

بررسی نحوه‌ی شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها به کمک روش اتومات سلولی (مورد خاص: شیروانی کیلومتر ۳۲ بزرگراه جم - طاهری)

احمد فهیمی فر (استاد)

سمانه امیرپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشگاه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

اتومات سلولی روشی توانمند برای شبیه‌سازی سیستم‌های طبیعی و مصنوعی است که به صورت اندرکنش اجزای تشکیل‌دهنده‌شان قابل بیان‌اند. بعضی از انواع زمین‌لغزه‌ها مانند جریان واریزه و بهمین واریزه‌ها به خوبی با این شرایط سازگارند و می‌توان آن‌ها را به صورت سیستم‌های دینامیکی تقسیم‌پذیر به اجزای تشکیل‌دهنده و قابل توصیف به صورت اندرکنش بین این اجزا در نظر گرفت. هدف از این تحقیق ارائه‌ی مدلی برای شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها براساس روش اتومات سلولی و به کمک کد MATLAB است. در این مدل ویژگی‌های زمین‌لغزه‌های پرسرعت و اثر برخورد توده‌ها در نظر گرفته شده است. درستی عملکرد این مدل با شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری به صورت یک بعدی و دوبعدی مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که سطح لغزش شبیه‌سازی شده، انطباق نزدیکی با واقعیت دارد.

واژگان کلیدی: اتومات سلولی، زمین‌لغزه، جریان واریزه، MATLAB.

مقدمه

«اتومات سلولی (CA)» ابزار قدرتمندی برای مدل‌کردن سیستم‌های طبیعی و مصنوعی است که به صورت اندرکنش محلی بین اجزای تشکیل‌دهنده‌شان قابل توصیف‌اند. اتومات‌های سلولی از دو قسمت فضای سلولی و قانون انتقال تشکیل شده‌اند. فضای سلولی شبکه‌ی منظم از سلول‌هایی است که هرکدام از آن‌ها براساس الگویی ثابت و یکسان با بعضی از سلول‌های مجاور خود در ارتباط‌اند. پیچیدگی رفتاری این سیستم‌ها ناشی از اندرکنش بین سلول‌هاست که براساس قانون انتقال صورت می‌گیرد.^[۱] بعضی از حالت‌های زمین‌لغزه مانند جریان واریزه^۲ها را می‌توان سیستمی پویا تلقی کرد که در بخش محدودی از فضا گسترش یافته است، و سپس به کمک اتومات سلولی (CA) آن را شبیه‌سازی کرد. در این حالت محدودی وقوع زمین‌لغزه به صورت مجموعه‌ی از سلول‌ها با شکل یکسان (چهارضلعی یا شش‌ضلعی) شبکه‌بندی می‌شود. وضعیت هر سلول نشان‌دهنده‌ی خصوصیات فیزیکی جزئی از فضای متناسب با آن است و از زیروضعیت^۳هایی مانند ارتفاع، عمق پوشش خاک، ضخامت واریزه و انرژی زمین‌لغزه تشکیل شده است. با اعمال هم‌زمان تابع انتقال بر روی تمام سلول‌ها، درگام‌های مجزا، وضعیت‌ها تغییر می‌یابند و پیشروی پدیده شبیه‌سازی می‌شود. در ابتدای شبیه‌سازی باید مقادیری برای ابعاد سلول‌ها و زمان متناسب با گام‌های CA در نظر گرفت. این مقادیر پارامترهایی کلی‌اند که در طول شبیه‌سازی ثابت‌اند و برای تمامی سلول‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شوند

مدل SCIDDICA S_{۲۰} یک مدل دوبعدی با شبکه‌بندی شش‌ضلعی است که

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۱/۲۱، اصلاحیه ۱۳۸۸/۸/۱۳، پذیرش ۱۳۸۹/۷/۵.

جدول ۱. لیست زیروضعیت‌های استفاده‌شده در الگوریتم.

زیر وضعیت	تعریف
Q_z	ارتفاع سلول (متر)
Q_h	ضخامت زمین‌لغزه (متر)
Q_r	عمق سنگ پوش قابل فرسایش (متر)
Q_o^y	جریان‌های خروجی زمین‌لغزه (متر)
Q_E	انرژی زمین‌لغزه (متر مربع)
Q_{py}, Q_{px}	مؤلفه‌های گشتاور زمین‌لغزه در امتداد جهت‌های x و y

مقیاس نقشه‌های در دسترس، خصوصیات ریخت‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه، توپوگرافی منطقه‌ی تحت تأثیر و همچنین محدودیت‌های محاسباتی انتخاب شوند. به‌منظور ایجاد ماتریس‌های ورودی اطلاعات زیر مورد نیاز است:

- توپوگرافی قبل از وقوع زمین‌لغزه؛
- سرچشمه‌ی زمین‌لغزه از نظر موقعیت و گستردگی (محل شروع رانش و گستردگی سطح برش در تاج لغزش)؛
- ضخامت سنگ‌پوش قابل فرسایش قبل از وقوع زمین‌لغزه.

این اطلاعات تأمین‌کننده‌ی مقادیر مربوط به زیروضعیت‌های Q_r, Q_h, Q_z است. زیروضعیت‌های باقی‌مانده (Q_{py}, Q_o, Q_E, Q_{px}) در ابتدا صفر در نظر گرفته می‌شوند (سرعت لغزش خاک در گام $t = 0$ برابر صفر است).

p_t نشان‌دهنده‌ی زمان متناسب در هر گام است. این مقدار اگر بزرگ انتخاب شود باعث نقض قانون بقای جرم، و ایجاد خطا می‌شود؛ در نظر گرفتن مقادیر کوچک برای این پارامتر باعث می‌شود که مقدار جریان‌های خروجی واریزه بین سلول‌ها بعد از چند مرحله بسیار کوچک باشد و سبب توقف زود هنگام شبیه‌سازی شود. اساساً این پارامتر بر سرعت اجرای شبیه‌سازی تأثیرگذار است به طوری که می‌تواند اجرای شبیه‌سازی را کند یا تند کند. بازه‌ی انتخابی در الگوریتم ارائه‌شده با توجه به این موارد و مشاهداتی نتایج شبیه‌سازی انتخاب شده است. همچنین از آن‌جا که پارامترهای p_{ef} و p_{et} که در محاسبه‌ی فرسایش سنگ پوش کاربرد دارند پارامترهایی تجربی‌اند، نمی‌توان آن‌ها را به‌طور مستقیم به دست آورد. به این منظور با توجه به خصوصیات کلی پدیده و مقادیر پارامترهای دیگر، بازه‌ی برای این‌گونه پارامترها در نظر می‌گیریم. سپس نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با مقادیر موجود در بازه را با رفتار پدیده‌ی اصلی مقایسه می‌کنیم. در نتیجه مقدار نهایی که برای این پارامترها در نظر گرفته می‌شوند، مقدار بهینه‌ی این پارامترها در بازه‌ی مورد نظر است که شبیه‌سازی بهتر پدیده را برای مدل ممکن می‌سازد. همان‌طور که وضعیت هر سلول می‌تواند بین زیروضعیت‌ها تقسیم شود، تابع انتقال هم می‌تواند به چندین مرحله‌ی مقدماتی تقسیم شود. در الگوریتم ارائه‌شده تابع انتقال شامل مراحل مقدماتی زیر است: [۹]

σ_1 : فرسایش سنگ‌پوش؛

σ_2 : محاسبه‌ی کمیته‌سازی جریان خروجی واریزه؛

σ_3 : پایستاری جرم انرژی و مومنتوم؛

σ_4 : اتلاف انرژی.

مراحل مقدماتی، همسایگی هر یک از سلول‌ها را درگیر می‌کنند. همسایگی CA توسط اجتماع سلول‌های همسایه‌یی که در هر یک از مراحل شرکت می‌کنند، مشخص می‌شود. در این تحقیق همسایگی‌ها مطابق شکل ۱ تعریف شده است. [۱]

توضیحات مربوط به مراحل مقدماتی در ادامه آورده شده است.

در آن اثرات اینرسی نیز در نظر گرفته شده و با توسعه‌ی فزاینده‌ی مدل‌های ساده‌شده‌ی اولیه به دست آمده است. [۷] بعد از ارائه‌ی این مدل، موشکافی‌های بیشتر باعث به‌وجود آمدن مدل SCIDDICA S_{fb} شد که مبین روشی ساده‌تر برای محاسبه‌ی اثرات اینرسی است. [۸] در نهایت مدل SCIDDICA S_{fc} ارائه شد که در آن یکی دیگر از خصوصیات جریان‌های پرسرعت یعنی تأثیر برخورد توده‌ها نیز مدل‌سازی شده است. [۹]

با توجه به مدل‌های اتومات سلولی ذکرشده، برنامه‌ی رایانه‌یی به زبان برنامه‌نویسی MATLAB تهیه شد و صحت عملکرد آن با مدل‌سازی زمین‌لغزه‌ی جَم - طاهری (بهنم واریزه) به صورت یک‌بعدی و دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. زمین‌لغزه‌ی مورد نظر در این الگوریتم به صورت فرسایش سنگ‌پوش در طول مسیر زمین‌لغزه در نظر گرفته شده است. همچنین این الگوریتم قادر است تأثیرات اینرسی و برخورد توده‌ها را که در شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها با سرعت بالا مؤثرند، مدل‌سازی کند. از آنجا که زمین‌لغزه‌ی انتخاب‌شده سرعت بالایی دارد، می‌توان تأثیر این دو عامل را در بهبود نتایج شبیه‌سازی به خوبی مشاهده کرد. در ادامه بخش‌های مختلف اتومات سلولی مورد استفاده در برنامه بیان شده است. سپس نتایج مدل‌سازی زمین‌لغزه‌ی جَم - طاهری در سه حالت مختلف آورده شده و کارایی برنامه مورد بررسی قرار گرفته است.

الگوریتم کلی اتومات سلولی مورد استفاده برای

شبیه‌سازی زمین‌لغزه

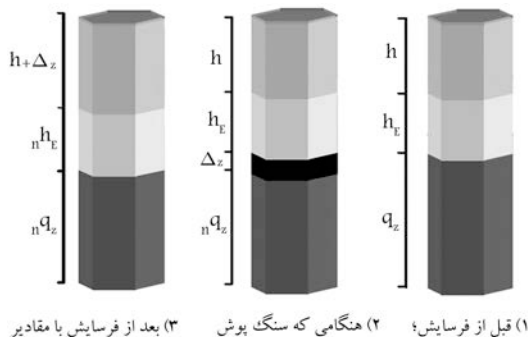
پدیده‌ی جریان سطحی، مثل جریان توده‌ی متراکم سنگ‌ها، در ابعاد بزرگی اتفاق می‌افتد. [۱۰] هنگام شبیه‌سازی این پدیده، ضروری است بین سیستم و توسعه‌ی آن از یک طرف، و مدل و شبیه‌سازی‌های آن از طرفی دیگر تناظر و ارتباط یک‌به‌یک تعریف کنیم. به این منظور منطقه‌ی محدودی را که پدیده در آن کامل می‌شود به کمک مجموعه‌ی از سلول‌های مربعی (چهارضلعی) یا شش‌ضلعی شبکه‌بندی می‌کنیم. معمولاً شبکه‌بندی مربعی برای مدل‌سازی‌های سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در فازهای ابتدایی توسعه و انتشار زمین‌لغزه، یا در اولین تحلیل‌ها کاربرد دارد. از آن‌جا که در شبکه‌بندی شش‌ضلعی جهت‌های جریان بیشتری ممکن می‌شود، از دقت بالاتری نسبت به شبکه‌بندی مربعی برخوردار است، و از آن هنگامی استفاده می‌شود که دقت بالایی مورد نیاز است. [۱۱] در این تحقیق از سلول‌های شش‌ضلعی در محدوده‌ی زمین‌لغزه استفاده شده است. وضعیت هر سلول باید تمام خصوصیات مفروض مربوط به تکامل سیستم را در برگیرد. هر مشخصه متناسب با یک زیروضعیت است که مقادیر مجاز برای هر یک از این زیروضعیت‌ها باید از مجموعه‌ی محدودی باشد. مجموعه‌ی وضعیت‌های ممکن هر سلول توسط سری کارترزین مجموعه‌ی زیروضعیت‌ها بیان می‌شود. [۱۱] لیست زیروضعیت‌های مورد استفاده در این الگوریتم در جدول ۱ آورده شده است.

در ادامه، ابعاد سیستم و زمان متناسب با گام‌های CA نیز باید مشخص شود. این دو مقدار به‌عنوان پارامترهای کلی در نظر گرفته می‌شوند و مقادیر آن‌ها برای تمام سلول‌ها برابر است (پارامترهای کلی دیگری نیز معمولاً برای شبیه‌سازی ضروری است). از این پارامترها در تابع انتقال استفاده می‌شوند و لیست آنها در جدول ۲ آورده شده است.

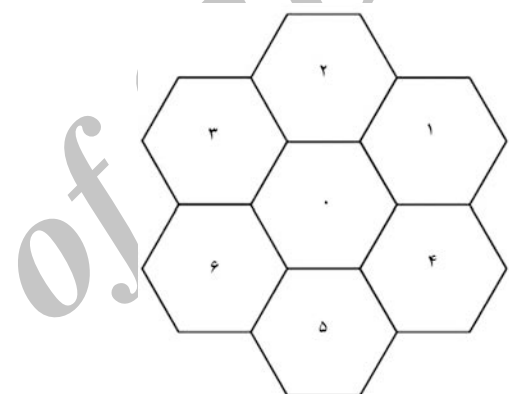
با در نظر گرفتن شکل اولیه‌ی CA مجموعه ماتریس‌های ورودی، مقادیر پارامترها نیز مورد نیاز است. جزئیات ماتریس ورودی و اندازه‌ی سلول‌ها باید با توجه کافی به

جدول ۲. لیست پارامترهای استفاده شده در الگوریتم.

پارامتر	تعریف
p_t	زمان مطابق با یک گام CA (ثانیه)
p_c	این مقدار طوری در نظر گرفته شده است که میزان تغییرات ارتفاع سنگ بست، واریزه و سنگ پوش در هر سلول ناچیز باشد و بتوان مقدار ثابتی را برای این وضعیت ها در هر سلول در نظر گرفت
p_{dN}	مربوط به اتلاف انرژی در هر گام (بدون بعد)
p_{adh}	چسبندگی، ضخامتی از واریزه است که نمی تواند سلول را ترک کند (متر)
p_f	آستانه‌یی برای جریان‌های خروجی واریزه (متر)
p_{et}	آستانه‌ی فعالیت برای فرسایش سنگ پوش (متر مربع)
p_{pef}	ضریبی برای فرسایش تدریجی (متر مربع ^{-۱})



شکل ۲. فرسایش سنگ پوش. (۱) قبل از فرسایش؛ (۲) هنگامی که سنگ پوش فرسایش یافته و q_z تغییر کرده است؛ (۳) بعد از فرسایش با مقادیر جدید q_h و q_r .



شکل ۱. سلول مرکزی؛ (۱-۶) سلول‌های همسایه.

σ_2 (کمینه‌سازی جریان خروجی واریزه): جریان خروجی از سلول مرکزی به سلول‌های همسایه با اعمال الگوریتم کمینه‌سازی تفاوت‌ها محاسبه می‌شود. [۴] این جریان‌های خروجی کمینه‌شده به منظور از بین بردن شرایط غیر متعادل در بافت همسایگی سلول‌ها و ایجاد شرایط متعادل هیدرواستاتیکی در هر گام محاسبات به کار می‌رود. به منظور تأکید بر اثرات برخورد توده‌ها و اینرسی در واریزه‌ها با سرعت بالا و بهمین‌ها، در این مرحله مفاهیم مربوط به اندازه حرکت واریزه در داخل سلول‌ها در نظر گرفته شده است. الگوریتم کمینه‌سازی عبارت است از:

ابتدا به منظور در نظر گرفتن اصطکاک قبل از اعمال الگوریتم کمینه‌سازی، باید مورد زیر را کنترل کنیم:

$$u(\circ) + m - u(i) < p_f \quad (6)$$

به سلول مرکزی مقدار غیر قابل حرکت $u(\circ)$ و مقدار قابل توزیع m را نسبت می‌دهیم. این مقادیر چنین به دست می‌آیند:

$$m = q_h(\circ) - p_{adh} \quad (7)$$

$$u(\circ) = q_z(\circ) + p_{adh} + w(\circ) \quad (8)$$

محتوای سلول‌های همسایه $u(i)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) که غیر قابل توزیع‌اند مطابق

σ_1 (فرسایش سنگ پوش): این مرحله به منظور محاسبه‌ی میزان فرسایش بخشی از سنگ پوش در طول مسیر در نظر گرفته شده است. میزان فرسایش سنگ پوش متناسب با انرژی توده‌ی متحرک است. به عبارت دیگر، با توجه به خصوصیات پویای واریزه در جریان، ممکن است مقدار متناسبی از سنگ پوش فرسایش یابد و می‌توان آن را گام به گام شبیه‌سازی کرد. هنگامی که انرژی واریزه (q_E)، بر آستانه‌ی در نظر گرفته شده (p_{et}) غلبه کند و هد انرژی جنبشی بیشتر از صفر باشد، ممکن است فرسایش سنگ پوش صورت بگیرد. مقدار عمق فرسایش یافته (Δz) مطابق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\Delta z = \min(q_r, q_E, p_{pef}) \quad (1)$$

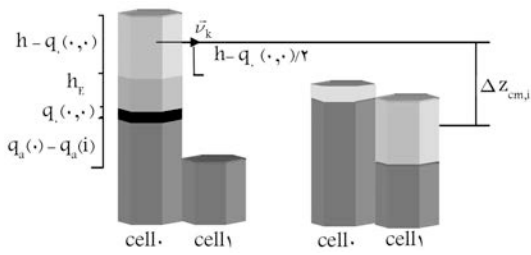
در غیر این صورت $\Delta z = 0$ ، و سپس مقادیر q_r, q_h, q_r, q_z چنین تغییر می‌کند (شکل ۲):

$$nq_z = q_z - \Delta z \quad (2)$$

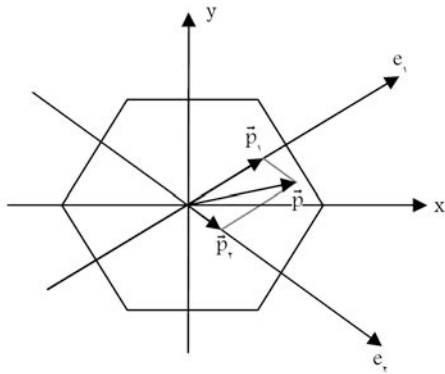
$$nq_r = q_r - \Delta z \quad (3)$$

$$nq_h = q_h + \Delta z \quad (4)$$

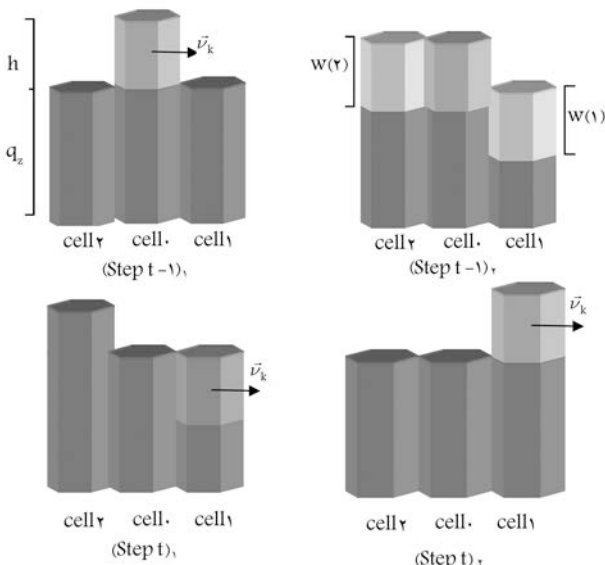
$$nq_E = q_E + \rho g A \Delta z (h + \frac{\Delta z}{\gamma}) \quad (5)$$



شکل ۳. حرکت عمودی توده با سرعت شروع شونده (v_s) . در گام $t+1$ توده در سلول همسایه بوده، با سرعت ورود v_a .



شکل ۴. بردار \vec{p} به صورت جمع دو بردار p_1 و p_2 ، که در امتداد e_1 و e_2 هستند، بیان می شود.



شکل ۵. تأثیر اینرسی در جابه جایی توده با ضخامت h و سرعت v_k در امتداد یک سطح.

فرمول های $\vec{v}_{k2} = \frac{\vec{p}_2}{\rho Ah}$ و $\vec{v}_{k1} = \frac{\vec{p}_1}{\rho Ah}$ به دست می آید. در نتیجه هد انرژی جنبشی مرتبط با آنها به صورت $\vec{h}_{k2} = v_{k2}^2 / 2g$ و $\vec{h}_{k1} = v_{k1}^2 / 2g$ به دست می آید.^[۷]

برای در نظر گرفتن تأثیر اینرسی مقدار w را به سلول های همسایه اضافه می کنیم (شکل ۵)، به طوری که ارتفاع سلول هایی که در راستای \vec{p}_1 و \vec{p}_2 هستند کاهش و ارتفاع سلول هایی که در خلاف راستای \vec{p}_1 و \vec{p}_2 هستند افزایش می یابد. ارتفاع بقیه ی

رابطه ی ۹ به دست می آید.

$$u(i) = q_z(i) + q_h(i) + w(i) \quad (9)$$

نحوه ی به دست آوردن مقادیر $w(i)$ ، $w(0)$ ، در ادامه آورده شده است. سلول های همسایه یی که شرط ۱ در مورد آن ها صدق نمی کند حذف می شوند. ارتفاع متوسط برای سلول های حذف نشده چنین به دست می آید:

$$average = \frac{m + \sum u(i)}{A} \quad (10)$$

A مجموع سلول های حذف نشده است. سلول هایی که ارتفاع شان $(u(i))$ ، بزرگ تر از ارتفاع متوسط باشد، از مجموعه ی A حذف می شوند.

مجدداً الگوریتم به مرحله ی ۵ برمی گردد تا زمانی که هیچ سلولی حذف نشود. مقدار جریان خروجی از سلول مرکزی به سلول های همسایه به صورت زیر به دست می آید.

$$q(i) = average - u(i) \quad (i \in A) \quad \text{اگر}$$

$$q(i) = 0 \quad \text{در غیر این صورت} \quad (11)$$

σ_2 (پایستاری جرم، انرژی، گشتاور): بعد از تعیین جریان های خروجی کمیته شده، مقدار دقیق جریان های واریزه که می تواند بین سلول ها در یک گام محاسباتی حرکت کند محاسبه می شود. سپس مقدار جدید واریزه، انرژی و گشتاور برای هر سلول محاسبه می شود:

$$f(o, i) = q_o(o, i) \frac{v(o, i) p_t}{2 p_c} = q_o(o, i) \frac{\Delta s}{2 p_c} \quad (12)$$

$\Delta s = v(o, i) p_t$ میزان جابه جایی جریان بین دو سلول است و $2 p_c$ بیشینه جابه جایی است که جریان می تواند در یک گام داشته باشد. $v(o, i)$ سرعتی است که i امین جریان خروجی کمیته شده دارد و آن را به صورت میانگین سرعت شروع شونده (v_s) و سرعت ورود جریان (v_a) در نظر می گیریم.

$$v(o, i) = \frac{v_s + v_a}{2} \quad (13)$$

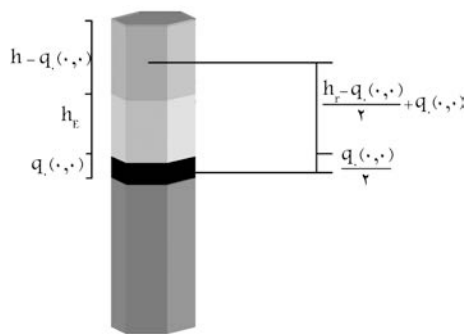
$$v_a = \sqrt{2g \Delta z_{cm, i}} \quad (14)$$

با توجه به شکل ۳ مقدار $\Delta z_{cm, i}$ چنین به دست می آید.

$$\Delta z_{cm, i} = q_z(o) - q_z(i) + q_o(o, o) - h_E(o) \quad (15)$$

$$v_s = \frac{|\vec{p}|}{\rho Ah} \quad (16)$$

\vec{p} جمع دو بردار p_1 و p_2 است که در شکل ۴ نشان داده شده است. هنگامی که جریان واریزه با سرعت زیاد را در نظر می گیریم، بعضی از جهت های مربوط به گشتاور واریزه، \vec{p} ، به منظور در نظر گرفتن خصوصیت اینرسی مقدم شمرده می شود. گشتاور را می توان به صورت مؤلفه های آن در یک سیستم مختصات قائم و با مبدأ در مرکز سلول بیان کرد. سرعت جریان به کمک فرمول $\vec{v}_k = \vec{p} / \rho Ah$ به دست می آید. به نوعی دیگر می توان بردار \vec{p} را به صورت جمع دو مؤلفه ی \vec{p}_1 و \vec{p}_2 در امتداد e_1 و e_2 در نظر گرفت. این جهت ها عمود بر ضلع دو سلول همسایه ی سلول مرکزی هستند. جهت های \vec{p}_1 و \vec{p}_2 معرف دو جهت مقدم در یک فضای سلولی شش ضلعی اند. سرعت های \vec{v}_{k2} و \vec{v}_{k1} در امتداد جهت های e_2 و e_1 توسط



شکل ۷. نحوه‌ی به دست آوردن $z_{cm, q_o}(i, 0)$ و $z_{cm, h_r} - q_o(i, 0)$.

بعد از محاسبه‌ی $v(i, 0)$ ، وضعیت‌های هر سلول را به‌روز می‌کنیم. محتوای جدید واریزه در هر سلول چنین به دست می‌آید:

$$n q_n = q_h + \sum_{i=1}^6 (f(i, 0) - f(0, i)) \quad (23)$$

انرژی جدید واریزه در هر سلول عبارت است از:

$$n q_E = q_{E, h_r} + \sum_{i=1}^6 q_{E, f(i, 0)} \quad (24)$$

q_{E, h_r} انرژی مربوط به واریزه‌ی باقی‌مانده در سلول و $q_{E, f(i, 0)}$ انرژی مربوط به جریان‌های واریزه‌ی ورودی است. روش محاسبه‌ی q_{E, h_r} عبارت است از:

$$q_{E, h_r} = \rho g A q_o(i, 0) z_{cm, q_o}(i, 0) + \rho g A (h_r - q_o(i, 0)) z_{cm, h_r} - q_o(i, 0) \quad (25)$$

$z_{cm, h_r} - q_o(i, 0)$ و $q_o(i, 0)$ ارتفاع مرکز ثقل واریزه‌ی بدون حرکت، ارتفاع مرکز ثقل واریزه‌ی متحرک است (شکل ۷). $q_{E, f(i, 0)}$ چنین محاسبه می‌شود:

$$q_{E, f(i, 0)} = \rho g A f(i, 0) z_{cm, f(i, 0)} \quad (26)$$

$z_{cm, f(i, 0)}$ ارتفاع مرکز ثقل هریک از جریان‌های ورودی نسبت به ارتفاع سلول مرکزی است. سپس سرعت هریک از جریان‌های ورودی به سلول مرکزی محاسبه می‌شود.

$$v_{kf(i, 0)} = \sqrt{2g \Delta z_{cmf(i, 0)}} \quad (27)$$

$\Delta z_{cmf(i, 0)}$ اختلاف ارتفاع مرکز سطح جریان ورودی قبل و بعد از توزیع است. σ_4 (اتلاف انرژی): در این مرحله اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک در توده‌ی متحرک محاسبه می‌شود. در این قسمت اتلاف انرژی را متناسب با مؤلفه‌ی نرمال وزن نسبت به زمین در نظر می‌گیریم. این سازوکار با به‌روز کردن سرعت چنین اعمال می‌شود:

$$n v = v - p_{dN} h \quad (28)$$

مطالعه‌ی موردی: زمین لغزه‌ی جم - طاهری

مسیر بزرگراه جم - بندر طاهری در کنار خلیج فارس منطقه‌ی بی‌طول حدوداً ۳۵ کیلومتر پیش‌بینی شده که بسته به شرایط توپوگرافی شامل تونل‌های متعدد، پل‌های بزرگ و کوچک و احداث ترانشه‌های با افراز متوسط تا بلند است. بخش جنوبی

سلول‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. به این طریق الگوریتم کمینه‌سازی برای توزیع واریزه سلول‌هایی را مقدم در نظر می‌گیرد که ارتفاع‌شان کاهش یافته است. به این ترتیب تأثیر اینرسی در اتومات سلولی لحاظ می‌شود. با اعمال الگوریتم کمینه‌سازی همراه با در نظر گرفتن شیب فرضی، تمامی توده به سلول مجاور منتقل می‌شود.^[۸] مقدار w ناشی از اینرسی سلول‌های همسایه در الگوریتم کمینه‌سازی در راستای e_1 و e_2 ، چنین به دست می‌آید:

$$w(i) = -h_{k1} \quad (17)$$

(i) شاخص سلول همسایه در راستای \vec{p}_1 است.

$$w(\gamma - i) = h_{k1} \quad (18)$$

($\gamma - i$) شاخص سلول همسایه در خلاف راستای \vec{p}_1 است.

$$w(i) = -h_{k2} \quad (19)$$

(i) شاخص سلول همسایه در راستای \vec{p}_2 است.

$$w(\gamma - i) = h_{k2} \quad (20)$$

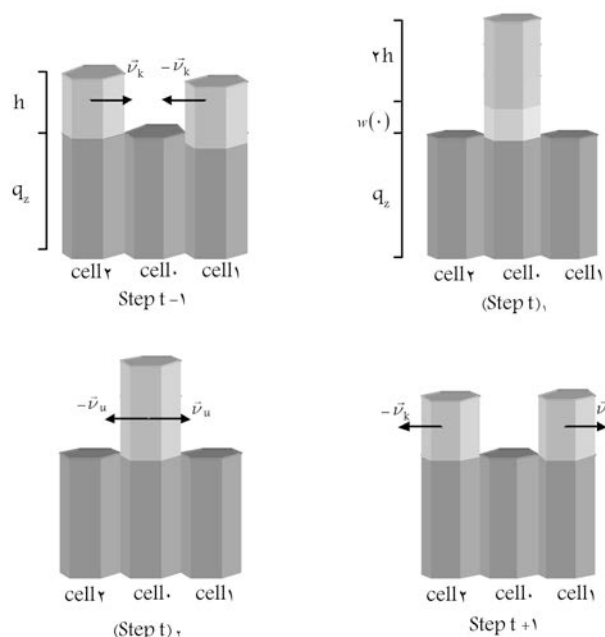
($\gamma - i$) شاخص سلول همسایه در خلاف راستای \vec{p}_2 است.

$$w(i) = w_{\gamma - i} = 0 \quad (21)$$

(i) و ($\gamma - i$) شاخص سلول‌های همسایه در جهت‌های باقی‌مانده است.

هنگامی که جریان‌های واریزه از جهات مختلف به هم نزدیک می‌شوند (در فضای سلولی شش ضلعی زاویه‌ی بین این جهات $\pi/3$ است)، تأثیر برخورد کشسان با در نظر گرفتن $w(0)$ (شکل ۶) به‌صورت رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود:^[۹]

$$w(0) = h_u = h_E - h_k \quad (22)$$



شکل ۶. برخورد دو توده با ضخامت h و سرعت v_k در جهت مخالف هم.

پنجه‌ی لغزش مورد بررسی در روی مسیر جاده و در باند برگشت قرار گرفته، که منجر به بالازدگی در حد چند متر در محدوده‌ی ترانسه شده است. در ترانسه‌ی کوتاه پائین دست مسیر و در کف رودخانه آثاری از جابه‌جایی و بالازدگی مشاهده نمی‌شود و در نتیجه می‌توان پنجه‌ی لغزش را به کف جاده محدود کرد.

شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری بر پایه‌ی اتومات سلولی (یک بعدی و دوبعدی)

در این قسمت با توجه به الگوریتم‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها، برنامه‌ی رایانه‌ی به زبان برنامه‌نویسی MATLAB تهیه شده است. برای شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری به صورت یک بعدی، در ابتدای برنامه (گام $t = 0$) مقادیر اولیه‌ی زیروضعیت‌ها به صورت ماتریس‌های 3×29 (سطر و ۳ ستون)، و نیز مقادیر پارامترهایی که در این الگوریتم استفاده شده‌اند به صورت ورودی به برنامه داده می‌شوند (شکل ۹).

در جدول ۳ مقادیر پارامترهای مربوط به زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری، با توجه به فرمول‌های ارائه شده در جدول ۲، ارائه شده است. شکل ۱۰ مقطع شمانیک زمین لغزش جم - طاهری، مقطع $(32+750)$ را با توجه به مشاهدات صحرایی در منطقه نشان می‌دهد.

در ابتدای برنامه به منظور شبیه‌سازی یک بعدی تعداد 68000 گام برای شبیه‌سازی زمین‌لغزه در نظر گرفته شده است. اما بعد از اتمام تمامی گام‌ها باید بررسی شود که شبیه‌سازی به اتمام رسیده و مقادیر زیروضعیت‌ها در تمامی سلول‌ها ثابت و بدون تغییر باقی مانده است. مقایسه‌ی زمین‌لغزه‌ی واقعی و زمین‌لغزه‌ی شبیه‌سازی شده

جدول ۳. مقادیر پارامترهای استفاده شده به منظور شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم-طاهری (یک بعدی).

پارامتر	بازه‌ی مقادیر	مقدار بهینه
p_c	۵	۵
p_t	$[0.1-0.0001]$	0.0001
p_{dN}	0.21	0.21
p_{adh}	3.84	3.84
p_f	2.1	2.1
p_{et}	$[0.37-0.75]$	0.75
p_{pef}	$[0.13-0.27]$	0.13

مسیر در شمال بندر طاهری به ارتفاع حدود 50 متر از سطح دریا و بخش شمالی (منطقه جم) به ارتفاع 700 متر می‌رسد. مسیر آسفالت‌هی موجود با عبور از گرده‌هی بر پیچ و خم تا ارتفاع 600 گذشته و در نهایت به دشت وسیع جم می‌رسد.

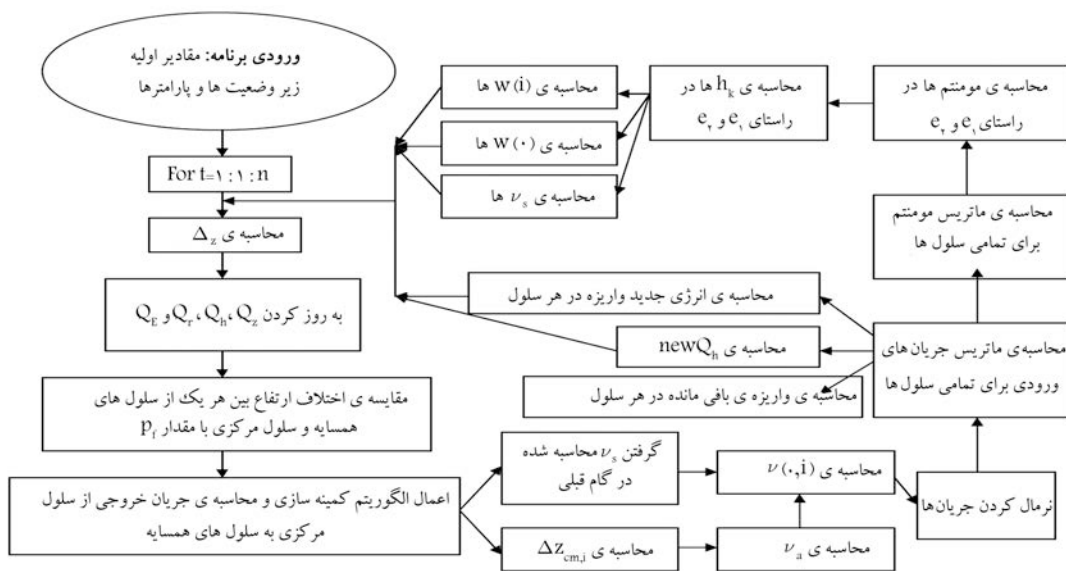
محدوده‌ی مورد مطالعه در فاصله‌ی بین کیلومترهای $70+32$ تا $85+32$ و در موقعیت جغرافیایی $(3064100$ و $631431)$ واقع شده است. ترانسه‌ی مورد نظر در 5 کیلومتری شهر بندر طاهری واقع بوده و رودخانه طاهری نیز در کنار آن است که برای عبور از آن پل‌های دوگانه‌ی در هر دوخط رفت و برگشت ساخته شده است. ارتفاع ترانسه تا کف جاده حدود 90 متر بوده و فاصله‌ی تاج آن تا محور جاده به بیش از 120 متر می‌رسد، لذا حجم این توده را می‌توان برابر با $1/6$ میلیون متر مکعب برآورد کرد.

با عنایت به قرارگیری ترانسه‌ی تحت بررسی در کنار رودخانه و احتمال لغزش سراسری آن که ممکن است منجر به حرکت لوله‌ی گاز با قطر 56 اینچ در کنار جاده، یا مسدودشدن رودخانه با توجه به حجم عظیم توده‌ی لغزنده شود، می‌توان به حساس بودن منطقه پی برد.

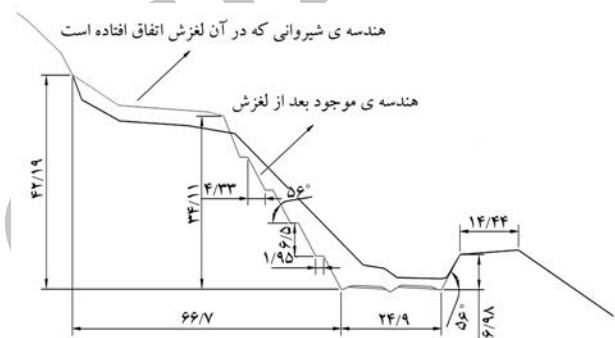
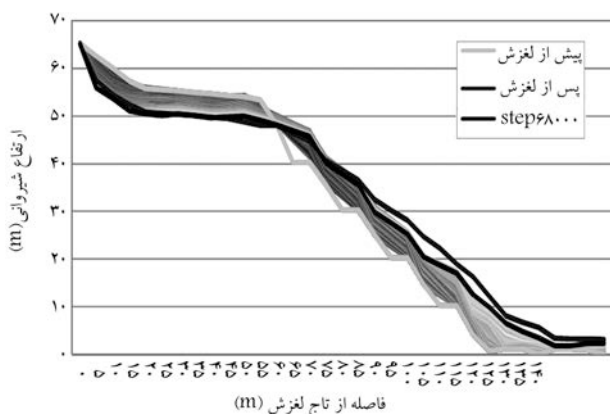
تحلیل لغزش براساس مشاهدات صحرایی: بعد از انجام عملیات خاک برداری به منظور رسیدن به عرض و رقوم پروژه‌ی بزرگراه چهارخطی جم - بندر طاهری، در محدوده‌ی کیلومتر $75+32$ بر اثر بارندگی‌های سیلابی در منطقه، ترانسه‌ی بالادست مسیر دچار لغزش شد، به طوری که کف جاده به همراه آسفالت نزدیک به 2 متر دچار بالازدگی شد. ترانسه‌ی مورد بررسی در توده‌ی سنگ مارنی در سازند میشان (به سن میوسن) قرار دارد. سازند میشان در این ناحیه، بیشتر از لایه‌های مارنی درست شده اما لایه‌های سخت تر مانند سنگ آهک مارنی یا ماسه سنگ و نیز چندلایه گچ سنگی نیز در آن وجود دارد که منجر به ایجاد نمای پلکانی بی‌نظم در دامنه شده است. با توجه به حساسیت بالای مارنی نسبت به آب، با رسیدن آب از طریق شکاف‌ها، در دامنه ناپایداری پدید آمده است. با توجه به مشاهدات صحرایی وقوع پدیده‌ی لغزش در محدوده‌ی مورد نظر تشخیص داده شد. این لغزش در تاج از یک ترک کششی شروع می‌شود که بر اثر آن دو دیواره‌ی ترک نسبت به هم حدود 6 متر حرکت کرده‌اند. در بالادست این قسمت سنگ‌های آهکی مارنی با طاهری مقاوم و بدون آسیب دیدگی با لایه‌بندی افقی قرار گرفته‌اند که هیچ‌گونه آثاری دال بر شروع رانش در آن‌ها دیده نمی‌شود؛ در نتیجه سطح برش ذکر شده دورترین سطح گسیختگی در منطقه‌ی لغزیده است (شکل ۸). در پائین دست این سطح انبوهی از ترک‌های کششی و برشی با بازشدگی تا $1/5$ متر دیده می‌شوند که بعضاً دارای عمقی تا 10 متر نیز هستند. این شکاف‌های کششی و برشی در توده‌ی لغزیده شرایط نامساعدی را به علت نفوذ جریان آب بر اثر بارندگی و ایجاد لغزش‌های دیگر فراهم آورده‌اند.



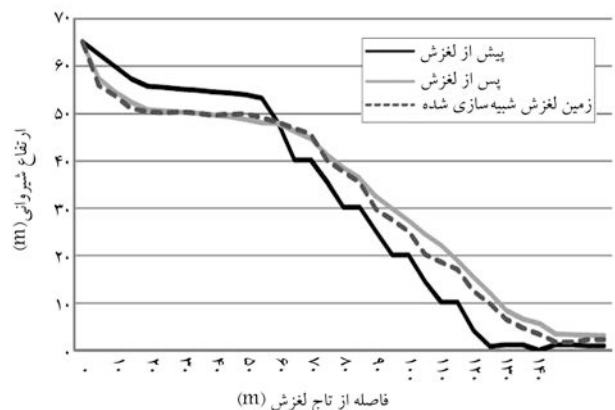
شکل ۸. محل شروع رانش (سرچشمه‌ی زمین‌لغزه در شبیه‌سازی).



شکل ۹. الگوریتم برنامه‌ی تهیه‌شده برای شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها.



شکل ۱۰. مقطع شماییک زمین لغزشی جم - طاهری.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی بین زمین‌لغزه‌ی شبیه‌سازی شده و زمین‌لغزه‌ی واقعی (یک بعدی).

شکل ۱۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری در گام‌های مختلف.

زمین‌لغزه‌ی واقعی پیدا می‌کند، به طوری که در گام ۶۸۰۰۰ زمین‌لغزه‌ی شبیه‌سازی شده بیشترین شباهت را با زمین‌لغزه‌ی واقعی پیدا کرده است.

در شبیه‌سازی دوبعدی مقادیر مربوط به ماتریس ورودی q_z ، q_h و q_r (پیش از لغزش) از مقطع‌های به دست آمده از نقشه‌ی توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۰۰ استخراج شده و به صورت ماتریس 29×39 (۲۹ سطر و ۳۹ ستون) در الگوریتم اتومات سلولی وارد شده است. به علت عدم وجود اطلاعات کافی پس از لغزش، امکان مقایسه و کنترل نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمین‌لغزه به صورت دوبعدی با زمین‌لغزه‌ی واقعی، تنها در مقاطع محدودی امکان‌پذیر بوده است.

از آن‌جا که مقطع $32+75$ در مرکز خرابی بوده و بیشترین میزان بالادگی را داشته است، در تحلیل یک بعدی این مقطع به عنوان مقطع منتخب در نظر گرفته شد. به همین دلیل، در ادامه به منظور مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی به صورت یک بعدی و دوبعدی تنها به آوردن نتایج شبیه‌سازی دوبعدی در مقطع $32+75$ اکتفا می‌کنیم. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل ۱۳ و جدول ۴ آورده شده است. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی به صورت یک بعدی و دوبعدی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

به صورت یک بعدی در جدول ۴ و شکل ۱۱ آورده شده است. در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم-طاهری توسط برنامه‌ی تهیه‌شده به زبان MATLAB در گام‌های مختلف آورده شده است (شکل ۱۲). چنان که ملاحظه می‌شود، با گذشت زمان و افزایش تعداد گام‌ها نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق بیشتری با

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی مقطع ۳۲+۷۵° به صورت یک بعدی و دو بعدی.

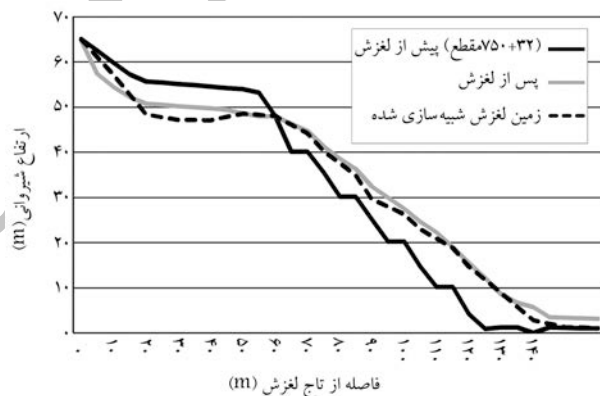
فاصله از تاج لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی پیش از لغزش (متر)	زمین لغزه‌ی واقعی (متر)	زمین لغزش شبیه‌سازی شده (متر)		فاصله از تاج لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی پیش از لغزش (متر)	زمین لغزه‌ی واقعی (متر)	زمین لغزش شبیه‌سازی شده (متر)	
			یک بعدی	دو بعدی				یک بعدی	دو بعدی
۰	۶۵,۱۴۰	۶۵,۱۴۰	۶۵,۱۴۰	۶۵,۱۴۰	۷۵	۳۰,۲۳۰	۳۶,۵۸۹	۳۵,۴۸۰	۳۴,۹۶۶
۵	۶۲,۵۲۹	۵۷,۳۹۰	۵۷,۹۰۰	۶۱,۱۴۵	۸۰	۲۵,۱۴۲	۳۲,۵۲۲	۲۹,۸۳۰	۲۹,۶۸۱
۱۰	۵۹,۹۱۸	۵۴,۵۴۹	۵۳,۷۱۰	۵۷,۱۵۰	۸۵	۲۰,۲۳۰	۲۸,۴۵۶	۲۵,۲۶۰	۲۶,۳۲۶
۱۵	۵۷,۳۰۷	۵۲,۳۲۰	۵۰,۹۸۰	۵۲,۷۸۰	۹۰	۱۴,۶۴۲	۲۴,۳۹۰	۲۰,۳۹۰	۲۲,۹۷۱
۲۰	۵۵,۷۸۰	۵۰,۸۴۰	۵۰,۴۳۰	۴۸,۴۱۰	۹۵	۱۰,۲۳۰	۲۰,۳۲۰	۱۷,۱۰۰	۱۸,۸۱۱
۲۵	۵۵,۴۸۹	۵۰,۵۷۰	۵۰,۰۹۰	۴۷,۸۴۰	۱۰۰	۱۴,۱۴۲	۱۶,۲۵۷	۱۲,۵۳۰	۱۴,۶۵۱
۳۰	۵۵,۱۹۹	۵۰,۳۰۷	۵۰,۴۹۰	۴۷,۲۷۰	۱۰۵	۰,۶۷۵	۱۲,۱۸۰	۹,۹۴۰	۱۱,۷۶۱
۳۵	۵۴,۹۰۸	۵۰,۰۳۸	۵۰,۱۰۰	۴۷,۲۲۱	۱۱۰	۱,۲۴۰	۸,۱۲۰	۶,۵۹۰	۸,۸۷۱
۴۰	۵۴,۶۱۸	۴۹,۷۶۹	۴۹,۶۰۰	۴۷,۱۷۰	۱۱۵	۱,۲۴۰	۶,۷۵۸	۴,۸۳۰	۵,۸۳۶
۴۵	۵۴,۳۲۷	۴۹,۴۲۳	۴۹,۸۵۰	۴۷,۹۰۰	۱۲۰	۰,۰۲۰	۵,۷۳۰	۳,۵۱۰	۲,۸۰۱
۵۰	۵۴,۰۳۷	۴۸,۷۴۳	۴۹,۹۷۰	۴۸,۶۳۰	۱۲۵	۱,۱۹۶	۳,۴۶۰	۱,۸۶۰	۱,۹۹۶
۵۵	۵۳,۲۸۸	۴۸,۰۶۲	۴۹,۱۲۰	۴۸,۳۸۵	۱۳۰	۱,۱۸۶	۳,۳۴۰	۱,۸۹۰	۱,۱۹۱
۶۰	۴۸,۱۱۳	۴۷,۹۹۴	۴۸,۱۶۰	۴۸,۱۴۰	۱۳۵	۱,۰۱۰	۳,۲۵۰	۲,۳۳۰	۱,۰۱۰
۶۵	۴۰,۲۳۰	۴۴,۷۲۱	۴۵,۷۳۰	۴۴,۱۹۵	۱۴۰	۰	۳,۱۶۰	۲,۳۴۰	۰
۷۰	۳۵,۶۴۲	۴۰,۶۵۵	۴۰,۱۰۰	۴۰,۲۵۱					

بررسی مراحل مختلف الگوریتم اتومات سلولی استفاده شده در بهبود نتایج شبیه‌سازی

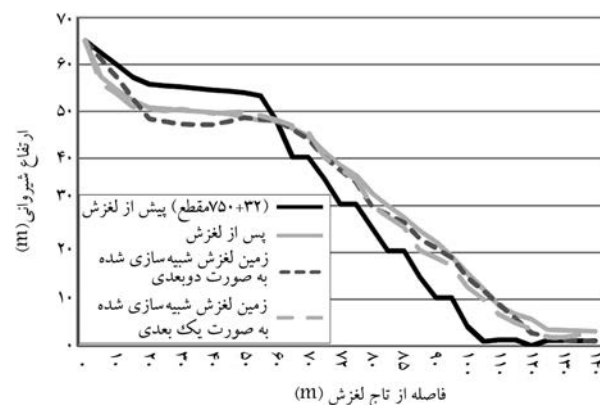
تأثیر اینرسی بر توده‌ی که با سرعت v در حرکت است با اضافه کردن دو مقدار $w(1)$ ، $w(2)$ و ایجاد یک شیب فرضی صورت می‌گیرد. به این ترتیب در الگوریتم شرایط نامتعادل هیدروستاتیکی ایجاد می‌شود، که با انتقال کل توده به سلول مجاور بر طرف می‌شود. اگر این شیب فرضی در نظر گرفته نشود الگوریتم کمینه‌سازی مقداری از توده را در سلول مرکزی نگه داشته و تأثیر اینرسی شبیه‌سازی نخواهد شد. به این ترتیب با حذف مقادیر $w(i)$ در الگوریتم استفاده شده می‌توان نتایج حاصل از شبیه‌سازی را بدون در نظر گرفتن اثر اینرسی مشاهده کرد. همچنین به منظور اعمال تأثیر برخورد جریان‌ها، ارتفاع سلول‌های مرکزی توسط مقدار $w(0)$ افزایش می‌یابد. می‌توان با حذف این مقدار از الگوریتم تأثیر برخورد جریان‌ها را در بهبود نتایج شبیه‌سازی مشاهده کرد. برنامه‌ی تهیه شده این قابلیت را دارد که بتوان بدون آن‌که به کل الگوریتم و فرایند شبیه‌سازی لطمه‌ی وارد شود، مراحل فوق را حذف کرد و نتایج را مشاهده کرد. به این ترتیب نتایج شبیه‌سازی در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. فقط با در نظر گرفتن فرسایش سنگ‌پوش (بدون در نظر گرفتن اثر اینرسی)، $w(i)$ ها و برخورد جریان‌ها، $w(0)$.
۲. با در نظر گرفتن فرسایش سنگ‌پوش و تأثیر اینرسی، $w(i)$ ها (بدون در نظر گرفتن تأثیر برخورد جریان‌ها، $w(0)$).
۳. با در نظر گرفتن فرسایش سنگ‌پوش، تأثیر اینرسی، $w(i)$ ها و برخورد جریان‌ها، $w(0)$.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمین لغزه در حالتی که فقط فرسایش سنگ‌پوش در نظر گرفته شده، در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی بین زمین لغزه‌ی شبیه‌سازی شده به صورت دو بعدی و زمین لغزه‌ی واقعی (مقطع ۳۲+۷۵°).



شکل ۱۴. مقایسه‌ی بین زمین لغزه‌ی شبیه‌سازی شده به صورت یک بعدی و دو بعدی (مقطع ۳۲+۷۵°).

جدول ۵. سطح لغزش‌های شبیه‌سازی شده در سه حالت مختلف.

فاصله از تاج لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی پیش از لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی واقعی (متر)	زمین لغزش شبیه‌سازی شده (متر)			فاصله از تاج لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی پیش از لغزش (متر)	ارتفاع شیروانی واقعی (متر)	زمین لغزش شبیه‌سازی شده (متر)		
			حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳				حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
۰	۳۰٫۲۳	۳۶٫۵۸۹	۳۳٫۶۶۰	۳۴٫۶۰۰	۳۵٫۴۸۰	۷۵	۶۵٫۱۴۰	۶۵٫۱۴۰	۶۵٫۱۴۰	۶۵٫۱۴۰	۰
۵	۲۵٫۱۴۲	۳۲٫۵۲۲	۲۸٫۱۶۰	۲۸٫۹۹۰	۲۹٫۸۳۰	۸۰	۵۷٫۳۹۰	۶۰٫۸۷۰	۶۰٫۰۱۰	۵۷٫۳۹۰	۵
۱۰	۲۰٫۲۳۰	۲۸٫۴۵۶	۲۳٫۶۱۰	۲۴٫۵۷۰	۲۵٫۲۶۰	۸۵	۵۷٫۱۳۰	۵۸٫۶۱۰	۵۳٫۷۱۰	۵۴٫۵۴۹	۱۰
۱۵	۱۴٫۶۴۲	۲۴٫۳۹۰	۱۶٫۴۲۰	۱۸٫۸۵۰	۲۰٫۳۹۰	۹۰	۵۷٫۱۳۰	۵۶٫۳۸۰	۵۰٫۹۸۰	۵۲٫۳۲۰	۱۵
۲۰	۱۰٫۲۳۰	۲۰٫۳۲۰	۱۳٫۵۸۰	۱۴٫۵۹۰	۱۷٫۱۰۰	۹۵	۵۵٫۰۱۰	۵۴٫۶۰۰	۵۰٫۴۳۰	۵۰٫۸۴۰	۲۰
۲۵	۱۴٫۱۴۲	۱۶٫۲۵۷	۶٫۵۸۰	۸٫۴۷۰	۱۲٫۵۳۰	۱۰۰	۵۵٫۰۱۰	۵۲٫۸۲۰	۵۰٫۰۹۰	۵۰٫۵۷۰	۲۵
۳۰	۰٫۶۷۵	۱۲٫۱۸۰	۳٫۵۹۰	۵٫۱۱۰	۹٫۹۴۰	۱۰۵	۵۲٫۸۹۰	۵۰٫۸۰۰	۵۰٫۴۹۰	۵۰٫۳۰۷	۳۰
۳۵	۱٫۲۴۰	۸٫۱۲۰	۱٫۲۴۰	۳٫۵۷۰	۶٫۵۹۰	۱۱۰	۵۳٫۲۷۰	۵۰٫۷۰۰	۵۰٫۱۰۰	۵۰٫۰۳۸	۳۵
۴۰	۱٫۲۴۰	۶٫۷۵۸	۱٫۲۴۰	۲٫۱۲۰	۴٫۸۳۰	۱۱۵	۵۲٫۹۶۰	۵۰٫۶۱۰	۴۹٫۶۰۰	۴۹٫۷۶۹	۴۰
۴۵	۰٫۰۲۰	۵٫۷۳۰	۰٫۰۲۰	۰٫۰۲۰	۳٫۵۱۰	۱۲۰	۵۲٫۶۵۰	۴۹٫۶۲۰	۴۹٫۸۵۰	۴۹٫۴۲۳	۴۵
۵۰	۱٫۱۹۶	۳٫۴۶۰	۱٫۱۹۶	۱٫۱۹۶	۱٫۸۶۰	۱۲۵	۴۸٫۶۱۰	۴۸٫۴۹۰	۴۹٫۹۷۰	۴۸٫۷۴۳	۵۰
۵۵	۱٫۱۸۶	۳٫۳۴۰	۱٫۱۸۶	۱٫۱۸۶	۱٫۸۹۰	۱۳۰	۴۶٫۴۹۰	۴۷٫۵۰۰	۴۹٫۱۲۰	۴۸٫۰۶۲	۵۵
۶۰	۱٫۰۱۰	۳٫۲۵۰	۱٫۰۱۰	۱٫۰۱۰	۲٫۳۳۰	۱۳۵	۴۶٫۶۲۰	۴۷٫۴۵۰	۴۸٫۱۶۰	۴۷٫۹۹۴	۶۰
۶۵	۰	۳٫۱۶۰	۰	۰	۲٫۳۴۰	۱۴۰	۴۳٫۷۳۰	۴۴٫۶۴۰	۴۵٫۷۳۰	۴۴٫۷۲۱	۶۵
۷۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۰	۳۸٫۶۵۰	۳۹٫۴۸۰	۴۰٫۱۰۰	۴۰٫۶۵۵	۷۰

ماتریس‌ها و زیروضعیت‌های جداگانه به برنامه داد. سپس با مشاهده نتایج شبیه‌سازی همراه با فعالیت‌های مهندسی، یا بدون آن، می‌توان تأثیرات این فعالیت‌ها را مشاهده کرد و درمورد پایداری‌سازی شیروانی مربوطه تصمیم‌گیری کرد.

شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها به کمک روش اتومات سلولی با وجود اطلاعات میدانی معتبر، دقیق و جامع دارد. از آن‌جا که در ایران بانک اطلاعاتی مناسبی از زمین‌لغزه‌های به‌وقوع پیوسته وجود ندارد، همواره تقریب‌هایی در روند (مقادیر پارامترها و زیروضعیت‌ها) و نتایج تحقیق مشاهده می‌شود. در نتیجه اختلاف بین نتایج زمین‌لغزه‌های شبیه‌سازی شده و سطح لغزش‌های واقعی را تا حدودی می‌توان ناشی از عدم داشتن اطلاعات کافی و مناسب درمورد زمین‌لغزه‌ها دانست.

در حالت دوم، علاوه بر فرسایش سنگ‌پوش تأثیر اینرسی نیز در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جا که سرعت حرکت توده در حین لغزش بسیار سریع بوده، در نظر گرفتن تأثیر اینرسی برای شبیه‌سازی لغزش عامل بسیار مهمی است که می‌تواند تأثیر زیادی در بهبود نتایج شبیه‌سازی داشته باشد. تأثیر اینرسی با اضافه کردن $w(i)$ به $u(i)$ ‌ها در الگوریتم کمینه‌سازی وارد می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول ۵ آمده است.

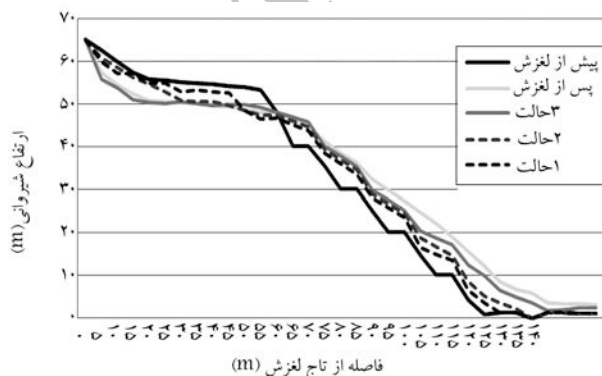
در حالت سوم تأثیر برخورد توده‌ها در سلول‌ها نیز در الگوریتم در نظر گرفته شده است. به این منظور مقدار $w(0)$ به $u(0)$ مربوط به سلول مرکزی در الگوریتم کمینه‌سازی اضافه شده است. نتایج شبیه‌سازی در حالت سوم نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها به روش اتومات سلولی کاربردهای مختلف دارد که در ادامه به چند مورد آن اشاره می‌شود:

- پیش‌بینی مناطقی که مستعد لغزش‌اند و مشخص کردن مناطق با احتمال وقوع و پتانسیل خطر بالا و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه در مناطق مختلف.
- امکان دنبال‌کردن و مشاهده پیشرفت زمین‌لغزه و پیش‌بینی سیر تکامل و گسترده‌گی آن.

شکل ۱۵. مقایسه‌ی بین زمین‌لغزه‌ی شبیه‌سازی شده به صورت یک‌بعدی و دوبعدی (مقطع ۳۲+۷۵).



به‌خصوص در نقاط ابتدایی و انتهایی -- بسیار مؤثر بوده است. با مشاهده‌ی نتایج می‌توان پی برد که عدم در نظر گرفتن موارد فوق در شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ها با سرعت بالا می‌تواند سبب اختلاف زیاد بین زمین‌لغزه‌ی شبیه‌سازی شده و زمین‌لغزه‌ی واقعی شود. در شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری به‌صورت دو بعدی اثر فاکتورهای فوق بسیار محسوس‌تر بوده، به طوری که در شبیه‌سازی نمی‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد. از آن‌جا که تأثیرات اینرسی و برخورد توده‌ها در زمین‌لغزه‌هایی با سرعت بالا قابل توجه بوده و معنی‌دار می‌شود، در زمین‌های با سرعت متوسط یا کم -- بسته به نوع زمین‌لغزه -- می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت و در روند شبیه‌سازی وارد نکرد.

نتایج شبیه‌سازی در مقطع $32+75^\circ$ به‌صورت یک بعدی و دو بعدی رضایت‌بخش بوده و در هر دو حالت تطابق قابل قبولی با زمین‌لغزه‌ی واقعی داشته است. در نقاط ابتدایی نتایج شبیه‌سازی یک بعدی اختلاف کم‌تری با نمونه‌ی واقعی آن دارد و در نقاط انتهایی نتایج شبیه‌سازی دو بعدی به نمونه‌ی واقعی نزدیک‌تر است. اما مجموعاً در صورت وجود اطلاعات دقیق و کامل از خصوصیات زمین‌لغزه می‌توان نتایج دقیق‌تری را از شبیه‌سازی دو بعدی انتظار داشت. همچنین، همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده شد، در نظر گرفتن اثر اینرسی و برخورد توده‌ها در نتایج شبیه‌سازی زمین‌لغزه‌ی جم - طاهری به‌صورت یک بعدی --

پانویس

1. Cellular Automata (CA)
2. debris flow
3. substate
4. simulation through computational innovative methods for the detection of debris flow path using interactive Cellular Automata
5. Ontake
6. Tessina
7. Sarno

منابع

1. Mitchel, M., *Computation in Cellular Automata: A Selected Review*, Technical Report, Santa Fe Institute, New Mexico, USA, (1996).
2. D'Ambrosio, D.; Di Gregorio, S. and Iovine, G. "Simulating debris flows through a hexagonal Cellular Automata model: Sciddica S₃-hex", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **3**, pp. 545-559 (2003).
3. Avolio, M.V.; Di Gregorio, S. and Mantovani, F. "Simulation of the 1992 Tessina landslide by a Cellular Automata model and future hazard scenarios", *JAG. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2**(1), pp. 41-50 (2000).
4. Di Gregorio, S.; Rongo, R. and Siciliano, C. "Mount Ontake landslide simulation by the Cellular Automata

model Sciddica-3", *Physics and Chemistry of the Earth*, **24**(2), pp. 131-137 (1999).

5. D'Ambrosio, D.; Di Gregorio, S. and Iovine, G. "First simulation of the Sarno debris flows through Cellular Automata modeling", *Geomorphology*, **54**, pp. 91-117 (2003).
6. D'Ambrosio, D.; Di Gregorio, S. and Iovine, G. "Simulating the Curti-Sarno debris flow through cellular automata: The model Sciddica (release S2)", *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**, pp. 1577-1585 (2002).
7. Iovine, G.; D'Ambrosio, D. and Di Gregorio, S. "Parallel genetic algorithms for calibrating a hexagonal model for the simulation of debris flows characterized by strong inertial", *Geomorphology*, **66**, pp. 287-303 (2005).
8. D'Ambrosio, D.; Spataro, W. and Di Gregorio, S. "Parallel genetic algorithms for optimizing cellular automata models of natural complex phenomena: An application to debris-flows", *Computers and Geosciences*, **32**(7), pp. 861-877 (2005).
9. D'Ambrosio, D. and Iovine, G. "A microscopic collision model for debris-flow simulation", *Environmental modeling and software*, **22**, pp. 1417-1436 (2007).
10. Wolfram, S. "Computation theory of Cellular Automata", *Communication in mathematical Physics*, **96**, pp. 15-57 (1984).
11. Takahashi, T., *Debris Flow*, A.A. Balkema, Rotterdam: Brookfield (1991).