



تعیین ضریب زوال باکتری کلیفرم و بررسی نقش عوامل محیطی بر آن (مطالعه موردی: حوزه آبریز سد لتیان)

مهدی مغربی^۱، مسعود تجریشی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

maghrebi@gmail.com

خلاصه

ضریب زوال باکتری یک پارامتر مهم و موثر در بررسی دینامیک و مدل‌سازی باکتری در مقیاس حوزه ای می باشد. در این تحقیق سعی گردیده است تا ضرایب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در شرایط مختلف به منظور مدل‌سازی مطلوب این باکتری در حوزه آبریز سد لتیان تعیین گردد. به منظور مدل‌سازی مطلوب باکتری کلیفرم مدفوعی در مقیاس حوزه ای می بایست ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در بافت خاک، رواناب و رودخانه به درستی تعیین گردد. در هر یک از این شرایط عوامل محیطی مختلفی بر ضریب زوال باکتری تاثیرگذار می باشند. براین اساس از دو روش آزمایشگاهی و میدانی به منظور تعیین ضرایب زوال باکتری استفاده شده است. در این مقاله نقش عوامل محیطی مختلف بر مقدار ضرایب زوال باکتری کلیفرم نیز بررسی شده است. بررسی ها نشان می دهد که تفاوت زیادی بین ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در رودخانه جاجرود با حالتی که باکتری در بافت خاک است وجود دارد. همچنین عوامل محیطی دما، اکسیژن محلول و تشعشع خورشید تاثیر بسزایی بر زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در منطقه مورد مطالعه دارند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی باکتری، رودخانه جاجرود، ضریب زوال باکتری، باکتری کلیفرم، عوامل محیطی

۱. مقدمه

در استانداردهای جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست ایران باکتری های کلیفرم کل^۱ و کلیفرم مدفوعی^۲ به عنوان دو شاخص آلودگی میکروبی منابع آب محسوب می شوند. [۱] باکتری کلیفرم کل شامل طیف وسیعی از باکتری‌ها می باشد که بطور طبیعی در روده انسان و حیوانات دیده می شوند، بعلاوه دسته دیگری که بطور طبیعی در خاک و آب‌های تمیز و دریایی وجود دارند. باکتری کلیفرم مدفوعی که یک زیرشاخه از خانواده باکتری کلیفرم کل است، شامل چندین گونه از خانواده باکتری کلیفرم است که در روده و مدفوع حیوانات گرم‌خون وجود دارد. بنابراین باکتری کلیفرم مدفوعی می تواند به عنوان شاخص ورود فاضلاب انسانی و حیوانی به منابع آب به شمار آید.

دینامیک جمعیت باکتری شامل رشد و تکثیر باکتری و همچنین زوال و نابودی آن می باشد؛ که این دینامیک تحت تاثیر شرایط محیطی می باشد. باین حال در اکثر سیستم های آبی طبیعی با گذشت زمان زوال و نابودی باکتری مشاهده می شود. سرعت زوال باکتری در سیستم های مختلف آبی (دریاچه، رودخانه، دریا و غیره) متفاوت می باشد. باین وجود این سرعت نیز در یک سیستم آبی مشخص (مانند رودخانه) با توجه به مشخصات محیطی و کیفیت آب از مکانی به مکان دیگر و در بازه های زمانی مختلف متفاوت می باشد. از جمله شرایط محیطی که بر سرعت زوال باکتری تاثیرگذارند می توان به دمای محیط، تشعشع خورشید، اکسیژن محلول، pH، مواد مغذی، رسوبگذاری، جمعیت میکروبی شکارگر، ذرات معلق اشاره کرد. از میان تنها نقش چند پارامتر محیطی؛ دما، pH و تشعشع خورشید با ارائه روابط ریاضی به طور مجزا کمی گردیده است. [۲] باین حال تاکنون هیچگونه رابطه ریاضی جامعی به منظور تعیین ضریب زوال باکتری در محیط های آبی ارائه نشده است.

^۱ Total Coliform

^۲ Fecal Coliform



تاکنون به منظور مدل‌سازی تغییرات جمعیت باکتری با گذشت زمان روابط مختلفی ارائه شده است. باین وجود معادله لگاریتمی درجه اول که به قانون چیک^۳ شهرت دارد، مورد قبول عموم بدین منظور قرار گرفته و به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه (۱) رابطه چیک را نشان می‌دهد.

$$C_t = C_1 \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

که در آن C_t تعداد (با غلظت) باکتری ثانویه، C_1 تعداد (با غلظت) باکتری اولیه، t زمان و k ضریب زوال باکتری می‌باشد. [۳]

سابقه مطالعات مربوط به تعیین ضریب زوال باکتری های گوناگون در سیستم های مختلف آبی به اوایل قرن بیستم بر می‌گردد. باین حال همچنان دارای ابهامات زیادی می‌باشد و انجام مطالعات بیشتر بمنظور تعیین شفاف نقش عوامل محیطی مختلف بر آن ضرورت دارد. تعیین مقدار عددی ضریب زوال باکتری علاوه بر تعمیق دانش نسبت به دینامیک جمعیتی باکتری، برای مدل‌سازی سیر و حرکت باکتری در منابع آب که از مسائل بروز مدیریت کیفی منابع آب محسوب می‌شود ضرورت پیدا می‌کند. یکی از دلایل وجود سابقه طولانی در امر تعیین مقدار عددی ضریب زوال باکتری در سیستم های آبی، مربوط به تعیین شاخص میکروبی مناسب برای منابع آب می‌باشد. یکی از ویژگی های باکتری شاخص دوام بالای آن در سیستم های آبی می‌باشد، بطوریکه آلودگی میکروبی ورودی به منبع آب برای مدت طولانی تری قابل تشخیص باشد و در صورت نابودی سایر میکروارگانیسم ها، براساس باکتری شاخص بتوان نشانه ای از ورود آلودگی میکروبی به منبع آب پیدا کرد.

براساس مطالعات انجام گرفته مقدار ضریب زوال باکتری کلیفرم کل و مدفوعی در سیستم های مختلف آبی متفاوت می‌باشد. این عدد برای آب شور دریا و تحت تشعشع خورشید حتی تا مقادیر 110 day^{-1} نیز بالغ می‌شود. [۵۴] مقادیر گزارش شده ضریب زوال باکتری کلیفرم کل و کلیفرم مدفوعی در رابطه با سیستم آبی رودخانه در مراجع مختلف تفاوت های زیادی دارد. علت این تغییر نیز همانطور که در قبل به آن اشاره شد شرایط محیطی متفاوت در زمان اندازه گیری ضریب فوق می‌باشد. شایان ذکر است که بعلت تغییر شرایط محیطی برای یک رودخانه مشخص در طول سال، ضریب زوال باکتری گزارش گردیده برای آن در طول سال متغیر می‌باشد. بنابراین می‌توان تغییرات فصلی را بزرگترین دلیل برای وجود تغییرات در مقدار گزارش شده ضریب زوال باکتری در مراجع مختلف دانست. بررسی های انجام شده توسط نگارنده حاکی از تغییرات مقادیر ضریب زوال باکتری کلیفرم کل تا 5.5 day^{-1} و باکتری کلیفرم مدفوعی تا 3 day^{-1} در سیستم آبی رودخانه در اکثر مراجع می‌باشد. [۳] و [۶ و ۷ و ۸ و ۹] باین حال مقادیر بزرگتر نیز در تعدادی از مراجع ذکر شده است.

جمع بندی نتایج ۳۰ مورد آزمایش به منظور تعیین ضریب زوال باکتری در رودخانه، حاکی از آنست که ۶۰ درصد مقادیر گزارش گردیده کمتر از 1 day^{-1} و ۹۰ درصد آنها کمتر از 5.28 day^{-1} می‌باشد. [۱۰] بریسوود (۲۰۰۶) در مطالعات خود ضریب زوال باکتری کلیفرم را در بازه وسیع تغییرات ۰.۲ تا 12 day^{-1} تعیین کرد. [۵] با وجود آنکه مقادیر ضریب زوال باکتری در رودخانه در اکثر مراجع در مقادیر پایین گزارش گردیده است، باین حال ضریب زوال باکتری کلیفرم تا 26.4 day^{-1} نیز ذکر شده است. [۱۰] شایان ذکر است که بازه تغییرات آورده شده مربوط به رودخانه های بزرگ می‌باشد، بطوریکه زمان ماند رودخانه در بین دو ایستگاه نمونه برداری تا بیش از یک روز نیز در نظر گرفته شده است. [۶] علیرغم بررسی های متعدد به منظور تعیین ضریب زوال باکتری در محیط های آبی مختلف و به خصوص رودخانه ها، دانش محدودی در رابطه با مقدار ضریب زوال باکتری کلیفرم و عوامل محیطی تاثیرگذار بر آن در رودخانه های کوچک (دبی کمتر از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه) وجود دارد. [۱۱] تاکنون مطالعات محدودی در رابطه با تعیین ضریب زوال باکتری در رودخانه های کوچک انجام گرفته است. بنابراین بررسی های بیشتری در رابطه با تعیین این عدد در رودخانه های کوچک مورد نیاز می‌باشد. میچل و چمبرلین (۱۹۷۸) ضریب زوال باکتری کلیفرم برای نهر کم عمق و منلاطم را برابر 15.12 day^{-1} تعیین کردند. شایان ذکر است که بطور کلی رودخانه های کوچک کوهستانی نسبت به رودخانه های بزرگ، تحت تاثیر نفوذ بیشتر تشعشع خورشید (بعلت عمق کمتر) و غلظت بالای اکسیژن محلول در رودخانه (بعلت تلاطم بیشتر) قرار دارند. بنابراین این دو عامل محیطی می‌تواند نقش بیشتری را در زوال باکتری در رودخانه ایفا کند.

این تحقیق در راستای مدل‌سازی سیر و حرکت باکتری کلیفرم مدفوعی در حوزه آبریز رودخانه جاجرود (شمال شرق تهران) انجام گرفته است. بدین منظور مدل AVSWATX مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین پارامتر میکروبی موثر در مدل AVSWATX مقدار عددی ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی می‌باشد. ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی به چند صورت در مدل مذکور وارد می‌شود. براین اساس ضریب زوال برای باکتری کلیفرم مدفوعی به سه صورت چسبیده به ذرات خاک (WDLPS)، موجود در فاز مایع خاک (WDLPQ) و در رودخانه (WDLPRCH) به مدل وارد می‌شود. [۱۲] در هر یک از این شرایط عوامل محیطی مختلفی بر ضریب زوال باکتری تاثیرگذار می‌باشند. به هنگام حرکت باکتری در رودخانه عوامل محیطی زیادی مانند دما، تشعشع خورشید، رسوبگذاری، اکسیژن محلول، مواد مغذی بر ضریب زوال باکتری تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین با توجه به عوامل محیطی

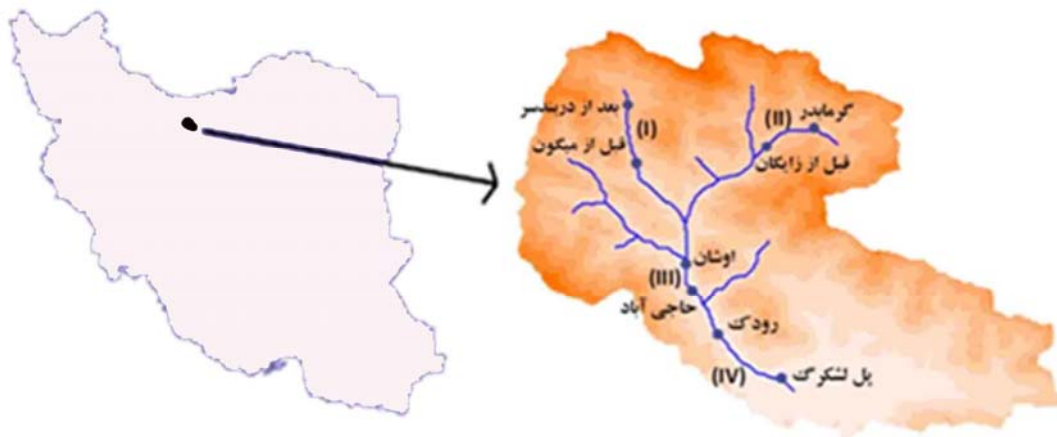
^۳ Chick's Law



زیادی و ناشناخته ای که می تواند تاثیرگذار باشند، برآورد دقیق ضریب زوال باکتری در رودخانه تنها از طریق آزمایشات میدانی می باشد. باین حال در رابطه با شرایطی که باکتری کلیفرم مدفوعی در فاز محلول خاک می باشد، مهمترین عامل محیطی تاثیرگذار بر ضریب زوال باکتری عامل دمای محیط می باشد. بنابراین به منظور برآورد مناسب ضریب زوال باکتری در حالت اخیر از مطالعات آزمایشگاهی بهره گرفته می شود. شایان ذکر است که بمنظور بررسی بیشتر مقادیر ضریب زوال باکتری کلیفرم کل نیز علاوه بر باکتری کلیفرم مدفوعی تعیین گردیده است.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز سدلتیان در شمال شرق تهران و با وسعت حدود ۷۰۰ کیلومترمربع قرار گرفته است. سد لتیان یکی از منابع اصلی تامین کننده آب شهر تهران محسوب می شود و حدود ۲۵٪ آب شرب تهران از این منبع تامین می شود. شکل ۱ موقعیت حوزه آبریز سد لتیان و رودخانه جاجرود را در کشور نشان می دهد. رودخانه جاجرود که مهمترین رودخانه این حوزه محسوب می شود، علاوه بر نقش تامین کنندگی آب پشت سد و در نهایت آب شرب شهر تهران، مورد استفاده های تفریحی فراوان مردم نیز قرار می گیرد. حوزه آبریز رودخانه جاجرود یک منطقه سردسیر است و از آذرماه به بعد بارش ها بصورت برف می باشد. دبی متوسط درازمدت (۱۳۸۴-۱۳۳۵) رودخانه جاجرود ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری رودک (در نزدیکی خروجی حوزه آبریز رودخانه جاجرود) برابر ۷۴۳ مترمکعب بر ثانیه می باشد. بیشترین دبی ماهانه رودخانه در اردیبهشت و کمترین دبی آن در شهریورماه ثبت شده است. به طور کلی رودخانه جاجرود، رودخانه ای کوچک، کوهستانی و پرتلاطم می باشد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز سدلتیان و رودخانه جاجرود

مهمترین فرآیندهای تولید آلودگی میکروبی در رودخانه جاجرود ورود فاضلاب ویلاها و منازل مسکونی به صورت مستقیم و غیرمستقیم (از طریق نشت از چاه جذبی دفع فاضلاب) و دفع مستقیم فضولات حیوانی در رودخانه تعیین شده است. تغییرات زیاد غلظت باکتری های کلیفرم کل و مدفوعی در مسیر حرکت رودخانه براین اساس قابل توجه می باشد. [۱۳]

۳. تعیین آزمایشگاهی ضریب زوال باکتری

همانطور که به آن اشاره گردید، ضریب زوال باکتری تحت تاثیر عوامل محیطی مختلفی قرار می گیرد. در نظرگرفتن تاثیر تمامی این عوامل بر روی زوال باکتری کار بسیار سخت و هزینه بر می باشد، علاوه براین نیاز به انجام آزمایشات میکروبی دقیق تر از آزمایش مرسوم MPN^۴ می باشد (مانند فیلترغشایی^۵). با این همه سعی گردید برای داشتن برآورد معقولی از نرخ زوال باکتری کلیفرم در امر مدلسازی، تاثیر عامل دما بر زوال باکتری در آزمایشگاه بررسی شود. بدین منظور در طی دو تاریخ چهارشنبه ۸۶/۸/۳۰ و پنج شنبه ۸۶/۹/۱ از ایستگاه هیدرومتری رودک واقع بر رودخانه جاجرود نمونه های میکروبی تهیه و به منظور جلوگیری از تاثیر تشعشع خورشید در فویل آلومینیومی پیچیده شدند. نمونه های میکروبی سپس در یخ نگهداری شده و به سرعت به محل آزمایشگاه منتقل و در انکوباتور در دمای استاندارد ۲۰ درجه سانتیگراد نگهداری گردیدند. در جدول ۱ سایر پارامترهای کیفی نمونه های آب آورده شده است.

^۴ Most Probable Number

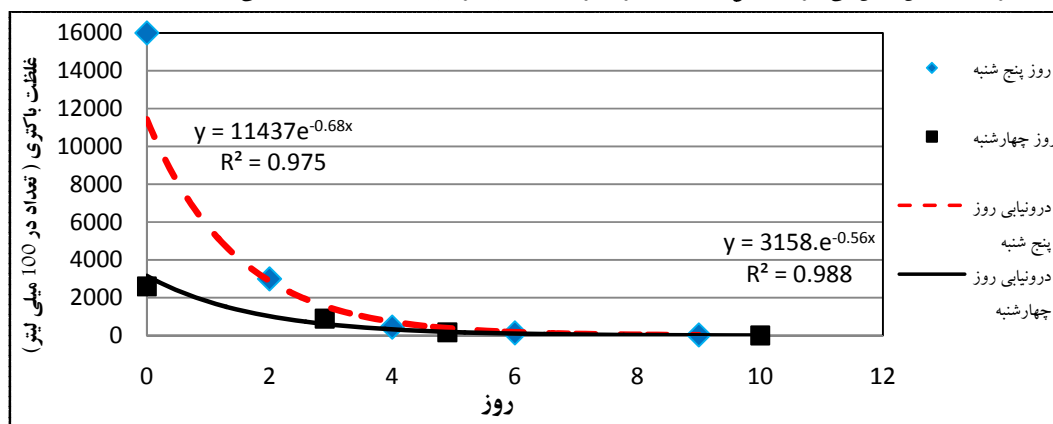
^۵ Membrane Filter



جدول ۱- داده های کیفی نمونه های میکروبی گرفته شده از رودخانه جاجرود

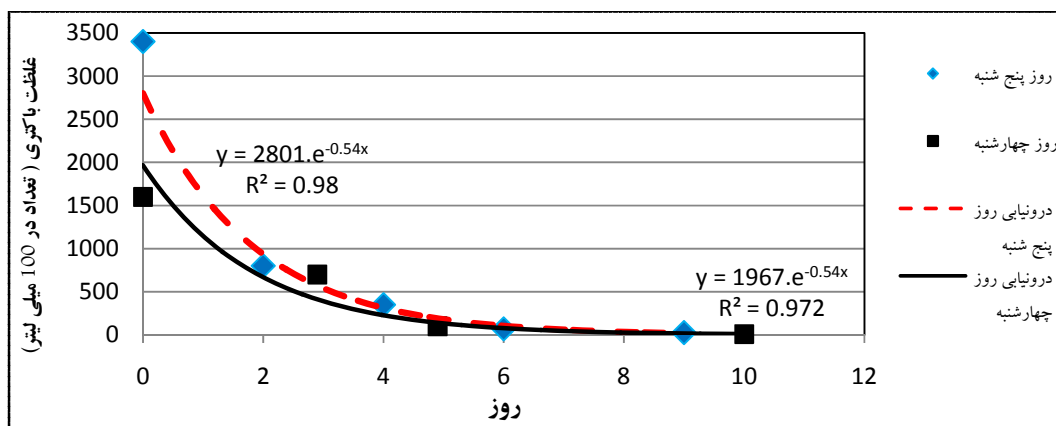
زمان (ساعت)	دمای آب (C°)	DO _s %	DO (mg/L)	TDS(mg/L)	EC (μsc/cm)	pH
۱۲:۲۰	۷	۸۹.۵	۱۰.۷	۱۸۰	۰.۳۵۹	۷.۸
۹:۳۰	۶	۷۰.۴	۸.۵	۱۷۴	۰.۳۴۸	۷.۵
دمای هوا (C°)	Turbidity(NTU)	SS(mg/L)	NO _x (mg/L)	N-NH _x (mg/L)	TP(mg/L)	PO _x (mg/L)
۸	۱۳	۱۷	۳.۵	۰.۰۵	۲.۱۷	۰.۰۴
۱۰	۳۷۰	۳۴۵	۱۱.۸	۰.۸	۱.۹۸	۰.۲۳

سپس در فواصل حدوداً ۲ الی ۳ روز از نمونه های داخل انکوباتور آزمایش MPN بعمل آورده می شود. آزمایش میکروبی بر روی نمونه ها بطور کامل و با سنجش غلظت باکتری های کلیفرم کل و مدفوعی در نمونه ها انجام می گردد. براین اساس از نمونه روز اول ۴ آزمایش و نمونه روز دوم ۵ آزمایش MPN بعمل می آید. در نهایت با فرض حاکم بودن قانون چیک (نرخ زوال باکتری درجه اول) نمودار مربوط به هر آزمایش ترسیم و ضریب زوال باکتری تحت شرایط آزمایش تعیین می گردد. شکل های ۲ و ۳ نیز تغییرات غلظت باکتری با گذشت زمان را نشان می دهد.



شکل ۲- تغییرات غلظت باکتری کلیفرم کل در نمونه های مورد آزمایش

باتوجه به شکل های ۲ و ۳ ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در دمای ۲۰ درجه در هر دو نمونه یکسان و برابر 0.54 day^{-1} تعیین می گردد. با توجه به مشاهدات میدانی در حین نمونه برداری، این طور به نظر می رسد که آلودگی روز چهارشنبه تحت تاثیر بارش در منطقه و در روز پنج شنبه تحت تاثیر ذوب برف بوده است. نکته قابل توجه آنست که علیرغم تغییرات جوی در منطقه، نرخ زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در هر دو نمونه یکسان می باشد. این درحالیست که در روز پنج شنبه (بادارز بودن کدورت و بار میکروبی بالاتر نسبت به روز چهارشنبه) نرخ زوال باکتری کلیفرم کل برابر 0.68 day^{-1} می باشد که نسبت به نمونه روز چهارشنبه که برابر 0.56 day^{-1} است، بیشتر می باشد.



شکل ۳- تغییرات غلظت باکتری کلیفرم مدفوعی در نمونه های مورد آزمایش



با توجه به جدول ۱ تفاوت‌های کیفی نمونه‌های دو روز در پارامترهای فیزیکی و شیمیایی قابل بررسی است. پارامترهای فیزیکی نمونه روز اول شامل دما، TDS، pH، اکسیژن محلول در روز اول بیشتر از روز دوم می‌باشد. باین حال با توجه به شرایط یکسان انتقال و نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه، پارامترهای فیزیکی دما و اکسیژن محلول نمی‌تواند تأثیر چندانی در اختلاف ضریب زوال باکتری کلیفرم کل مشاهده شده در نمونه‌های دو روز داشته باشد. پارامترهای فیزیکی TDS و pH نیز تفاوت چندانی در نمونه‌های دو روز با یکدیگر ندارند. بنابراین اختلاف ضریب زوال مشاهده شده در دو روز را می‌بایست در سایر پارامترهای کیفی ثبت شده جستجو کرد. پارامترهای مواد مغذی (نیترژن و فسفر) در نمونه روز پنج‌شنبه بسیار بیشتر از نمونه روز چهارشنبه می‌باشند. تأثیر مواد مغذی در جهت بقای بیشتر باکتری در محیط‌های آبی می‌باشد. [۲] به عبارت دیگر افزایش مواد مغذی باعث کاهش ضریب زوال باکتری می‌گردد. باین حال در نمونه روز پنج‌شنبه با افزایش ضریب زوال باکتری کلیفرم کل مواجه می‌باشیم. بنابراین به نظر می‌رسد عامل مهم دیگری در این بین وجود دارد که تأثیر بیشتری بر زوال باکتری کلیفرم کل دارد. با توجه به جدول ۱ این عامل می‌تواند غلظت بالای ذرات معلق و در نتیجه کدورت آب باشد. همانطور که به آن اشاره گردید، باکتری کلیفرم کل علاوه بر فاضلاب انسانی و حیوانی در خاک نیز موجود می‌باشند. بنابراین با افزایش غلظت ذرات معلق غلظت باکتری کلیفرم کل نیز به شدت افزایش می‌یابد. گرچه ذرات معلق با مکانیزم پناه دادن به باکتری مانع از تأثیر تشعشع خورشید و همچنین گونه‌های میکروبی متخاصم و شکارگر بر آن می‌شوند، باین وجود این عوامل تنها در مقیاس میدانی می‌توانند تأثیرگذار باشند و در مقیاس آزمایشگاهی نمی‌توانند تأثیر چندانی در رابطه با باکتری کلیفرم کل داشته باشند. بنابراین به نظر می‌رسد هیچ عامل دیگری به جزء دما بر ضریب زوال باکتری در مقیاس آزمایشگاهی تأثیر چندانی نداشته باشد. در نتیجه نتایج آزمایشگاهی ضریب زوال باکتری می‌تواند به خوبی منعکس کننده تأثیر عامل دمای محیط باشد. به نظر می‌رسد اختلاف مشاهده شده در ضریب زوال باکتری کلیفرم کل در نمونه‌های دو روز مربوط به غلظت بالای این باکتری در نمونه روز دوم و در نتیجه خطای ایجاد رگرسیون مناسب می‌باشد. با وجود اختلاف در پارامترهای کیفی نمونه‌های دو روز، ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در هردو نمونه یکسان می‌باشد. این مطلب نیز موید این نکته است که ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در مقیاس آزمایشگاهی تنها تحت تأثیر عامل دمای محیط و نه سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی می‌باشد.

۴. تعیین میدانی ضریب زوال باکتری

به منظور برآورد دقیق ضریب زوال باکتری کلیفرم در رودخانه جاجرود، استفاده از داده‌های میکروبی جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های واقع بر رودخانه مدنظر قرار می‌گیرد. داده‌های میکروبی مورد استفاده توسط شرکت آب و فاضلاب استان تهران بطور منظم از رودخانه جاجرود و از ایستگاه‌های مشخص روی آن تهیه گردیده است. بازه زمانی داده‌های فوق از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۵ می‌باشد. بطور کلی این داده‌ها در فواصل زمانی ماهیانه و در روزهای دوم یا سوم هفته نمونه برداری شده‌اند.

برای انتخاب قطعاتی از رودخانه جاجرود برای محاسبه ضریب زوال باکتری باید توجه داشت که اولاً نیاز به طول نسبتاً کافی (با توجه به ابعاد حوزه) بین دو ایستگاه نمونه‌برداری می‌باشد تا اثر زوال تحت عوامل محیطی روی باکتری کلیفرم مدفوعی پدیدار شود؛ و ثانیاً حتی‌الامکان سعی شود که بین دو ایستگاه نمونه‌برداری، منابع آلوده‌کننده و سرشاخه‌هایی که دارای بار میکروبی قابل ملاحظه می‌باشند وارد نگردند. براین اساس ۴ قطعه از رودخانه جاجرود انتخاب می‌گردد. شکل ۱ موقعیت این قطعات و ایستگاه‌های انتخابی بر روی رودخانه جاجرود را نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز مشخصات ایستگاه‌ها و قطعات انتخابی واقع بر رودخانه را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که در مابین قطعات انتخابی از رودخانه، مناطق جمعیتی با جمعیت محدود وجود دارند. برای محاسبه بار آلودگی میکروبی ورودی به رودخانه توسط این مناطق در قطعات انتخابی فرضیاتی در نظر گرفته شده است. بدین منظور سرانه فاضلاب تولیدی جمعیت ساکن و توریستی به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۱۵ لیتر بر روز و غلظت باکتری کلیفرم مدفوعی در فاضلاب نیز برابر ۱۰^۶ عدد در ۱۰۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. [۱۴] نتایج نشان دهنده تأثیر بسیار جزئی آلودگی تولیدی این مناطق بر آلودگی میکروبی رودخانه جاجرود نسبت به غلظت موجود باکتری کلیفرم مدفوعی در رودخانه جاجرود می‌باشد. بنابراین از تأثیر این مناطق صرف‌نظر شده و ضریب زوال باکتری کلیفرم کل و مدفوعی براساس رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

براین اساس ابتدا سری داده‌های میکروبی در دو ایستگاه بالادست و پایین دست واقع بر یک قطعه از رودخانه مربوط به یک روز غربال و جدا گردیدند. سپس در صورتیکه غلظت باکتری کلیفرم در ایستگاه پایین دست بیشتر از ایستگاه بالادست باشد، داده‌های مربوطه از آنالیز حذف می‌گردند. در اکثر موارد غلظت در ایستگاه پایین دست بسیار بیشتر از غلظت باکتری در ایستگاه بالادست در روز مربوطه می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره گردید، علت این موضوع ورود آبی و مستقیم فاضلاب انسانی و یا حیوانی به رودخانه جاجرود می‌باشد. [۱۳] نتایج نهایی آنالیز نشان دهنده تغییرات بالای مقادیر ضریب زوال



باکتری در مقاطع مختلف رودخانه می باشد. به منظور تعیین دقیقتر ضریب زوال باکتری، مقادیر بسیار بزرگی که به تنهایی می توانند خصوصیات آماری را تحت تاثیر قرار دهند از ادامه بررسی ها حذف می گردند. جدول ۳ نتایج نهایی آنالیز داده های ضریب زوال باکتری کلیفرم در رودخانه را نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات قطعات انتخابی از رودخانه به منظور محاسبه ضریب زوال باکتری

مشخصه	واحد	قطعه (I)	قطعه (II)	قطعه (III)	قطعه (IV)
مختصات ایستگاه بالادست	UTM1983	۵۴۳۲۹۶	۵۵۶۱۴۸	۵۴۷۶۳۸	۵۴۹۹۸۶
	(متر)	۳۹۸۳۶۶۷	۳۹۸۲۳۸۵	۳۹۷۲۲۰۷	۳۹۶۶۸۲۰
مختصات ایستگاه پایین دست	UTM1983	۵۴۳۸۷۰	۵۵۳۶۱۸	۵۴۷۸۸۷	۵۵۴۷۷۲
	(متر)	۳۹۸۰۳۴۷	۳۹۸۱۲۷۸	۳۹۷۰۴۷۴	۳۹۶۳۴۰۲
طول قطعه	متر	۴۹۷۷	۷۰۵۵	۵۴۲۷	۶۵۸۰
متوسط ارتفاع	متر	۲۴۰۰	۲۴۰۰	۱۸۵۰	۱۷۵۰
شیب رودخانه	درصد	۶.۱۴	۵	۲.۶۶	۱.۶۱
دبی متوسط (*)	مترمکعب بر ثانیه	۱	۱.۱۳	۶.۲۸	۷.۴۳
سرعت متوسط (**)	متر بر ثانیه	۱.۵	۱.۵	۱	۱

(*) با استفاده از مدل کالیبره شده SWAT برای دبی (با دقت ضریب همبستگی بالای ۰.۸۲ و شیب خط برابر یک) برآورد گردیده است.

(**) با در نظر گیری شیب زمین و دبی متوسط جریان برآورد گردیده است.

جدول ۳- نتایج آنالیز داده های ضریب زوال باکتری کلیفرم کل و مدفوعی در قطعات انتخابی از رودخانه جاجرود

پارامتر	قطعه (I)		قطعه (II)		قطعه (III)		قطعه (IV)	
	کلیفرم کل	کلیفرم مدفوعی	کلیفرم کل	کلیفرم مدفوعی	کلیفرم کل	کلیفرم مدفوعی	کلیفرم کل	کلیفرم مدفوعی
تعداد داده	۱۴	۱۶	۱۳	۱۳	۳۶	۴۱	۱۷	۱۵
بازه تغییرات	۰-۵۵	۸.۹-۵۷.۵	۰-۴۳	۰-۷۸	۰-۴۹.۹	۰-۵۴.۱	۰-۸۳.۵	۰-۸۲
میانگین	۶.۰۵	۱۰.۳۲	۲.۷۷	۲.۰۷	۷.۲۴	۵.۷۲	۲.۰۱	۵.۹۳
انحراف معیار	۴.۴	۱.۷۴	۴.۴۱	۴.۱۴	۴.۶	۵.۳۲	۲.۴۲	۴.۸۶

باتوجه به جدول ۳ بالاترین ارقام ضریب زوال مربوط به قطعات انتخابی (I) و (III) در رودخانه جاجرود می باشد. پدیده محیطی مهم و تاثیر گذار بر ضریب زوال باکتری در این قطعات عبارتست از اکسیژن محلول و تشعشع خورشید. در قطعه (I) بعلا شیب زیاد زمین و تلاطم بالای جریان رودخانه غلظت اکسیژن محلول در رودخانه بالا می باشد (شکل ۴). قطعه (III) نیز نسبت به سایر قطعات، تنها جانیست که شیب رودخانه کم و رودخانه بجای دره های تنگ و باریک در فضایی باز و تحت تاثیر مستقیم تابش خورشید قرار دارد. بنابراین تابش خورشید و رسوبگذاری در این بخش از رودخانه می توان باعث افزایش شدید زوال باکتری می شود (شکل ۵). بنابراین با توجه به اینکه مدل AVSWATX تنها یک مقدار بعنوان ضریب زوال باکتری در رودخانه در نظر می گیرد، بنابراین به طور میانگین مقادیر 4.5 day^{-1} و 6.4 day^{-1} برای ضریب زوال باکتری کلیفرم کل و کلیفرم مدفوعی در رودخانه جاجرود در نظر گرفته می شود.



شکل ۵- نمایشی از قطعه (III) رودخانه (مسیر اوشان تا حاجی آباد)



شکل ۴- نمایشی از قطعه (I) رودخانه (مسیر دربندسر تا میگون)

در این بخش گرچه مقادیری به منظور تعیین ضریب زوال باکتری در رودخانه جاجرود برآورد شده است، با این حال باید توجه داشت که این برآورد عاری از خطا نمی باشد. بخشی از خطا به نمونه برداری و رقیق سازی و انجام آزمایشات بر می گردد. با این وجود نکته بسیار مهمی که در محاسبه ضریب زوال باید به آن توجه کافی مبذول داشت آنست که در انجام آزمایشات میکروبی به روش لوله های تخمیری، گرچه در جدول MPN بر مبنای ۹۵٪ احتمال مقادیری به عنوان غلظت باکتری پیشنهاد شده است، ولی حدود حداقل و حداکثری نیز برای تغییرات آن لحاظ کرده است. بنابراین مقدار واقعی غلظت باکتری به روش MPN در حدود بازه‌ای قرار دارد و لزوماً عدد خوانده شده از جدول MPN نشان دهنده مقدار دقیق و واقعی غلظت باکتری نمی باشد. به طور کلی به منظور تعیین میدانی دقیق ضریب زوال باکتری در رودخانه، استفاده از روش های آزمایشگاهی با دقت بالاتر مانند روش فیلتر غشایی توصیه می گردد.

۵. نتیجه گیری

همانطور که اشاره گردید این تحقیق در راستای مدلسازی سیر و حرکت باکتری کلیفرم در حوزه آبریز رودخانه جاجرود انجام گرفته است. هدف اصلی در این تحقیق برآورد مناسب پارامترهای مرتبط با ضریب زوال باکتری در مقیاس حوزه ای می باشد. براین اساس نتیجه آزمایشگاهی تعیین ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی می تواند برابر مقدار ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در فاز مایع خاک (WDLPQ) قرار بگیرد. این بدان علت است که مقدار ضریب زوال باکتری تعیین شده در آزمایشگاه تنها تحت تاثیر پارامتر دما می باشد. در حالتی که باکتری در فاز مایع خاک قرار دارد، تنها پارامتر مهم تاثیرگذار بر زوال باکتری نیز دمای محیط می باشد. بنابراین مقدار این پارامتر برابر 0.54 day^{-1} تعیین می گردد. شایان ذکر است که در هنگامی که باکتری در خاک می باشد، از تاثیرات مستقیم تشعشع خورشید به دور است.

ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی چسبیده به دانه های خاک (WDLPS) کمتر از شرایطی است که باکتری در فاز مایع خاک می باشد. معمولاً از یک ضریبی برای تبدیل این دو پارامتر به یکدیگر استفاده می کنند. انتخاب ضریب یک دهم با توجه به توصیه های انجام شده معقول و مناسب بنظر می رسد. [۷] بنابراین مقدار ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی چسبیده به دانه های خاک در این حوزه برابر 0.054 day^{-1} در نظر گرفته می شود. در این بین ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در رودخانه (WDLPRCH) مهمترین و تاثیرگذارترین پارامتر ضریب زوال در امر مدلسازی باکتری در مقیاس حوزه ای محسوب می شود. با این وجود عوامل محیطی تاثیرگذار بر این پارامتر را نمی توان محدود به دمای محیط کرد. علاوه بر این در رودخانه های کوچک کوهستانی (مانند رودخانه جاجرود) بعلاوه عمق کمتر نسبت به رودخانه های بزرگ، بیشتر تحت تاثیر نفوذ مستقیم خورشید به عمق رودخانه و غلظت بالای اکسیژن محلول در رودخانه (بعلاوه تلاطم) قرار دارند. با توجه به تغییر شرایط محیطی از یک مکان به مکان دیگر، بنابراین برای تعیین دقیق ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی در رودخانه می بایست در مکان موردنظر به طور جداگانه اندازه گیری های میدانی انجام بگیرد. بررسی های انجام گرفته بدین منظور در این تحقیق نشان دهنده تغییرات زیاد مقادیر این پارامتر در قطعات مختلف رودخانه و همچنین در یک قطعه می باشد. از سوی دیگر در مدل AVSWATX قابلیت فرض ضرایب زوال متفاوت در قطعات مختلف رودخانه وجود ندارد، بلکه تنها یک مقدار ضریب زوال تحت هر یک از شرایط باکتری در مقیاس حوزه ای در نظر می گیرد. بنابراین مقدار 6.4 day^{-1} بطور میانگین برای پارامتر مذکور به منظور استفاده در امر مدلسازی در نظر گرفته می شود.

گرچه در مدلسازی های کیفی در حوزه های آبریز به مدلسازی باکتری کلیفرم کل کمتر توجهی می شود، با این حال در این تحقیق علاوه بر تعیین ضریب زوال باکتری کلیفرم مدفوعی، تعیین ضریب زوال باکتری کلیفرم کل نیز به روش های گفته شده انجام گرفت. براین اساس ضریب زوال باکتری



کلیرم کل در آزمایشگاه (تحت تاثیر دما) بیشتر و در رودخانه بطور کل کمتر از ضریب زوال باکتری کلیرم مدفوعی می باشد. در روش میدانی زوال باکتری کلیرم کل در قطعه (III) نسبت به قطعه (I) بالاتر (برخلاف کلیرم مدفوعی) می باشد. این مطلب نشان دهنده تاثیر بالای نقش تشعشع خورشید و رسوبگذاری نسبت به نقش اکسیژن محلول در زوال باکتری دارد. همچنین نتایج آزمایشگاهی حاکی از تاثیر بیشتر دما بر زوال باکتری کلیرم کل نسبت به باکتری کلیرم مدفوعی دارد.

۶. قدردانی

بدین وسیله از همکاری شرکت آب و فاضلاب استان تهران و سازمان آب منطقه ای تهران به جهت در اختیار گذاشتن داده های کیفی رودخانه جاجرود صمیمانه قدردانی می شود.

۷. مراجع

۱. مجموعه قوانین و مقررات حفاظت محیط زیست ایران، تدوین دفتر حقوقی و امور مجلس، اسفندماه ۱۳۸۳، جلد اول، صفحه ۹۱۰
۲. 'Modelling faecal coliform concentrations in streams, Report', (۱۹۹۵), No. ۱۲۷, Institute of Hydrology, www.ceh.ac.uk/products/publications/cehpublications-h-freeprinted.html
۳. Crane S.R., Moore J.A., (۱۹۸۶), "Modeling Enteric Bacteria Die-Off : A Review", Water, Air, and Soil Pollution ۲۷, PP ۴۱۱-۴۳۹
۴. EPA, "Protocol for developing pathogen TMDLs", (۲۰۰۱), First edition, PP ۱۹
۵. Brissaud F., (۲۰۰۶), "Hydrodynamic behaviour and faecal coliform removal in a maturation pond", Water Science and Technology, ۴۲, PP ۱۱۹-۱۲۶
۶. Gibson.C.J., May, (۲۰۰۶), "Bacterial loadings watershed model in Copano bay", Master of Science in Engineering Thesis, the University of Texas at Austin
۷. Parajuli.P.B., (۲۰۰۷), "SWAT bacteria sub-model evaluation and application, doctoral dissertation", Kansas State University, Department of Biological and Agricultural Engineering
۸. Servais.P., Armisen.T.G., George.I., Billen.G., (۲۰۰۷), "Fecal Bacteria in the rivers of the seine drainage network (France): sources, fate and modeling", Science of the Total Environment, ۳۷۵, ۱-۳, PP ۱۵۲-۱۶۷
۹. Baffaut.C., Arnold.J.A., Schumacher.J.S., (۲۰۰۳), "Fecal coliform fate and transport simulation with SWAT", ۲nd international SWAT conference
۱۰. جورج ال. بووی و همکاران، مدل سازی کیفی آب های سطحی، سینتیک ها، ثابت ها و نرخ ها، ترجمه علی ترابیان و سید حسین هاشمی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۸۱
۱۱. Beaudou.P., Tousset.N., Bruchon.F., Lefevre.A., Taylor.H.D., (۲۰۰۱), "In Situ Measurement and Statistical Modeling of Escherichia Coli in Small Rivers", Water Research, Vol. ۳۵, No. ۱۳
۱۲. Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., (۲۰۰۴), "Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation, Version ۲۰۰۵"
۱۳. مهدی مغربی، مسعود تجریشی، مهدی جمشیدی، احمد ابریشمی، بررسی آلودگی میکروبی رودخانه جاجرود و نقش عوامل تولیدکننده آن، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز، مهر ۱۳۸۷
۱۴. Metcalf & Eddy, (۲۰۰۴), "Waste Water Engineering Treatment and Reuse", Fourth Edition, P. ۱۵۶