

شبیه‌سازی فرایند نفوذ سموم شیمیایی در خاک به کمک اتوماتای یادگیر سلولی

سمیرا نوفرستی محمدرضا میبدی

آزمایشگاه محاسبات نرم

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تهران ایران

چکیده

در دهه‌های اخیر استفاده از سموم شیمیایی برای محافظت محصولات کشاورزی فرآوری شده است. آزاد شدن سموم در محیط خطرات زیانباری برای محیط و سلامت انسانها دارد. از جمله عواقب استفاده از سموم شیمیایی آلودگی آبهای زیرزمینی است که در بسیاری از شهرها منبع اصلی آب آشامیدنی را تشکیل می‌دهد. بهمین دلیل لازم است قبل از استفاده از سموم اثر آن بر محیط مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله مدلی مبتنی بر اتماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی اثرات سموم در خاک پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از این مدل می‌توان اثر عوامل مختلف موثر در نفوذ سموم در خاک قبل از اینکه مبادرت به استفاده از آنها نموده بررسی قرار داد. آزمایشگاهی انجام گرفته نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده با استفاده از این مدل با واقعیت تطبیق دارند.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، نفوذ سموم شیمیایی در خاک، اتوماتای یادگیر سلولی

بنابراین لازم است قبل از استفاده از سموم اثر آن بر محیط بررسی و راهکارهای بهتری برای حفاظت از آبهای زیرزمینی فراهم نمود.

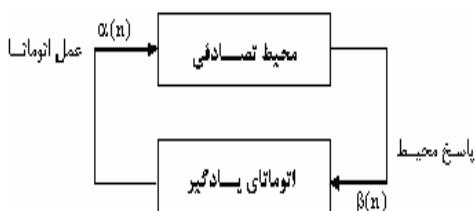
مدلسازی فرآیند انتقال آلودگی ناشی از سموم و محافظت محیط در مقابل آن مسائل پیچیده‌ای هستند. مشکلات اصلی این مسئله عبارتند از: عدم وجود یک فرمول ریاضی دقیق برای توصیف تعامل فیزیکی و شیمیایی ذرات آلوده با آب، عدم وجود اطلاعات کافی در زمینه تعامل ذرات و عدم اعتبار داده‌های اولیه موجود. مدل‌های مختلفی مبتنی بر مشتقات جزئی برای محاسبه مقدار سم موجود در آبهای زیرزمینی به کار رفته است. مشکل عمده این مدل‌ها پیچیدگی معادلات مورد استفاده و داده‌های مورد نیاز برای حل مسئله است. این مدل‌ها نیاز به داده‌های دقیق و کافی دارند. در حالیکه داده‌های موجود مربوط به مکان خاص (نوع خاصی از خاک و محصولات کشاورزی) و دارای درجه‌های متفاوتی از کیفیت هستند. به علاوه جمع‌آوری این داده‌ها بسیار دشوار است. برای ارزیابی نفوذ سموم به آبهای زیرزمینی از مدل‌های ریاضی یک بعدی نیز استفاده شده است. از آنجا که این مدلها شدیداً تحت تأثیر اطلاعات مربوط به خواص خاک، آب و هوا و نحوه کشاورزی هستند، تعداد زیادی جدول برای انعکاس همه ترکیبات ممکن در جهان نیاز است. برای کاهش تعداد این جدولها به صورتی که قابل مدیریت باشند، از روش ایجاد سناریوهای آب و هوا-خاک استفاده می‌شود. برای این منظور نمونه

۱- مقدمه

در کشاورزی مدرن سموم عناصر ضروری هستند و برای کنترل آفتها به کار می‌روند. سالانه بیشتر از ۲ میلیون تن سم که از ۷۰۰ عنصر فعال مشتق می‌شوند، در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده بی‌رویه از سموم برای محیط، ارگانهای غیر هدف و حتی سلامتی انسانها زیان‌آور است. این سموم که توسط کشاورزان، موسسات مختلف و حتی عامه مردم مصرف می‌شوند، منبع عظیمی از سم را در محیط فراهم می‌کنند. سمومی که به صورت اسپری مصرف می‌شوند، در هوا منتشر شده و از آنجا می‌توانند جذب آب یا خاک شوند. سمومی که مستقیماً روی خاک ریخته می‌شوند نیز ممکن است توسط آبهای سطحی شسته شده یا به داخل خاک نفوذ کنند و از آنجا وارد آبهای زیرزمینی شوند. بعد از این که محصولات کشاورزی سپاشی می‌شوند سموم جذب خاک شده و بسته به ترکیبات آنها ممکن است تا مدت‌ها در سطح خاک باقی بمانند. سپس وقتی آب به دلیل بارش باران یا جاری شدن سیل در خاک نفوذ می‌کند، این سموم را در خود حل کرده و به لایه‌های زیرین خاک می‌برد. آب حاوی سم ممکن است به تدریج به آبهای زیرزمینی برسد. آبهای زیرزمینی منبع اصلی آبهای تازه هستند. در بسیاری از شهرهای بیش از ۹۰ درصد آب مصرفی شهر از آبهای زیرزمینی تأمین می‌شود.

آورده است. این قوانین می‌توانند به صورت قطعی و یا احتمالی بیان شوند. برای اطلاعات بیشتر درباره CA و کاربردهای آن میتوان به [۹] مراجعه نمود.

اتوماتاهای یادگیر^۴: یک اتوماتای یادگیر یک ماشین با حالات محدود^۵ است که میتواند تعداد محدودی عمل را انجام دهد. هر عمل انتخاب شده توسط محیطی احتمالی ارزیابی می‌گردد و پاسخی به اتوماتای یادگیر داده می‌شود. اتوماتای یادگیر از این پاسخ استفاده نموده و عمل بعدی خود را انتخاب می‌کند. در طی این فرایند، اتوماتای یادگیر یاد می‌گیرد که چگونه بهترین عمل را از بین اعمال مجاز خود انتخاب نماید. ارتباط بین اتوماتای یادگیر و محیط را نشان می‌دهد. محیط را می‌توان توسط سه تایی $\{\alpha, \beta, c\} \equiv E$ نشان داد که در آن $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه $c = \{c_1, \dots, c_m\}$ و $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$ مجموعه خروجیها و مجموعه احتمالهای جریمه می‌باشد. هرگاه β مجموعه دو عضوی باشد محیط از نوع P می‌باشد. در چنین محیطی $\beta_1 = 1$ به عنوان جریمه و $\beta_2 = 0$ به عنوان پاداش در نظر گرفته می‌شود. در محیط Q، $\beta(n) = 0$ می‌تواند به طور گسته یک مقدار از مقادیر محدود در فاصله $[0, 1]$ و در محیط S، $\beta(n) = 0$ هر مقدار در فاصله $[0, 1]$ را اختیار کند. احتمال اینکه عمل i نتیجه نا مطلوب داشته باشد، می‌باشد. در محیط ایستا مقادیر c_i در طی زمان بدون تغییر می‌مانند، حال آنکه در محیط غیر ایستا این مقادیر در طی زمان تغییر می‌کنند. اتوماتای یادگیر به دو گروه اتوماتاهای یادگیر با ساختار ثابت و اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر تقسیم می‌شوند. در این مقاله از اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر استفاده شده است که در ادامه این بخش توضیح داده میشود.



شکل ۱: ارتباط بین اتوماتای یادگیر و محیط

اتوماتاهای یادگیر با ساختار متغیر^۶: اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر توسط ۴ تایی $\{\alpha, \beta, p, T\}$ نشان داده می‌شود که در آن $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عملهای اتومات، $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ مجموعه ورودی‌های اتومات، $p = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ بردار احتمال انتخاب هریک از عملها و $T[\alpha(n), \beta(n), p(n)] = p(n+1)$ الگوریتم یادگیری می‌باشد. در این نوع از اتوماتاهای یادگیر، اگر عمل i در مرحله n انجام شود و پاسخ مطلوب از محیط دریافت نماید، احتمال $p_i(n)$ کاهش

خاک، سم و شرایط جوی به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. کار با مدل‌های ریاضی به دلیل نیاز به داده‌های فراوان دشوار است. بندهایی^۱ و پاووسی^۲ برای شبیه‌سازی نفوذ سوم شیمیایی در خاک مدل ساده‌ای با استفاده از اتوماتای سلوی ارائه کردند [۱]. این مدل در مقایسه با مدل‌های تحلیلی یک مدل کمی است. این مدل بجای انجام آزمایشات واقعی از طریق شبیه‌سازی تاثیر عواملی مانند نوع خاک، شرایط جوی را در میزان نفوذ سم به آبهای زیرزمینی را بررسی می‌کند. در این مدل حرکت آب در خاک به دلیل جاذبه زمین صورت می‌گیرد.

حرکت افقی آب نیز به صورت تصادفی انجام می‌شود.

در این مقاله مدلی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلوی برای شبیه‌سازی نفوذ سوم شیمیایی در خاک پیشنهاد می‌گردد. نشان داده میشود که مدل اتوماتای یادگیر سلوی مدل مناسبتری برای این شبیه‌سازی می‌باشد و میتوان شبیه‌سازی که به واقعیت نزدیکتر می‌باشد انجام داد. در واقع از اتوماتای یادگیر سلوی برای شبیه‌سازی واقعی تر حرکت آب در خاک استفاده می‌شود. در مدل پیشنهادی دیگر عوامل موثر در حرکت آب از قبیل خاصیت موئینگی و خاصیت پیوستگی مولکولها را نیز منظور شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این مدل کارایی آن را نشان میدهد. ادامه مقاله به این صورت سازماندهی شده است: در بخش ۲ بطور اختصار اتوماتای سلوی، اتوماتای یادگیر و اتوماتای یادگیر سلوی ارایه میشود و در بخش ۳ شبیه‌سازی نفوذ سوم در خاک که مبتنی بر مدل اتوماتای سلوی می‌باشد شرح داده میشود. در بخش ۴ روشی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلوی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بخش پایانی مقاله نتیجه گیری می‌باشد.

۲- اتوماتای سلوی، اتوماتای یادگیر و اتوماتای یادگیر سلوی

اتوماتای سلوی^۳: اتوماتای سلوی (CA) یک مدل ریاضی برای سیستم‌هایی است که در آنها چندین مؤلفه ساده برای تولید الگوهای پیچیده با هم همکاری می‌کنند. اتوماتاهای سلوی در حقیقت سیستم‌های دینامیکی گستتهای هستند که رفتارشان کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. در اتوماتای سلوی یک مجموعه منظم از سلول‌ها وجود دارد که هر کدام می‌توانند با چند وضعیت مختلف مقداردهی شوند. با توجه به تعداد مقادیری که سلولها می‌توانند اختیار کنند، اتوماتای سلوی به دو نوع دوره‌ی و چندمقداره تقسیم می‌شود. برای هر سلول یک همسایگی از سلولها در نظر گرفته می‌شود. عموماً همسایگی استفاده شده از نوع همسایگی نزدیک می‌باشد. این سلول‌ها در زمانهای گستته بر طبق یک قانون محلی بهنگام‌رسانی می‌شوند. در تعیین وضعیت جدید برای هر سلول، مقادیر سلول‌های همسایه نیز تأثیرگذار هستند. انتخاب قوانین مختلف برای بهنگام‌رسانی، انواع متفاوتی از اتوماتای های سلوی را بوجود

مجموعه اعمال خود را انتخاب کرده و انجام می‌دهد. فرآیند انتخاب عمل و دادن پاداش و یا جریمه کردن اعمال انتخابی توسط سلولها تا زمانیکه سیستم به وضعیت پایدار برسد و یا یک معیار از قبل تعیف شدهای برقرار شود، ادامه می‌باید. عمل بهنگام‌سازی ساختار اتماتاهای یادگیر موجود در اتماتای یادگیر سلولی توسط الگوریتم یادگیری انجام می‌شود. برای اطلاعات بیشتر درباره اتماتاهای یادگیر سلولی و کاربردهای آن میتوان به [۱۰-۲۴] مراجعه نمود.

۳- شبیه‌سازی فرایند نفوذ سموم در خاک به کمک اتماتای سلولی

در این بخش مدل بندهایی^{۱۱} و پاووسی^{۱۲} برای شبیه‌سازی نفوذ سموم شبیمایی در خاک که مبتنی بر اتماتای سلولی میباشد ارائه میگردد^[۱]. این مدل در مقایسه با مدل‌های تحلیلی یک مدل کمی است. با استفاده از این میتوان مدل بجای انجام آزمایشات واقعی، از طریق شبیه‌سازی تاثیر عواملی مانند نوع خاک، شرایط جوی را در میزان نفوذ سموم به آبهای زیرزمینی را بررسی کرد. در این مدل حرکت آب در خاک به دلیل جاذبه زمین صورت می‌گیرد. حرکت افقی آب نیز به صورت تصادفی انجام می‌شود.

در این روش نفوذ سموم در خاک با یک اتماتای دو بعدی مدل شده است. سلولها در اتماتای سلولی در یک شبکه دو بعدی طبق همسایگی فون‌نیومن چیده شده‌اند. در همسایگی فون‌نیومن هر سلول با ۴ سلول دیگر همسایه است که عبارتند از سلول شمالی، جنوبی، شرقی و غربی (شکل ۲). حالت هر سلول نوع عنصر تشکیل دهنده آن سلول را نشان می‌دهد که می‌تواند آب، خاک یا خالی باشد. به علاوه هر سلول آب یا خاک می‌تواند حاوی مقداری سم باشد که با یک عدد صحیح مشخص می‌شود. به علاوه هر سلول مطابق شکل ۳ به ۴ بخش تقسیم می‌شود. مقدار سم موجود در سلول به طور مساوی در این ۴ بخش توزیع شده است. سلولهای اتماتای سلولی در یک شبکه دو بعدی m^*n قرار دارند و بنابراین همسایه‌های سلول (j,i) با $(j,i-1)$, $(j,i+1)$, $(j,i+2)$, $(j,i-2)$ و $(j,i-3)$ مشخص می‌شوند. حالت سلول (j,i) یک ۵ تایی به صورت $c(i,j)=<I,N,S,W,E,F>$ تعریف می‌شود که I شناسه سلول است که می‌تواند آب، خاک یا خالی باشد، E, S, N و W چهار متغیر هستند که F= $<u,d,l,r>$ یک چهارتایی با متغیرهای یک بیتی است. در ابتدای شبیه‌سازی سلولها مقدار دهی اولیه می‌شوند که تعیین حالت هر سلول و مقدار سم در هر سلول خاک(یعنی سلولهای خاکی) که حداقل یک همسایه خالی دارند) میباشد. سپس آب به بستر خاک اضافه می‌شود که این بستگی به شرایط جوی دارد که در ادامه مقاله بررسی می‌شود.

یافته و سایر احتمالها افزایش می‌یابند. در هر حال، تغییرات به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا حاصل جمع $(p_i)_i$ ها همواره ثابت و مساوی یک باقی بماند. الگوریتم زیر یک نمونه از الگوریتم‌های یادگیر خطی است.

الف- پاسخ مطلوب

$$p_i(n+1) = p_i(n) + a[1 - p_i(n)]$$

$$p_j(n+1) = (1 - a)p_j(n) \quad \forall j \neq i$$

ب- پاسخ نامطلوب

$$p_i(n+1) = (1 - b)p_i(n)$$

$$p_j(n+1) = \frac{b}{r-1} + (1 - b)p_j(n) \quad \forall j \neq i$$

در روابط فوق، a پارامتر پاداش و b پارامتر جریمه است. با توجه به مقادیر a و b سه حالت را می‌توان در نظر گرفت. زمانیکه a و b با هم برابر باشند، الگوریتم را^۷ L_{RP} ، زمانیکه b از a خیلی کوچکتر باشد، الگوریتم را^۸ L_{Rep} و زمانیکه b مساوی صفر باشد، الگوریتم را^۹ L_{RI} می‌نامیم. برای اطلاعات بیشتر درباره اتماتاهای یادگیر و کاربردهای آن میتوان به [۲۵-۲۹] مراجعه نمود.

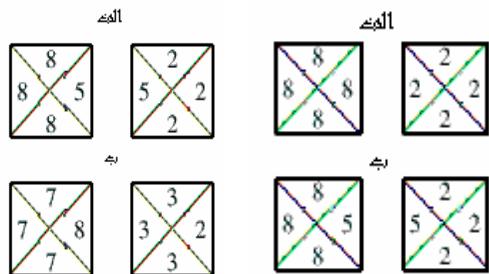
اتماتای یادگیر سلولی^{۱۰}: اتماتای یادگیر سلولی، CLA، مدلی برای سیستم‌هایی است که از اجزاء ساده‌ای تشکیل شده‌اند و رفتار هر جزء بر اساس رفتار همسایگانش و نیز تجربیات گذشته‌اش تعیین و اصلاح می‌شود. اجزاء ساده‌ای تشکیل دهنده این مدل، از طریق تعامل با یکدیگر می‌توانند رفتار پیچیده‌ای از خود نشان دهند. هر اتماتای یادگیر سلولی، از یک اتماتای سلولی تشکیل شده است که هر سلول آن به یک یا بیشتر اتماتای یادگیر مجهز می‌باشد که وضعیت این سلول را مشخص می‌سازند. همانند اتماتای سلولی، قانون محلی در محیط حاکم است و این قانون تعیین می‌کند که آیا عمل انتخاب شده توسط یک اتماتا در یک سلول باستی پاداش و یا جریمه شود. عمل دادن پاداش و یا جریمه منجر به بروز درآوردن ساختار اتماتای یادگیر سلولی به منظور نیل به یک هدف مشخص می‌گردد. در اتماتای یادگیر سلولی می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. در حالت کلی هر چندتایی مرتب از سلولها را می‌توان به عنوان همسایه در نظر گرفت. عملکرد اتماتای یادگیر سلولی به این صورت است که در هر لحظه هر اتماتای یادگیر در اتماتای یادگیر سلولی یک عمل از مجموعه اعمال خود را انتخاب می‌کند. عمل انتخاب شده با توجه به اعمال انتخاب شده توسط سلولهای همسایه و قانون حاکم بر اتماتای یادگیر سلولی پاداش داده و یا جریمه می‌شود. با توجه به اینکه عمل انتخاب شده پاداش گرفته و یا جریمه شده است، اتماتای یادگیر ساختار داخلی خود را بروز می‌کند و از این طریق اتماتای یادگیر سلولی رفتار خود را تصحیح مینماید. بعد از بروز شدن ساختار داخلی، هر اتماتای یادگیر در اتماتای یادگیر سلولی دوباره یک عمل از

این عمل تضمین می‌کند که بعد از مرحله واکنش مقدار سم هیچیک از سلولها بیشتر از ثابت اشباع نشود.

موازنی: این قاعده باعث می‌شود سم به صورت همگن در سلولها پخش شود. اگر سلول $C(i,j)$ دارای مقدار سم $E_{i,j}$, $S_{i,j}$, $N_{i,j}$ و $W_{i,j}$ در بخش‌های خود باشد در پایان این مرحله هر

$$\left[\frac{N_{i,j} + S_{i,j} + E_{i,j} + W_{i,j}}{4} \right] \text{ بخش سم خواهد داشت. باقیمانده}$$

این تقسیم به صورت تصادفی بین بخشها تقسیم می‌شود. شکل ۵ مثالی از این قاعده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- قاعده موازنی [۱]

- (الف) دو سلول قبل از موازنی
- (ب) دو سلول بعد از موازنی

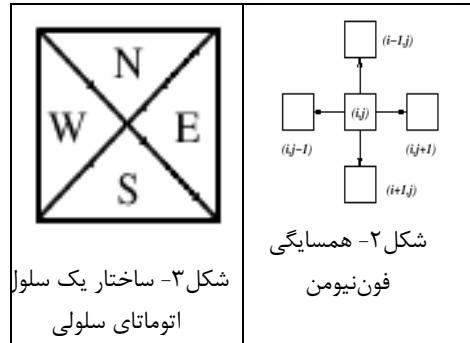
شکل ۴- قاعده واکنش [۱]

- (الف) دو سلول قبل از واکنش
- (ب) دو سلول بعد از واکنش

حرکت: در این مرحله آب به علت جاذبه زمین در بستر خاک نفوذ می‌کند. البته در حرکت آب عوامل دیگر نیز موثرند. در این مقاله حرکت آب در بستر خاک به این صورت تعریف می‌شود که آب همیشه سعی می‌کند به سمت پایین حرکت کند ولی اگر سلول زیری آن خالی نباشد ممکن است به دو طرف هم حرکت کند. هر گاه آب نتواند به پایین یا دو طرف حرکت کند یک گودال آب تشکیل می‌شود. حرکت آب دارای سه مرحله است. فرض می‌کنیم شناسه سلول $(j,i)c$ آب باشد.

مرحله ۱: در این مرحله هر سلول آب جهت حرکت خود را به صورت زیر انتخاب می‌کند.

- اگر $I_{i,j} = empty$ باشد $I_{i+1,j} = d$. یعنی اگر همسایه جنوبی خالی باشد آب سعی می‌کند به سمت پایین است.
- اگر دقیقاً یکی از همسایه‌های دو طرف آن خالی باشد فلگ متناظر (j,i,r) است می‌شود.



شکل ۳- ساختار یک سلول اتوماتی اسلولی

شکل ۲- همسایگی فون نیومون

قوانين بروزرسانی: این قوانین به سه نوع تقسیم می‌شوند که به ترتیب در هر مرحله بروزرسانی اعمال می‌شوند. این سه نوع قوانین عبارتند از: واکنش، موازنی و انتشار که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

واکنش: زمانیکه این قانون توسط یک سلول اجرا می‌شود برای آن سلول مقدار سم موجود در هر بخش با مقدار سم موجود در بخش متناظر در سلولهای همسایه موازنی می‌شود. به عنوان مثال اگر $(j,i)c$ شامل $p=N_{i,j}$ مقدار سم در بخش شمالی خود و همسایه شمالی اش $(j,i-1)c$ شامل $q=S_{i-1,j}$ مقدار سم در بخش جنوبی خود باشد، در

$$\left[\frac{p+q}{2} \right] \text{ سم خواهد بود. باقیمانده این}$$

تقسیم نیز به صورت تصادفی بین دو بخش تقسیم می‌شود (شکل ۴). این قانون بیانگر قانون موازنی در شیمی است. این قاعده به طور همزمان بر روی همه بخش‌های همه سلولهای اتوماتی یادگیر سلولی اعمال می‌شود. البته قانون هنگامی انجام پذیر است که دو سلول مجاور هر دو آب یا یکی آب و دیگری خاک باشد. دو سلول خاک مجاور نمی‌توانند در موازنی شرکت کنند. به همین دلیل است که سم تنها در سلولهای سطح خاک قرار دارد. بر روی سلولهای خالی نیز به دلیل این که نمی‌توانند حاوی سم باشند، این قانون اعمال نمی‌شود. یکی از پارامترهای این قانون ثابت اشباع می‌باشد که نشان‌دهنده ماکریم مقدار سمی است که می‌تواند در یک سلول آب یا خاک قرار گیرد. هرچه ثابت اشباع آب بیشتر باشد مقدار سم بیشتری می‌تواند در آن حل شود. این پارامتر بر حسب خواص شیمیابی سم و خاک تعیین می‌شود و به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته می‌شوند. افزودن این پارامتر قاعده واکنش را تا حدی تغییر می‌دهد. به این صورت که اگر $SC_{i,j}$ ثابت اشباع بخش $E_{i,j}$ و سلول $(j,i)c$ و $SC_{i,j+1}$ ثابت اشباع بخش $W_{i,j}$ سلول $(j,i+1)c$ و p و q مقدار سم این دو بخش باشد قاعده واکنش به صورت زیر در می‌آید:

$$\left[\frac{p+q}{2} \right] > SC_{i,j} \text{ در این صورت تعداد ذرات هر}$$

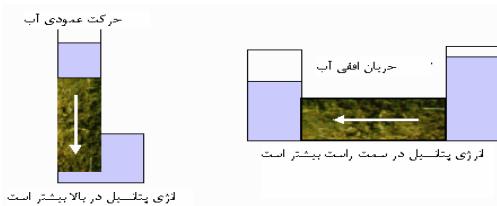
بخش بعد از واکنش به صورت زیر تغییر می‌کند $Wi,j+1=(p+q)-SC_{i,j}$ و $Ei,j=SC_{i,j}$

اتوماتای سلولی که شناسه آنها آب میباشدند به سلول خالی تبدیل شود. بدین طریق مقدار سمی که بستر را ترک میکند و بعداً به آبهای زیرزمینی وارد میشود محاسبه میشود. شبیهسازی میتواند تا خالی شدن بستر از آب بعد از آخرین افزودن آب ادامه پیدا کند.

۴- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی از اتماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی حرکت آب استفاده میشود. در این بخش ابتدا شبیه سازی حرکت آب در توسط اتماتای یادگیر سلولی که شبیه سازی دقیقتری از حرکت آب در خاک میباشد ارائه و سپس مدل پیشنهادی برای شبیه سازی نفوذ سوم شیمیایی در خاک شرح داد میشود.

شبیه سازی حرکت آب توسط اتماتای یادگیر سلولی: آب مانند هر شیء دیگری تمايل دارد از مكان دارای انرژی پتانسیل بیشتر به مكان دارای انرژی پتانسیل کمتر حرکت کند. به شکل ۶ توجه کنید. دو عامل در اختلاف پتانسیل دو مکان حاوی آب موثرند [۲،۳]: جاذبه زمین و خاصیت موئینگی^{۱۳} که خاصیت موئینگی خود از دو نیروی چسبندگی بین آب و ذرات خاک^{۱۴} و نیروی پیوستگی بین مولکولهای آب^{۱۵} حاصل میشود. نیروی جاذبه و خاصیت موئینگی همزمان با هم بر حرکت آب موثرند. خاصیت موئینگی موجب حرکت آب در هر جهتی میشود ولی نیروی جاذبه آب را به سمت پایین میکشند. هنگامی که خاک اشتعاب شد و دیگر تمايلی به جذب آب نداشت، نیروی جاذبه تنها نیروی موثر در حرکت آب است. در واقع این قواعد به ما اجازه میدهند که مشخص کنیم آیا آب قادر به حرکت است و در صورت حرکت به کدام جهت حرکت میکند.



شکل ۶- حرکت آب به دلیل اختلاف انرژی پتانسیل [۲]

برای شبیه سازی حرکت آب از یک اتماتای یادگیر سلولی استفاده شده است که هر سلول آب در آن مجهر به یک اتماتای یادگیر میباشد. یک شبکه از سلولهای داریم که هر کدام از سلولهای میتوانند نماینده آب، خاک و یا سلول خالی باشند و هر سلول آب در این شبکه مجهر به یک اتماتای یادگیر میباشد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد هر سلول آب یا خاک از ۴ بخش تشکیل شده و هر بخش میتواند حاوی مقداری سم باشد و همچنین نفوذ سوم شیمیایی در خاک شامل سه مرحله واکنش، موازنی و انتشار میباشد. دو مرحله واکنش و موازنی

- اگر هر دو همسایه کناری خالی باشند یکی به تصادف انتخاب و فلگ متناظر آن سمت میشود.

- در غیر این صورت آب نمیتواند حرکت کند و فلگی سمت نمیشود.
مرحله ۲: در این مرحله هر سلول خالی از بین سلولهای آبی که قصد دارند به این سلول حرکت کنند یکی را انتخاب میکند. اگر (i,j) یک سلول خالی باشد این انتخاب به صورت زیر انجام میگیرد:

- اگر $d_{i-1,j} = 1$ باشد. یعنی اولویت برای سلول آبی است که قصد دارد به سمت پایین بیاید.

- اگر تنها یکی از همسایه های کناری فلگ حرکت خود را سمت کرده باشد، برنده است و فلگ متناظر (i,j) سمت میشود.

- اگر هر دو همسایه کناری قصد حرکت به این سلول را داشته باشند به تصادف یکی از آنها انتخاب شده و فلگ متناظر با آن سمت میشود.

- در صورنیکه که هیچ همسایه ای قصد حرکت به این سلول را ندارد فلگی سمت نمیشود.

- مرحله ۳- حرکت واقعی آب در این مرحله صورت میگیرد. اگر (i,j) سلول آبی باشد که قصد حرکت دارد:

- اگر $d_{i,j} = 1$ و $u_{i+1,j} = c(i+1,j) = c(i,j)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر میشوند.

- اگر $d_{i,j} = 1$ و $u_{i,j-1} = c(i,j-1) = c(i,j)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر میشوند.

- اگر $d_{i,j} = 1$ و $u_{i+1,j} = c(i,j+1) = c(i,j)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر میشوند.

- در غیر این صورت سلول آبی به این سلول وارد نمیشود.
شبیه سازی: شبیه سازی با تخصیص بعضی از سلولهای اتماتا به خاک و نسبت دادن مقدار مشخصی سم به سلولهای خاک سطحی آغاز میشود. سپس آب اضافه میشود یعنی بعضی از سلولهای از نوع خالی به نوع آب تغییر پیدا میکنند. افزودن آب وابسته به شرایط جوی است که ممکن است یکی از موارد زیر باشد.

- باران شدید: شناسه کلیه سلولهای خالی ردیف اول اتماتای سلولی در هر مرحله بهنگام سازی اتماتای سلولی را آب قرار میدهیم.

- باران معمولی: انجام عمل فوق هر k مرحله یا به صورت تصادفی با احتمال p در هر مرحله

- سیل: شناسه کلیه سلولهای خالی اتماتای سلولی را در ابتدا برابر آب قرار میدهیم و بعد در هر مرحله بهنگام سازی یکی از دو قاعده ۵- فوق میتواند اعمال شود.

سلولهای آب در ابتدا حاوی سم نیستند. به آب اجازه داده میشود که بستر خاک را ترک کند. به این صورت که سلولهای ردیف انتهایی

که هر چه خاک مرتبطتر می‌شود اثر این نیرو کمتر می‌شود و زمانی که خاک اشباع می‌شود اثر این نیرو صفر می‌شود.

۲. عامل دوم پیوستگی بین ذرات آب است. اگر آب به مکانی برود که در همسایگی آن سلولهای آب قرار داشته باشند، پاداش می‌گیرد. میزان تاثیر این عامل با a_2 مشخص می‌شود.

$$a_2 = \rho_2 * waterCells$$

ρ_2 ضریب ثابتی است که میزان تاثیر این عامل را در برابر دو عامل دیگر مشخص می‌کند.

۳. عامل سوم نیروی جاذبه است. اگر آب به سمت پایین حرکت کند، جایزه می‌گیرد. میزان تاثیر این عامل با پارامتر a_3 مشخص می‌شود.

۴. یک نکته دیگر نیز مطرح است. طبق تحقیقات انجام شده [۵] آب تمایل دارد در بخش کوچکی از کل حجم موجود خاک حرکت کند. در اکثر خاکها بیشتر از ۸۰ درصد آب تنها در ۲۰ درصد عرض خاک نفوذ می‌کند. برای در نظر گرفتن این نکته به حرکت آب به سلولی که سلول زیرین آن خالی است جایزه می‌دهیم. میزان تاثیر این عامل را نیز با a_4 مشخص می‌کنیم.

در پایان مقدار $a_4 + a_3 + a_2 + a_1 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ را محاسبه می‌کنیم. اگر $a > a_4 + a_3 + a_2 + a_1$ باشد عمل پاداش می‌گیرد. میزان پاداش نیز برابر a است. را پارامتر پاداش می‌نامیم.

برای جلوگیری از ورود همزمان دو سلول آب به یک سلول خالی مرحله حرکت به سه زیرمرحله تقسیم می‌شود.

مرحله ۱: در این مرحله هر سلول آب جهت حرکت خود را به صورت زیر انتخاب می‌کند.

- اگر دقیقاً یکی از همسایه‌های دو طرف یا همسایه پایینی آن خالی باشد فلگ متناظر با آن همسایه است می‌شود.

- اگر دو تا از همسایه‌ها خالی باشند، با توجه به مثال زیر یکی از آنها انتخاب و فلگ آن ست می‌شود. به عنوان مثال اگر امکان حرکت به دو سلول شرقی و غربی به ترتیب با احتمالات p_1 و p_2 باشند، به دلیل این که امکان حرکت به همسایه پایینی وجود ندارد، دو عمل فوق را با احتمالات $\frac{p_3}{2} + p_1$ و $\frac{p_3}{2} + p_2$ متناظر می‌کنیم. حال با توجه به این دو احتمال را انتخاب و فلگ مربوط به آن را ست می‌کنیم.

- اگر هر سه همسایه خالی باشد با توجه به بردار احتمالات اعمال یکی از عملها انتخاب و فلگ متناظر با آن را ست می‌شود.

- در غیر این صورت آب نمی‌تواند حرکت کند و فلگی ست نمی‌شود.

دقیقاً مانند مدل اتوماتای سلولی انجام می‌شوند و مرحله انتشار به کمک اتوماتای یادگیر انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر سلولهای خالی و خاک مانند قبل عمل می‌کنند ولی هر سلول آب دارای یک اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر از نوع L_{RP} می‌باشد که با استفاده از آن در باره حرکت آب تصمیم گیری می‌شود. حرکت آب می‌تواند در سه جهت چپ، راست و یا پایین انجام شود. اگرچه خاصیت مؤینگی می‌تواند آب را به سمت بالا جذب کند ولی بدلیل اینکه جاری شدن آب در زمان بارندگی یا سیل را بررسی می‌کنیم، یک فشار خارجی بر مولکولهای آب اعمال می‌شود که مانع حرکت آنها به سمت بالا می‌شود. بنابراین اتوماتای یادگیر هر سلول آب دارای سه عمل $left$ ، $right$ ، $down$ ، up می‌باشد.

تعیین احتمال متناظر با هر عمل نیاز به بررسی دقیقتی دارد. اندازه حفره‌های خاک یکی از عوامل اصلی نحوه حرکت آب در خاک است. حفره‌های بزرگتر آب را سریعتر عبور می‌دهند. علت آن نیز این است که خاصیت مؤینگی در حفره‌های کوچک بسیار بیشتر است به طوری که در بعضی از خاکها مانند ماسه‌های نرم بر نیروی جاذبه غلبه می‌کند [۴,۵]. بنابراین بسته به نوع خاک این احتمالات به عنوان ورودی داده می‌شود. در هر مرحله بروزرسانی اتوماتای یادگیر سلول آب یکی از سه عمل $left$ ، $right$ ، $down$ ، up را با استفاده از بردار احتمالات اعمال خود انتخاب می‌کند. عمل انتخاب شده توسط محیط بررسی می‌شود. اگر این عمل باعث حرکت آب از مکان دارای انرژی پتانسیل بیشتر به مکان دارای انرژی پتانسیل کمتر شود پاداش می‌گیرد و در غیر این صورت جریمه می‌شود. به عبارت دیگر مجموعه پاسخهای محیط دوتایی است. $\beta_1 = 1$ به عنوان جریمه و $\beta_2 = 0$ به عنوان پاداش در نظر گفته می‌شود. بررسی مقدار انرژی پتانسیل شامل چهار قسمت به شرح زیر است.

۱. اگر یک سلول در همسایگی خود سلول یا سلولهای خاک سطحی داشته باشد که اشباع نشده‌اند، نیروی چسبندگی بین ذرات خاک و آب یک عامل جذب آب به این سلول می‌باشد. میزان تاثیر این عامل با پارامتر a_1 مستجدیده می‌شود. هر سلول سطح خاک یک متغیر دارد که با S نشان داده می‌شود. این متغیر برای مشخص کردن میزان رطوبت خاک به کار می‌رود. در ابتدا مقدار این متغیر صفر است. هر بار که یکی از سلولهای اطراف این سلول با آب پر می‌شود به این متغیر یک واحد افزوده می‌شود تا زمانی که به مقدار از پیش تعریف شده N برسد. ثابت اشباع خاک است. محاسبه a_1 به صورت زیر است:

$$a_1 = \sum_i \rho_1 \left(1 - \frac{Si}{N}\right)$$

۲. ضریب ثابتی است که میزان تاثیر این عامل را در برابر دو عامل خاصیت پیوستگی و جاذبه مشخص می‌کند. از فرمول فوق مشخص است

۶۴	۱۰
۱۹	۵

جدول ۱- اثر ثابت اشباع آب در میزان سم رسیده به آبهای زیرزمینی

فرایند نفوذ از خواص خاک نیز متاثر است. بعضی از انواع خاک مانند شن به راحتی آب را از خود عبور می‌دهد در حالیکه ماسه تمایل به جذب آب دارد. در شکل ۶ مقدار یکسانی آب به سه نوع خاک مختلف اعمال شده است. همان طور که مشخص است میزان نفوذ آب در این خاکها متفاوت است. در مدل پیشنهادی اگر احتمالات متناظر با حرکت آب به درستی انتخاب شود، این حقیقت به خوبی نشان داده می‌شود. به عنوان مثال برای شن باید احتمال اولیه حرکت آب به سمت پایین خیلی بیشتر از احتمال حرکت آب به طرفین باشد. زیرا خاصیت موئینگی در شن بسیار کم است. برعکس در ماسه خاصیت موئینگی زیاد است و باید احتمال حرکت به طرفین نیز قابل توجه باشد. شکل ۷ نتیجه شبیه‌سازی انجام شده بر روی یک نمونه خاک در مراحل مختلف شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در شکل ۷-الف احتمال اولیه حرکت به طرفین و پایین یکسان است اما در شکل ۷-ب احتمال اولیه حرکت به سمت پایین بوده است. در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در شکل ۷-ب آب عمق بیشتری را طی کرده است. بنابراین اثر نیروی جاذبه از اثر خاصیت موئینگی بیشتر بوده است. در حالیکه در شکل ۷-الف حرکت افقی آب بیشتر از شکل ۷-ب است. برای خاکهایی که خاصیت موئینگی زیادی ندارند مانند شن تقریباً بیش از ۸۰ درصد آب تنها در ۲۰ درصد عرض خاک نفوذ می‌کند که نتایج آزمایش‌های انجام گرفته ممید این واقعیت می‌باشد.

سه عامل اصلی در نفوذ سموم شیمیایی در خاک موثر است: خواص خاک، خواص سموم و شرایط جوی و مکانی. در ادامه به اختصار هر یک از این عوامل را شرح می‌دهیم [۷].

خواص خاک:

- توانایی خاک در حرکت عمودی آب.^{۱۶} مثلاً شن در مقابل ماسه خاک را سریعتر به پایین هدایت می‌کند. در مدل پیشنهادی این پارامتر با تعیین احتمالات حرکت آب در سه جهت افقی مختلف مشخص می‌شود. به عنوان مثال برای شن احتمال احتمال حرکت عمودی آب بیشتر از احتمال حرکت افقی می‌باشد.
- ترکیب و ساختار خاک: میزان فشردگی خاک، تعداد و اندازه حفره‌های آن در نحوه حرکت آب در خاک موثر است. ترکیب و ساختار به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود.
- میزان رطوبت خاک: هر چه خاک مرطوبتر می‌شود تمایل کمتری به جذب آب دارد تا زمانی که به حالت اشباع برسد. در این حالت دیگر تمایل به جذب آب ندارد. این پارامتر از طریق تعیین ثابت اشباع برای خاک مشخص می‌شود.

عمل انتخاب شده توسط محیط بررسی شده و پاداش یا جریمه می‌شود و سپس بردار احتمالات اعمال بر طبق الگوریتم یادگیری که قبل از بخش ۲ به آن اشاره شد بروز می‌گردد.

مرحله ۲: در این مرحله هر سلول خالی از بین سلولهای آبی که قصد دارند به این سلول حرکت کنند یکی را انتخاب می‌کند. این انتخاب بر اساس میزان پاداش عمل انتخاب شده توسط اتوماتای یادگیر سلولهای آب همسایه انجام می‌گیرد. مراحل کار به صورت زیر است:

- اگر تنها یکی از همسایه‌ها قصد ورود به این سلول را داشته باشد فلگ متناظر با آن سمت می‌شود و در غیر این صورت از بین سلولهای کاندید سلولی که عمل انتخابی آن پاداش بیشتری گرفته انتخاب شده و فلگ متناظر با آن سمت می‌شود.

- اگر هیچ همسایه‌ای قصد حرکت به این سلول را ندارد فلگی سمت نمی‌شود.

مرحله ۳: حرکت واقعی آب در این مرحله صورت می‌گیرد:

- اگر $i,j=1$ و $d_{i,j}=1$, $u_{i+1,j}=c(i+1,j)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر می‌شوند.

- اگر $i,j=1$ و $r_{i,j-1}=1$, $a_{i,j}=c(i,j)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر می‌شوند.

- اگر $i,j=1$ و $r_{i,j+1}=1$, $a_{i,j}=c(i,j+1)$ و همه پارامترهای $c(i,j)$ صفر می‌شوند.

- در غیر این صورت هیچ سلول آبی به این سلول وارد نمی‌شود.

ارزیابی مدل پیشنهادی

-۴

شبیه‌سازی نفوذ سموم شیمیایی با استفاده از مدل پیشنهادی بر روی نمونه‌های مختلف خاک انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای بسترها ای با ساختارهای متفاوت و نیز انواع مختلف سم موجود در خاک، مقدار سم رسیده به آبهای زیرزمینی با واقعیت تطابق دارد. به عنوان مثال هر چه قابلیت حل سم در آب بیشتر باشد، احتمال حل شدن آن در آب و در نتیجه رسیدن آن به آبهای زیرزمینی بیشتر است. در مدل پیشنهادی این امر با در نظر گرفتن یک ثابت اشباع بزرگ برای آب حاصل می‌شود. در جدول ۱ به ازاء مقادیر مختلف برای ثابت اشباع آب، میزان سمی که بعد از ۱۰۰ مرحله تکرار اتوماتای یادگیر سلولی بستر را ترک می‌کند نشان داده شده است. همان طور که مشخص است هر چه ثابت اشباع آب بزرگتر باشد مقدار سم بیشتری را در خود حل می‌کند.

میزان سم	ثبت اشباع آب (SC)
۸۶	۲۰

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر اوتوماتای یادگیر سلولی برای شبیه سازی اثرات سموم در خاک پیشنهاد گردید. نشان داده شد که شبیه سازی فرایند نفوذ سموم در خاک با استفاده از این مدل به واقعیت نزدیکتر میباشد.

مراجع

- [۱] Bandini, S. and Pavesi, G., "Simulation of Pesticide Percolation in the Soil Based on Cellular Automata", TTN/CAPP project, ۲۰۰۲.
- [۲] "Water Movement in Soils", soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html, access at ۸۳/۴/۲۴.
- [۳] Watson, J. Hardy, L. Cordell, T. Cordell, S. Minch, E. and C. Pachek, C., "How Water Moves Through Soil", *Cooperative Extension*, College of Agriculture, University of Arizona, September ۱۹۹۵.
- [۴] Anderson, A. and Gustafson, P., "Water Movement and Soil Treatment", www.onsiteconsortium.org/files/Video_Outline.pdf, ۱۸ October ۲۰۰۳.
- [۵] "Lecture Notes --Soil Water Part ۲", www.soils.umn.edu/academics/classes/soil%2015/doc/lec1bw.htm.
- [۶] Bowman, B. T. and Reynolds, W. D., "FAQ- Water Flow in Soils", resr.agr.gc.ca/london/faq/water-leau_e.htm.
- [۷] Buttler, T., Martinkovic, W. and Nesheim, O. N., "Factors Influencing Pesticide Movement to Ground Water", University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences (UF/IFAS), April ۱۹۹۸.
- [۸] "Movement of Pesticides in the Environment", A Pesticide Information Project of Cooperative Extension Offices of Cornell University, Oregon State University, extoxnet.orst.edu/tibs/movement.htm, access at ۸۳/۴/۲۴.
- [۹] Wolfram, S. Cellular Automata and Complexity, Perseus Books Group, ۱۹۹۴.
- [۱۰] Meybodi, M. R., Beigy, H. and Taherkhani, M. "Cellular Learning Automata and Its Applications", Journal of Science and Technology, University of Sharif, No. ۲۵, pp.۵۴-۷۷, Autumn/Winter ۲۰۰۳-۲۰۰۴.

- مواد آلی در خاک: بعضی از مواد آلی با نوع خاصی از سموم به شدت ترکیب شده و مواد جدید حاصل قابلیت حل خیلی کمی در آب دارند.

خواص سم:

- قابلیت حل: بعضی از سموم راحت‌تر از بقیه در آب حل می‌شوند. بنابراین با احتمال بیشتری به آبهای زیرزمینی می‌رسند. این عامل نیز با در نظر گرفتن ثابت‌های اشباع برای آب و خاک انجام شده است.

- فراریت: بعضی از انواع سموم به محض تماس با هوا سریعاً تبخیر می‌شوند. اگرچه خود این سموم به نحو دیگری موجب آلودگی محیط می‌شوند ولی در این جا مورد بحث قرار نمی‌گیرند.

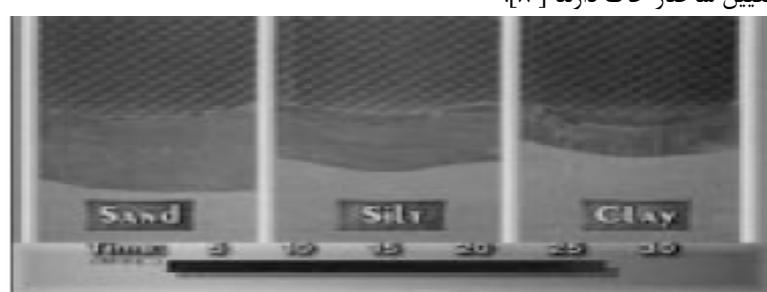
- طول عمر سم: سموم به تدریج تجزیه می‌شوند. سموم در اثر تجزیه به مواد بی ضرر مانند دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند.

شرایط جوی و مکانی:

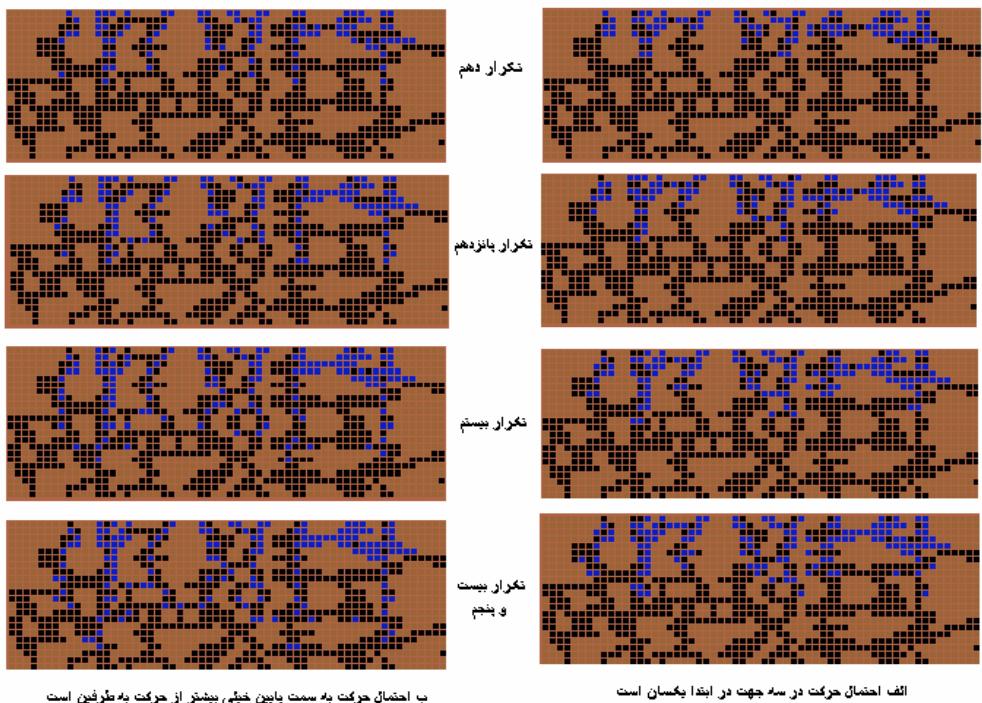
- شرایط جوی مانند میزان و شدت بارندگی بر میزان سموم رسیده به آبهای زیرزمینی موثر است. در مدل ارائه شده باران خفیف، باران شدید و سیل را شبیه‌سازی و اثر هر یک را بررسی کرده‌ایم.

- شرایط مکانی نیز مانند عمق آبهای زیرزمینی نیز عامل موثر دیگری است. عمق خاک نیز با تعیین تعداد سطرهای شبکه سلولی در مدل پیشنهادی مشخص می‌شود.

در مدل ارائه شده خواص سموم به ویژه طول عمر آنها مورد نظر قرار نگرفته است. سموم به تدریج تجزیه می‌شوند. بطور مثال اگر خاک نمناک و گرم باشد باعث می‌شود میکروبهای موجود در آن از ذرات سم به عنوان غذا استفاده کنند و آنرا به مواد بی ضرر تبدیل کنند. این امر یکی از مواردی است که می‌تواند در مدل پیشنهادی در نظر گرفته شود. یکی دیگر از مواردی که در نظر گرفته نشده است میزان مواد آلی خاک کمتری در آب حل می‌شوند. بنابراین هر چه میزان مواد آلی خاکی بیشتر باشد خطر کمتری دارد. این امر را نیز می‌توان با تغییر قاعده و اکتش در نظر گرفت. عامل دیگری که می‌توان در نظر گرفت نقش ارگانهای زنده موجود در خاک است. به عنوان مثال ریشه گیاهان تمايل دارند آب را در اطراف خود نگه دارند. همچنین حشرات و دیگر موجودات زنده دورن خاک نقش موثری در تعیین ساختار خاک دارند [۸].



شکل ۶- میزان نفوذ آب در خاکهای مختلف



شکل ۷- میزان نفوذ آب در خاک

Proceedings of the Second Iranian Conference on Machine Vision, Image Processing and Applications, KNU University, Tehran, Iran, pp. ۲۶۱-۲۷۰, ۲۰۰۳.

[۱۸] Rastegar, R. and Meybodi, M. R. "A New Evolutionary Computing Model based on Cellular Learning Automata", Proceedings of ۲۰۰۴ IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), pp. ۴۳۳-۴۳۴, Singapore ۱-۲ Dec. ۲۰۰۴

[۱۹] Rastegar, R., Hariri, A. and Meybodi, M. R. "A Fuzzy Clustering Algorithm Using Cellular Learning Automata based Evolutionary Algorithm", Proceedings of Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems(HIS'۰۴), pp. ۳۱۰-۳۱۴, Japan, Kitakyushu, Dec. ۲۰۰۴.

[۲۰] Rastegar, R., Rahmati, M. and Meybodi, M. R. "A CLA-EC based Clustering Algorithm", to appear in IEEE Conference in Advances Artificial Intelligence: Theory and Application (AISTA ۲۰۰۴), Luxembourg, October ۲۰۰۴.

[۲۱] Saheb Zamani, M., Mehdipour, F. and Meybodi, M. R. "Implementation of Cellular Learning Automata on Reconfigurable Computing Systems", IEEE CCGEI ۲۰۰۳ Conference, Montreal, Canada, May ۲۰۰۳.

[۲۲] Kharazmi, M. R. and Meybodi, M. R. "Application of Cellular Learning Automata to Image Segmentation", Proceedings of Tenth Conference on Electrical Engineering (۱۰th ICEE), University of Tabriz, Vol ۱, pp. ۲۹۸-۳۰۶, May ۲۰۰۲.

[۱۱] Beigy, H. and Meybodi, M. R. "A Mathematical Framework for Cellular Learning Automata", Advances in Complex Systems, Vol. ۷, Nos. ۳-۴, pp. ۲۹۵-۳۲۰, September/December ۲۰۰۴.

[۱۲] Beigy, H. and Meybodi, M. R. "A Self-Organizing Channel Assignment Algorithm: A Cellular Learning Automata Approach", Vol. ۲۶۹. of Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science, pp. ۱۱۹-۱۲۶, Springer-Verlag, ۲۰۰۳.

[۱۳] Meybodi, M. R. and Kharazmi, M. R. "Application of Cellular Learning Automata to Image Processing", Journal of Amirkabir, Vol. ۱۴, No. ۵۶A, pp. ۱۱۰۱-۱۱۲۶, ۲۰۰۴.

[۱۴] Meybodi, M. R. and Khojaste, M. R. "Application of Cellular Learning Automata in Modeling of Commerce Networks", in Proceedings of ۶th Annual International Computer Society of Iran Computer Conference CSICC۲۰۰۱, Isfahan, Iran, pp. ۲۸۴-۲۹۵, ۲۰۰۱.

[۱۵] Meybodi, M. R. and Mehdipour, F. "VLSI Placement Using Cellular Learning Automata", Journal of Modares, University of Tarbiat Modares, Vol. ۱۶, pp. ۸۱-۹۵, summer ۲۰۰۴.

[۱۶] Meybodi, M. R. and Taherkhani, M. "Application of Cellular Learning Automata to Modeling of Rumor Diffusion", in Proceedings of ۶th Conference on Electrical Engineering, Power and Water Institute of Technology, Tehran, Iran, pp. ۱۰۲-۱۱۰, May ۲۰۰۱.

[۱۷] Meybodi, M. R. and Kharazmi, M. R. "Image Restoration Using Cellular Learning Automata", in

- [۲۲] Kharazmi, M. R. and Meybodi, M. R. "An Algorithm Based on Cellular Learning Automata for Image Restoration", Proceedings of The First Iranian Conference on Machine Vision & Image Processing, University of Birjand, pp. ۲۴۴ – ۲۵۴, March ۲۰۱۱.
- [۲۳] Marchini, F. and Meybodi, M. R. "Application of Cellular Learning Automata to Image Processing: Finding Skeleton" ,Proceedings of The Third Conference on Machine Vision, Image Processing and Applications (MVIP ۲۰۰۵) University of Tehran, Tehran, Iran, pp. ۲۷۱- ۲۸۰, Feb. ۲۰۰۵.
- [۲۴] Najim, K. and Poznyak, A. S., editors, Learning automata: theory and application, Tarrytown, New York: Elsevier Science Publishing Ltd., ۱۹۹۴.
- [۲۵] Mars, P., Chen, J. R. and Nambiar, R. Learning algorithms theory and applications in signal processing, control and communications, CRC Press, ۱۹۹۷.
- [۲۶] Narendra, K. S. and Thathachar, M. A. L. Learning Automata: An Introduction, Prentice Hall, ۱۹۸۹.
- [۲۷] Lakshmivarahan, S. Learning algorithms: Theory and Applications, New York: Springer-Verlag, ۱۹۸۱.
- [۲۸] Thathachar, M. A. L. and Sastry, P. S. "Varieties of Learning Automata: An Overview", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. ۲۲, No. ۶, pp. ۷۱۱-۷۲۲, ۲۰۰۲.

' Bandini
 ^ Pavesi
 ^ Cellular Automata
 ^ Learning Automata
 ^ Finite State Machine
 ^ Variable structure
 ^ Linear reward penalty
 ^ Linear reward epsilon penalty
 ^ Linear reward inaction
 ^ Cellular Learning Automata
 ^ Bandini
 ^ Pavesi
 ^ Capillary force
 ^ Adhesion
 ^ Cohesion
 ^ Permeability