱۰	۰/۴۷	۲/۸۸	۰/۵۷	۱/۳۱
٪۲۰	۱/۵۷	۲/۲	۵/۱۲	۲/۹۶
میانگین	۰/۶۹	۲/۱۶	۱/۷۵	
	سولفات کلسیم	کربنات کلسیم	سولفات کلسیم ×کربنات کلسیم	
LSD (۰/۰۵)	۰/۵۶	۰/۶۵	۱/۱۳	
۱۰-۵ cm				
۰	۰/۰۰۳۲	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۱۸
٪۵	۰/۳۴	۰/۲	۰/۳	۰/۲۸
٪۱۰	۰/۰۸۲	۰/۲۳	۰/۰۲۲	۰/۱۱
٪۲۰	۰/۰۳۱	۰/۰۶۵	۰/۱	۰/۰۶۵
میانگین	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۲	
	سولفات کلسیم	کربنات کلسیم	سولفات کلسیم ×کربنات کلسیم	
LSD (۰/۰۵)	۰/۰۴۵	۰/۰۵۲	۰/۰۹۱	

میزان باکتری پالایش شده در تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم در ترکیب با ۲۰درصد کربنات کلسیم، نسبت به سایر تیمارهای ترکیبی بیشتر و در تیمار شاهد از همه کمتر بود. تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم در ترکیب با ۲۰درصد کربنات کلسیم دارای کمترین سرعت ظاهری آب منفذی بود و انتظار پالایش بیشتر باکتری در این تیمار نیز می‌رفت. به‌طور کلی حذف بیشتر باکتری در لایه ۵-۰ سانتی‌متری تحت شرایط غیراشباع را می‌توان به‌دلیل پالایش فیزیکی بیشتر باکتری دانست.

اثر تیمارهای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم و اثر متقابل آنها بر مقدار باکتری پالایش شده در لایه ۱۰-۵ سانتی‌متری ستون‌های شنی در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار شد (جدول ۲). میزان باکتری پالایش شده در این لایه کمتر از لایه ۵-۰ سانتی‌متری بود. در پژوهش انجام شده توسط پاولسون و همکاران[1] نیز نفوذ باکتریوفاژ MS-2 در یک خاک شنی خیلی ریز با افزایش عمق کاهش یافته است [۱۹].

در لایه ۱۰-۵ سانتی‌متری، غلظت باکتری پالایش شده، در تیمار ۵ درصد کربنات کلسیم نسبت به تیمارهای شاهد (بدون افزودن کربنات کلسیم)، ۱۰ و ۲۰درصد کربنات کلسیم (میانگین تیمارهای سولفات کلسیم) بیشترین و در تیمار شن با ۱۰درصد کربنات کلسیم، کمترین بود (جدول ۴). به‌طور کلی میزان باکتری حذف شده در این لایه نسبت به لایه ۵-۰ سانتی‌متری کمتر بود که می‌تواند به غالب بودن فرایند پالایش فیزیکی نسبت به پالایش شیمیایی در پالایش باکتری در ستون‌های آزمایشی مربوط باشد.

در لایه ۱۰-۵ سانتی‌متری، غلظت باکتری پالایش شده در تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم نسبت به تیمارهای شاهد (صفر درصد) و سولفات کلسیم بیشتر بود. همچنین اثر متقابل تیمارها (کربنات کلسیم×سولفات کلسیم) بر میانگین مقدار باکتری پالایش شده در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار بود. تمام تیمارهای ترکیبی نسبت به تیمار شاهد، پالایش باکتری بیشتری داشتند که اغلب این تفاوتها در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار بودند.

۳-۲- اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم بر پالایش باکتری در لایه‌های ۱۵- ۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری

در لایه ۱۵-۱۰ سانتی‌متری ستون‌های شن، اثر تیمارهای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم و اثر متقابل آنها بر غلظت باکتری پالایش شده در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار بود (جدول ۳). مقدار

[1] Powelson et al.

Archive of SID
www.SID.ir

باکتری پالایش شده در تیمار ۵ درصد کربنات کلسیم بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول ۵). در لایه مذکور میزان پالایش باکتری نسبت به لایه ۱۰-۵ سانتی‌متری کمتر بود. بیشترین و کمترین میزان باکتری حذف شده به ترتیب به تیمارهای ۵ و ۱۰درصد کربنات کلسیم مربوط می‌شد.

غلظت باکتری پالایش شده در تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم بیشتر از تیمار شاهد و ۵ درصد سولفات کلسیم بود. در لایه ۱۵-۱۰ سانتی‌متری، حذف باکتری با افزایش میزان سولفات کلسیم بیشتر شد.

اثر متقابل تیمارها (سولفات کلسیم×کربنات کلسیم) بر C_r در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شد. پالایش باکتری در تیمار ۵ درصد سولفات کلسیم در ترکیب با ۵ درصد کربنات کلسیم نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر بود. میزان باکتری حذف شده در تیمار شاهد نسبت به تیمارهای دیگر کمتر بود.

در لایه ۲۰-۱۵ سانتی‌متری، اثر تیمار سولفات کلسیم و کربنات کلسیم بر مقدار باکتری پالایش شده در سطح آماری ۵ درصد و اثر متقابل تیمارها در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در این لایه از ستون‌ها، میزان حذف باکتری در تیمار ۵ درصد کربنات کلسیم از تیمارهای دیگر بیشتر و به‌ترتیب در تیمارهای ۲۰درصد کربنات کلسیم، شاهد و ۱۰درصد کربنات کلسیم، حذف باکتری کاهش یافت. در این لایه میزان باکتری‌های حذف شده نسبت به لایه‌های بالاتر، کمتر بود که نشان از سیر نزولی انتقال باکتری از سطح به عمق دارد.

در لایه مذکور اثر مقادیر سولفات کلسیم بر مقدار باکتری پالایش شده در سطح آماری ۵ درصد، معنی‌دار بود. تیمار ۵ درصد سولفات کلسیم بیشتر از تیمار شاهد و تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم در پالایش باکتری مؤثر بود. اثر متقابل تیمارها (کربنات کلسیم×سولفات کلسیم) بر مقدار باکتری پالایش شده در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شد. میزان پالایش باکتری در تیمار ۵ درصد، سولفات کلسیم در ترکیب با ۵ درصد کربنات کلسیم نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود. در کل می‌توان گفت میزان حذف باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع با افزایش عمق کاهش یافت.

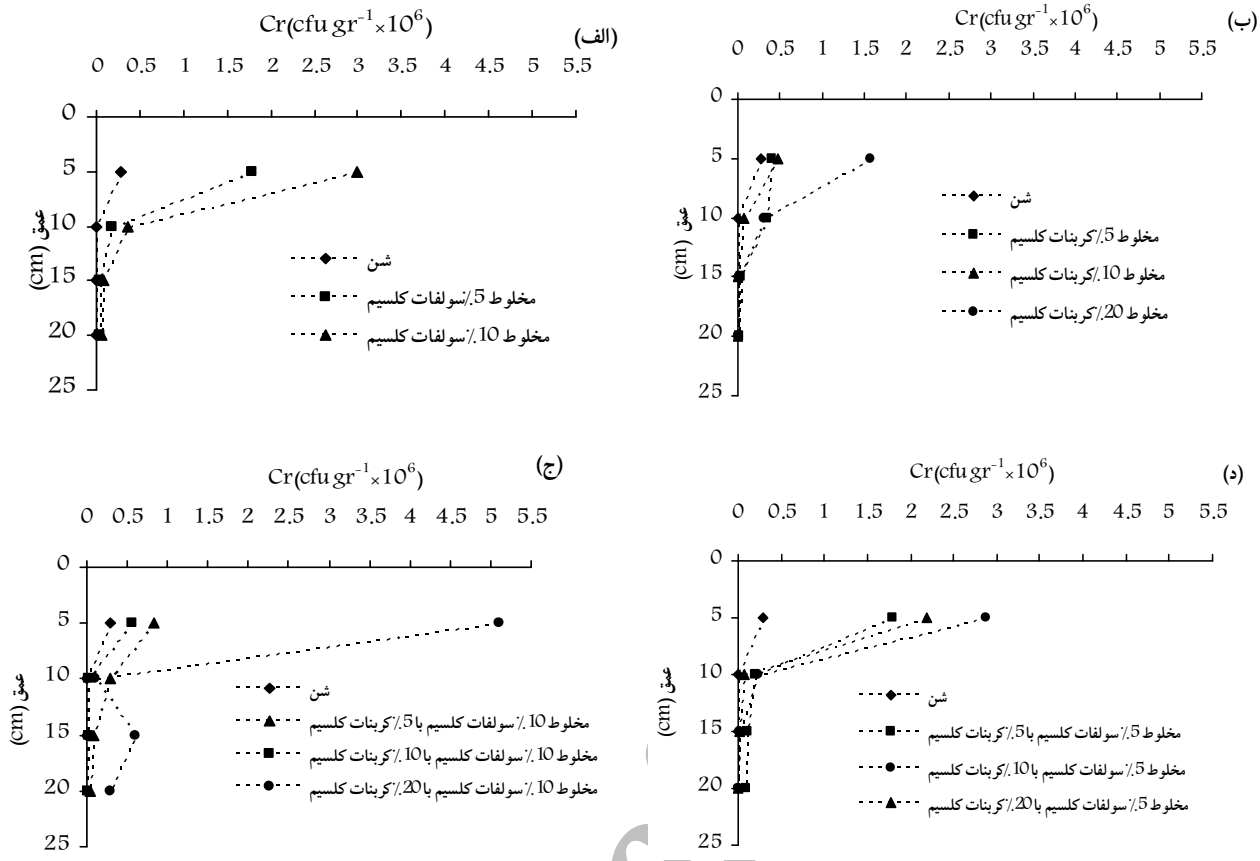
۳-۳- نیمرخ پالایش باکتری در ستون‌های شنی

نیمرخ پالایش باکتری به‌صورت C_r در برابر عمق ستون‌های شن برای تیمارهای شاهد و مخلوط‌های سولفات کلسیم و کربنات کلسیم با شن در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان پالایش باکتری در لایه‌های بالایی در شرایط

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر تیمارهای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم بر غلظت باکتری باقی‌مانده نسبی (C_r/C_0) در لایه‌های ۱۵-۱۰ و ۲۰-۱۵ سانتی‌متری

منبع تغییر	سولفات کلسیم			
کربنات کلسیم	۰	٪۵	٪۱۰	میانگین
	---------- ۱۰-۱۵ cm ----------			
۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۳۹	۰/۰۷۱	۰/۰۳۸
٪۵	۰/۰۴۵	۰/۱	۰/۰۷۹	۰/۰۷۵
٪۱۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۴
٪۲۰	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۶	۰/۰۶	۰/۰۲۹
میانگین	۰/۰۱۵	۰/۰۴۵	۰/۰۵۶	
	سولفات کلسیم	کربنات کلسیم	سولفات کلسیم ×کربنات کلسیم	
LSD (۰/۰۵)	۰/۰۱	۰/۰۱۱	۰/۰۲	
	---------- ۱۵-۲۰ cm ----------			
۰	۰/۰۰۲۴	۰/۰۳۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۱
٪۵	۰/۰۲۴	۰/۰۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۴
٪۱۰	۰/۰۰۰۲۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۳۷
٪۲۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۱۹	۰/۰۳	۰/۰۱۳
میانگین	۰/۰۰۸۱	۰/۰۳۲	۰/۰۱	
	سولفات کلسیم	کربنات کلسیم	سولفات کلسیم ×کربنات کلسیم	
LSD (۰/۰۵)	۰/۰۲	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- نیمرخ پالایش باکتری در ستون‌های شنی: الف) در تیمارهای سولفات کلسیم، ب) در تیمارهای کربنات کلسیم، ج) در تیمارهای با ۵ درصد سولفات کلسیم و مقادیر مختلف کربنات کلسیم، و د) در تیمارهای با ۱۰درصد سولفات کلسیم و مقادیر مختلف کربنات کلسیم

رطوبتی غیراشباع بیشتر است. دیوید و همکاران و پاولسون و همکاران نیز پالایش بیشتر باکتری در لایه‌های بالایی در شرایط غیراشباع را گزارش کردند [۶ و ۱۱]. نتایج پژوهش‌های لانس[1] و جربا[2] نیز نشان داد که انتقال پلی‌ویروس به لایه‌های پایینی ستون‌های خاک با بافت شنی لومی در شرایط رطوبتی غیراشباع نسبت به اشباع کمتر است [۲۰].

شکل ۲- الف میزان پالایش باکتری برای مقادیر مختلف سولفات کلسیم را نشان می‌دهد که در آن تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم دارای بیشترین پالایش باکتری است. تیمار ۵ درصد سولفات کلسیم میزان پالایش کمتری نسبت به تیمار ۱۰درصد سولفات کلسیم نشان می‌دهد. مقایسه این دو تیمار با شاهد نشان از پالایش بیشتر باکتری در لایه‌های سطحی این دو تیمار دارد. به‌دلیل پالایش بیشتر در لایه‌های رویی، میزان انتقال باکتری به لایه‌های پایینی کاهش یافته و نیمرخ پالایش تیمارها با افزایش عمق به نیمرخ پالایش تیمار شاهد نزدیک می‌شود. در شکل ۲- ب اثر تیمارهای کربنات کلسیم بر پالایش باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع آورده شده است. میزان پالایش باکتری برای مقادیر بیشتر کربنات کلسیم در لایه‌های بالایی بیشتر است. در لایه‌های سطحی تیمارهای مخلوط سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، پالایش بیشتر باکتری نسبت به هر یک از تیمارهای مجزای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم قابل مشاهده است (شکل ۲-ج و د). مقایسه انجام گرفته بین تیمارهای ۵ درصد و ۱۰ درصد سولفات کلسیم در ترکیب با مقادیر مختلف کربنات کلسیم، نشان از حذف کمتر باکتری در تیمار ۱۰ درصد نسبت به ۵ درصد سولفات کلسیم دارد. اعوجاج بیشتر منافذ و فعالیت بیشتر یون کلسیم در کاهش استخراج باکتری تیمار ۱۰ درصد سولفات کلسیم در مقایسه با تیمار ۵ درصد آن مهم می‌باشند. در کل مقدار حذف باکتری با افزایش مقدار کربنات کلسیم در مخلوط‌ها کاهش می‌یابد که می‌تواند به‌دلیل فعالیت بیشتر یون کلسیم و حذف ناکامل کل باکتری با روش استفاده شده باشد، تأثیر شرایط قلیایی ایجاد شده بر زنده ماندن باکتری نیز می‌تواند در این نتیجه‌گیری تأثیرگذار باشد.

[1] Lance
[2] Gerba

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۶- تحلیل واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر ضریب پالایش (λ_f) و حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده (Z_{max}) باکتری[1]

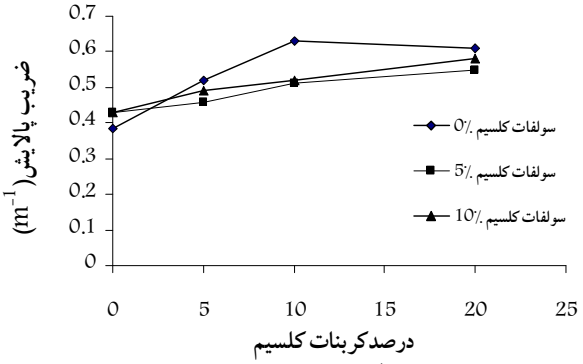
منبع تغییر	درجه آزادی	نسبت F	
		λ_f	Z_{max}
سولفات کلسیم	۲	۰/۹۳	۳/۱۶†
کربنات کلسیم	۳	۱۳/۰۹**	۶/۵۵**
سولفات کلسیم×کربنات کلسیم	۱۱	۵/۸۲**	۵/۳۷**

** و † به ترتیب نشان دهندهٔ تأثیر معنی‌دار در سطح مقادیر آماری ۱ و ۱۰ درصد می‌باشند.

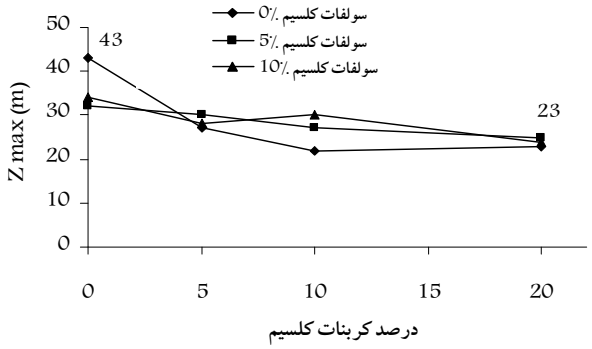
۳-۴- ضریب پالایش و حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده باکتری

در جدول ۶ اثر تیمارهای کربنات کلسیم و سولفات کلسیم و اثر متقابل آنها بر ضریب پالایش (λ_f) و حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده (Z_{max}) باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع آورده شده است. اثر تیمارهای سولفات کلسیم بر λ_f معنی‌دار نبود. در حالی که اثر تیمارهای کربنات کلسیم و اثر متقابل تیمارهای کربنات کلسیم×سولفات کلسیم بر λ_f در سطح آماری ۱ درصد، معنی‌دار شدند.

شکل ۳ نشان می‌دهد که λ_f در تیمارهای کربنات کلسیم با افزایش میزان کربنات کلسیم روند افزایشی دارد. تیمارهای ۵ و ۱۰ درصد سولفات کلسیم دارای λ_f تقریباً یکسانی بودند. به‌طور کلی در شرایط رطوبتی غیراشباع، هلال آبی[1] اطراف ذرات باعث نزدیک شدن باکتری‌ها به سطوح جذبی و پالایش بیشتر آنها می‌شود. همچنین زمان کافی برای جذب بیشتر باکتری‌ها روی سطوح ذرات نیز عامل مهمی در پالایش باکتری‌ها است که در شرایط جریان غیراشباع کند، تأمین می‌شود. از طرف دیگر، انحلال سولفات کلسیم و کربنات کلسیم سبب افزایش قدرت یونی محلول و اعوجاج بیشتر منافذ شده که پالایش بیشتر باکتری را به‌همراه دارد. علاوه بر این Z_{max} در تیمارهای دارای کربنات کلسیم و تیمار مخلوط کربنات کلسیم با سولفات کلسیم کاهش چشمگیری نشان



شکل ۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر ضریب پالایش باکتری در ستون‌های شن مورد بررسی



شکل ۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر حداکثر عمق قابل انتقال پیش‌بینی شده باکتری (Z_{max}) در ستون‌های شن مورد بررسی

می‌دهد (شکل ۴).

۴- نتیجه‌گیری

وجود ۷/۵ درصد کربنات کلسیم، مقادیری آهن و آلومینیوم به ریختهای بلوری و به‌ویژه بی‌شکل و همچنین پالایش فیزیکی می‌تواند از عوامل مهم پالایش باکتری در شن مورد استفاده باشد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کربنات کلسیم به‌طور معنی‌دار و قابل توجهی بر پالایش باکتری‌ها در محیط‌های متخلخل غیراشباع مؤثر است. علاوه بر اثر پالایش سطحی و قدرت یونی تیمارهای سولفات کلسیم و کربنات کلسیم، افزایش اعوجاج منافذ در اثر افزودن آنها و کاهش سرعت آب منفذی به‌دلیل تخلخل زیاد تیمارهای مذکور توانستند سبب کاهش انتقال و در نتیجه پالایش بیشتر باکتری در مقایسه با تیمار شاهد شوند.

حلالیت کمتر و جذب سطحی زیاد کربنات کلسیم و تأثیر قدرت یونی بیشتر در تیمارهای سولفات کلسیم را می‌توان به‌عنوان فاکتورهای مهم و مؤثر بر انتقال باکتری در این دو تیمار دانست. پارامتر ضریب پالایش باکتری نشان از اثر این دو تیمار بر انتقال باکتری در شرایط رطوبتی غیراشباع داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خاکهای دارای کانی‌های کربناته و سولفاته به‌خوبی قادر به پالایش میکربی در شرایط رطوبتی غیراشباع بوده و در امور تصفیه‌ای و بهداشتی قابل استفاده می‌باشند. به‌سبب مقادیر زیاد و اهمیت کربنات کلسیم و سولفات کلسیم در خاکهای کشور، جا دارد

[1] Water Meniscus

Archive of SID
www.SID.ir

پژوهشهای بیشتری در این زمینه به‌ویژه در شرایط خاکهای طبیعی انجام گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

بخشی از هزینه‌های این پژوهش توسط دانشگاه بوعلی سینا همدان تأمین شده است که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین مقداری از هزینه‌های این پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (طرح شماره ۸۴۱۴۷) تأمین گردیده است که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

۶- مراجع

1- Gerba, C. P. (1985). *Microbial contamination of the subsurface*, Ward, C. H., Gigar, W., and McCarty, P. L. (Eds.), Ground Water Quality., John Wiley and Sons Inc., NY .

2- Warnemuende, E., and Kanwar, R. S. (2002). "The effect of swine manure application on bacterial quality of leachate from intact soil columns." *Trans. ASAE*., 45(6), 1849-1857.

3- Unc, A., and Goss, M. J. (2003). "Movement of faecal bacteria through the vadose zone." *Wat. Air Soil Pollut*., 149, 327-337.

4- Jewett, D. C., Hibert, T. A., Logan, B. E., Arnold, R. C., and Bales, R. C. (1995). "Bacterial transport in laboratory columns and filters: Influence of ionic strength and pH on collision efficiency." *Wat. Res*., 7, 1673-1680.

5- Rostami, k., Mahboubi, A. A., Mosaddeghi, M. R., and Safari Sinegani, A. A. (2005). "*Pseudomonas fluorescens* transport in saturated sand and sand-gypsum mixtures." *Proc. Intern. Con. Human Impacts on Soil Quality Attributes*, Isfahan, Iran, 12-16.

6- David, K. P., and Mills, A. L. (2001). "Transport of *Escherichia Coli* in sand columns with constant and changing water contents." *J. Environ. Qual*., 30, 238-245.

7- Wollum, A. G., and Cassel, D. K. (1978). "Transport of microorganisms in sandy columns." *Soil Sci. Soc. Am. J*., 42, 72-76.

8- Bitton, G., Lahav, N., and Henis, Y. (1974). "Movement and retention of *Klebsiella* aerogenes in soil columns." *Plant and Soil*., 40, 373-380.

9- Pieper, A. P., Ryan, J. N., Harvey, R. W., Amy, G. L., Illangasekare, T. H., and Metage, D. W. (1997). "Transport and recovery of bacteriophage PRD1 in an unconfined sand aquifer: Effect of sewage-derived organic matter." *Environ. Sci. Technol*., 31, 1163-1170.

10- Jang, L. K., change, P. W., Findley, J., and Yen, T. F. (1983). "Selection of bacteria with favorable transport properties through porous rock for the application of microbial enhanced oil recovery." *Appl. Environ. Microbiol*., 46, 1066-1072.

11- Scholl, M. A., Mills, A. L., Herman, J. S., and Hornberger, G. M. (1990). "The influence of mineralogy and solution chemistry on the attachment of bacteria to representative aquifer minerals." *J. Contamin. Hydrol*., 6, 321-336.

12- Goldschmidt, J., . Zohar, D., Argamon, Y., and Kott, Y. (1973). *Effects of dissolved salts on the filtration of coliform bacteria in sand dunes*, Pergamon Press, New York, NY. 147.

13- Abu-Ashour, J., Joy, D. M., Lee, H., Whiteley, H. R., and Zeline, S. (1988). "Movement of bacteria in unsaturated soil columns with macropores." *Trans. ASAE.*, 41 (4), 1043-1050.

14- Buchter, B., Hinz, C., Gefller, M., and Flühler, H. (1966). "Heterogeneous flow and solute transport in an unsaturated stony soil monolith." *Soil Sci. Soc. Am. Proc*., 59, 14-21.

15- Macleod, F. A., Lappin-Scott, H. M., and Costerton, J. W., (1988). "Plugging of a model rock system by using starved bacteria." *Appl. Environ. Microbiol*., 54, 1365-1372.

16- Reynolds, P. J., Sharma, P., Jenneman, G. E., and McInereny, H. J. (1989). "Mechanisms of microbial movement in subsurface materials." *Appl. Environ. Microbiol*., 55, 2280-2286.

17- Sharma, M. M., Chang, Y. I., and Yen, T. F. (1985). "Reversible and irreversible surface charge modifications for facilitating transport through porous media." *Colloids Surf*., 16, 193-206.

18- Klute, A., and Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods, Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical methods*, 2nd Ed., Agronomy Monograph, ASA, WI.

19- Powelson, D. K., Simpson, J. R., and Gerba, C. P. (1990). "Virus transport and survival in saturated and unsaturated flow through columns." *J. Environ. Qual*., 19, 396-401.

20- Lance, J. C., and Gerba, C. P. (1984). "Virus movement in soil during saturated and unsaturated flow." *Appl. Environ. Microbiol*., 47, 335-337.

Archive of SID
www.SID.ir