



مدل سازی زمین لغزش های سطحی با تاکید بر اثر شکل شیب و پروفیل طولی دامنه

علی طالبی¹، محمد تقی دستورانی¹ و علیرضا نفرزادگان²

1 و 2- به ترتیب استادیاران و دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد
رایانامه: talebisf@yaduni.ac.ir

چکیده

ایده ارائه شده در این مقاله یک مدل فیزیکی جهت بررسی رابطه بین شکل دامنه شامل عرض دامنه (همگرا، واگرا و موازی) و انحنای کف (محدب، مقعر و صاف) با عکس العمل هیدرولوژیکی و پایداری در دامنه های مرکب (غیریکنواخت) می باشد. این مدل ترکیبی از یک مدل ژئومتری سه بعدی برای دامنه های مرکب، یک مدل هیدرولوژی در حالت ماندگار و یک مدل پایداری دامنه بر اساس فرضیه شیب بی نهایت می باشد. مدل هیدرولوژیکی از ترکیب معادله پیوستگی جریان و شکل سینتیک معادله دارسی بدست می آید و اثر توپوگرافی دامنه را از طریق شکل پلان و انحنای پروفیل طولی دربر می گیرد. با تغییر این دو عامل توپوگرافی، نه شکل اصلی جهت بررسی عکس العمل هیدرولوژیکی و اثر آن در پایداری دامنه های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده علاوه بر شیب کف، خصوصیات توپوگرافی دامنه (مخصوصا شکل پلان و انحنای کف) نیز جریان های زیرسطحی دامنه را کنترل نموده و این فرآیند باعث تغییر رفتار هیدرولوژیکی دامنه ها و ایجاد ناپایداری در آنها می گردد. بر اساس نتایج بدست آمده، وقتی نیمرخ دامنه از محدب به مقعر تغییر می کند پایداری شیب کاهش می یابد. همچنین وقتی شکل پلان شیب از همگرا به واگرا تغییر می کند پایداری در همه انواع نیمرخ ها (پروفیل های طولی) افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: شکل شیب، پروفیل طولی، پایداری دامنه، دامنه های مرکب.

مقدمه

عکس العمل هیدرولوژیکی یک دامنه نسبت به بارندگی باعث ارتباط متقابل منطقه اشباع- غیراشباع شده که معمولا منجر به بالا آمدن سطح آب در دامنه می شود. از آنجا که عکس العمل دینامیکی یک دامنه قویا بستگی به شکل پلان، انحنای شیب کف و زاویه شیب دارد، یک مدل سه بعدی دینامیکی هیدرولوژی دامنه جهت بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دامنه های مرکب (غیر یکنواخت) مورد نیاز می باشد (Troch, 2002). معمولا جهت بررسی سه بعدی



جریان آب زیر زمینی از مدل سه بعدی ریچارد استفاده می شود که حل این معادله بصورت سه بعدی بسیار مشکل می باشد. جهت جبران این مشکل اخیراً تروخ و همکاران¹ (2002 و 2003) مدل های کم بُعدتری توسعه داده و ارائه کرده اند. با استفاده از این مدل ها می توان کلیه اشکال دامنه ها را (از نظر شکل سطح و پروفیل طولی) در نظر گرفته و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در آنها بررسی نمود. ضمناً این مدل ها تغییرات عرض دامنه و مورفولوژی سه بعدی دامنه را در نظر می گیرد. لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا با توسعه مدل سه بعدی مورفولوژی دامنه، عکس العمل هیدرولوژیکی دامنه های مرکب و در نهایت پایداری آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

مواد و روش ها

جهت بررسی شکل هندسی² دامنه های مرکب که هم پروفیل طولی ناصاف (مقعر یا محدب) و هم شکل پلان غیریکنواخت (همگرا یا واگرا) دارند، یک مدل سه بعدی هندسی از دامنه مورد نیاز می باشد. چرا که عکس العمل هیدرولوژیکی دامنه متاثر از پروفیل طولی و شکل پلان دامنه می باشد. در واقع، پروفیل طولی کنترل کننده تغییرات سرعت جریان و شکل دامنه نیز کنترل کننده تمرکز جریان های زیرسطحی مخصوصاً در قسمت خروجی دامنه می باشد (Troch, 2003).

مدل هندسه دامنه

کامل ترین مدل سه بعدی جهت بررسی شکل دامنه های مرکب، مدل ایوانز³ می باشد (Evans, 1980) که رابطه ریاضی بین طول، عرض و ارتفاع در این مدل از این قرار است:

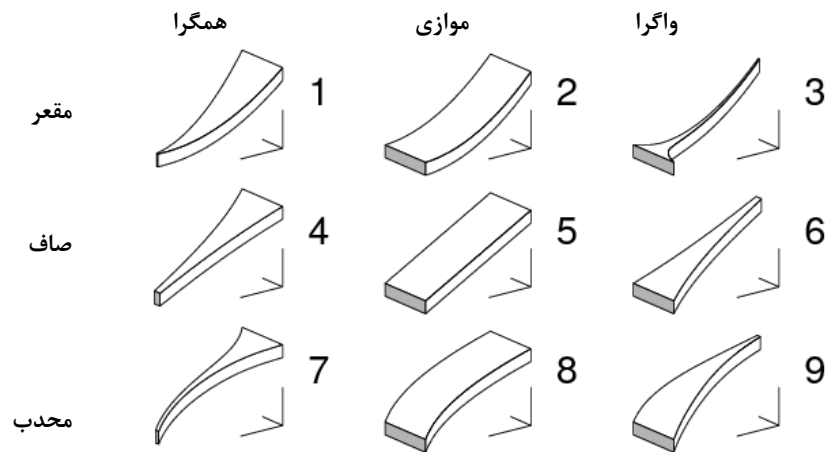
$$z(x, y) = E + H(1 - x/L)^n + \omega y^2 \quad (1)$$

که در این رابطه، z ارتفاع، x فاصله افقی اندازه گیری شده بطرف پایین دست، y فاصله افقی از مرکز دامنه در جهت عمود به طول، E حداقل ارتفاع سطح پایه، H اختلاف ارتفاع بین نقطه خروجی و انتهای بالادست دامنه، L طول کل دامنه، n پارامتر انحنای پروفیل و ω پارامتر شکل دامنه می باشند. بدین ترتیب، با تغییر این دو پارامتر n و ω جهت دامنه های مختلف بدست می آید که تصویر سه بعدی آنها در شکل شماره 1 نشان داده شده است.

¹- Troch et al.

²- geometry

³- Evans



شکل شماره 1- دید سه بعدی دامنه های مورد مطالعه

مدل هیدرولوژی دامنه

فرایند حرکت آب در خاک و تشکیل سطح آب زیرزمینی در یک دامنه متأثر از شکل دامنه و خصوصیات هیدرولیکی ناحیه متخلخل خاک می باشد. جامع ترین توصیف ریاضی این فرایند معادله سه بعدی ریچارد می باشد که حل عددی آن بسیار مشکل است (Hilberts, 2004). جهت فائق آمدن بر این مشکل اخیراً فن و براس¹ (1998) با ارائه یک تابع ظرفیت ذخیره دامنه ابعاد معادله را کاهش داده اند. بدین ترتیب، حداکثر ظرفیت ذخیره یک دامنه (S_c) برابر است با (Fan & Bras, 1998):

$$S_c(x) = w(x)d(x)f \quad (2)$$

که در این رابطه، w عرض دامنه در هر x ، $d(x)$ عمق خاک در هر x و f تخلخل موثر می باشد. در واقع، رابطه (2) اثر شکل پلان دامنه را از طریق تغییر عرض و اثر پروفیل طولی را از طریق تغییر عمق خاک بررسی می کند. اکنون، با جایگزینی عمق آب (h) به جای عمق خاک میزان ذخیره واقعی دامنه $S(x,t)$ برابر است با:

$$S(x,t) = w(x)h(x,t)f \quad (3)$$

از طرفی با داشتن میزان ذخیره دامنه میزان دبی زیرسطحی با استفاده از معادله تغییر یافته داری قابل محاسبه می باشد. در واقع، در هر دامنه (مناطق شیب دار) شکل سینتیک معادله داری ساده ترین حالت ریاضی از فرایند جریان زیرسطحی را نشان می دهد. یعنی:

¹ Fan and Bras



$$Q = -K_s \frac{S}{f} \frac{\partial z}{\partial x} \quad (4)$$

که K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می باشد. از طرف دیگر معادله پیوستگی برابر است با:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = N(t)w(x) \quad (5)$$

که N مقدار آب نفوذ یافته (جریان عمودی) به منطقه اشباع می باشد. اکنون با توجه به رابطه (4 و 5) و حل رابطه (1) مقدار ذخیره واقعی دامنه در حالت ماندگار هیدرولوژی برابر است با:

$$S(x) = \frac{fL}{nK_s H} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{1-n} NA(x) \quad (6)$$

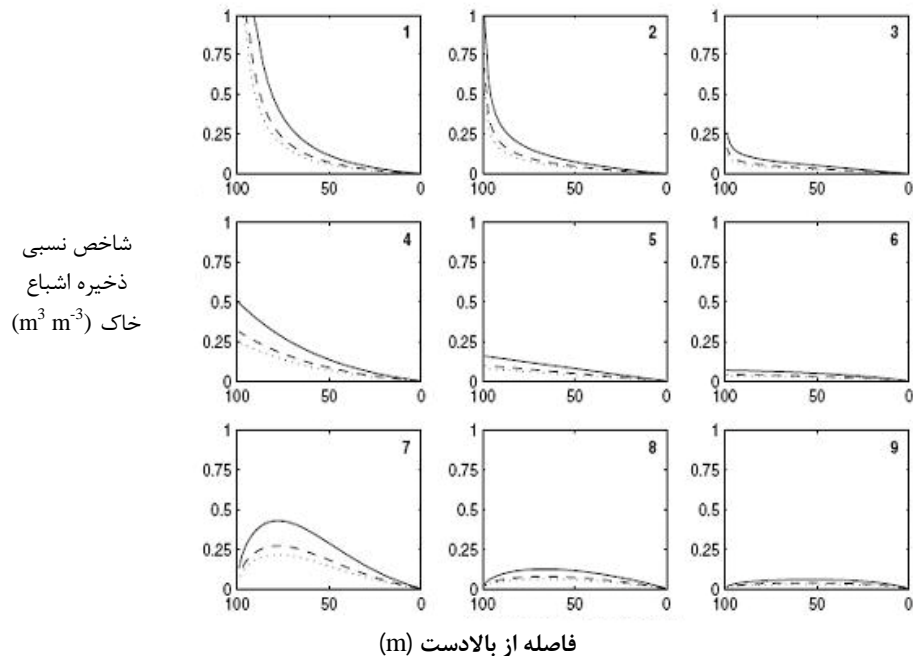
و نهایتاً جهت مقایسه وضعیت هیدرولوژیکی دامنه‌ها می توان شاخص اشباع نسبی خاک (σ) را چنین ارائه نمود:

$$\sigma(x) = \frac{S(x)}{S_c(x)} \quad (7)$$

واضح است که رابطه (7) یک شاخص بدون بُعد بوده و جهت مقایسه کلیه دامنه‌ها می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

بدین ترتیب، کلیه پارامترها در 9 شکل ارائه شده (شکل شماره 1) که در برگزیده سه حالت پروفیل طولی و سه حالت پلان سطح می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است در این تحقیق طول هر دامنه برابر 100 متر، هدایت هیدرولیکی اشباع برابر 0/0001 متر بر ثانیه، بارندگی روزانه برابر 10 میلی متر در روز و طول هر dx برابر 0/5 متر در نظر گرفته شده است.

در واقع پس از تعیین پارامترهای توپوگرافی در هر دامنه، مقدار ذخیره کل و ذخیره واقعی دامنه (با استفاده از نرم افزار MATLAB) در سه شیب متفاوت محاسبه گردید که نتایج آن در شکل (2) نشان داد شده است. همانطوریکه دیده می شود با اینکه کلیه پارامترهای هیدرولوژیکی دامنه‌ها (K_s, f, N, L, dx) یکسان می باشد ولی به علت تغییر شکل هندسی دامنه، تمام دامنه‌ها رفتار هیدرولوژیکی متفاوتی از خود نشان می دهند (شکل 2). بررسی اولیه شکل 2 نشان می دهد دامنه‌ها با پلان همگرا (دامنه 1، 4 و 7) و نیمرخ مقعر (دامنه 1، 2 و 3) بزرگترین مقطع اشباع را دارند. در حالیکه قسمت خروجی دامنه شماره (1) (پروفیل مقعر و شکل همگرا) کاملاً اشباع می باشد ولی در دامنه شماره 9 (پروفیل محدب و شکل واگرا) فقط بخش بسیار کوچکی اشباع می باشد.



شکل 2- تغییرات ذخیره اشباع خاک (سطح آب زیرزمینی) در دامنه‌های مختلف (نقطه چین: شیب 10 درجه، خط چین: شیب 20 درجه و خط ممتد: شیب 30 درجه).

مدل پایداری دامنه

مطالعات پایداری شیب مبتنی بر محاسبه ضریب پایداری¹ (FS) دامنه است. طالبی و همکاران² (2008) رابطه زیر را برای محاسبه میانگین ضریب پایداری (FS) در دامنه‌ای که با شرایط ماندگار بارندگی دریافت کرده است، ارائه کرده‌اند.

$$\overline{FS} = \frac{\int_0^L \left[1 - \sigma(x) \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \right] \cos^2 \beta(x) dx \tan \phi}{\int_0^L \sin \beta(x) \cos \beta(x) dx} \quad (10)$$

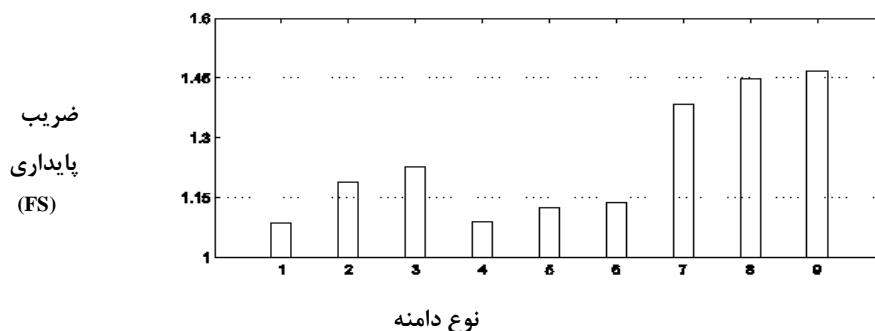
با استفاده از رابطه (10) مقادیر متوسط FS برای انواع مختلف دامنه‌ها محاسبه شده است

¹-Factor of Safety

²-Talebi et al.,

(شکل 3).

با بررسی شکل (3) در می‌یابیم که دامنه مقعر همگرا کمترین پایداری را در میان 9 دامنه مورد بررسی دارد و در میزان بارش ثابت، احتمال تخریب و گسیختگی آن بیشتر خواهد بود. بیشترین پایداری نیز مربوط به دامنه محدب و اگر است. این امر ناشی از این مطلب است که وقتی پلان دامنه از حالت واگرا به حالت همگرا تغییر شکل می‌دهد، منطقه اشباع در بخش خروجی دامنه افزایش می‌یابد. این تاثیر در دامنه‌های با پروفیل مقعر کاملاً واضح است. در نتیجه برای یک شکل پلان مشخص (همگرا، واگرا و موازی)، دامنه‌های محدب معمولاً منطقه اشباع کمتری نسبت به دامنه‌های دیگر دارند.



شکل 3- مقادیر متوسط ضریب پایداری (FS) برای 9 نوع دامنه در سه زاویه شیب (20-30-36 درجه)

نتیجه‌گیری

مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل کاملاً فیزیکی است که با ترکیبی از یک مدل سه بعدی دامنه با شکل سینتیک معادله داری بدست آمده است و برای کلیه اشکال دامنه‌ها دارای کاربرد است. در ابتدا پروفیل طولی به سه حالت مقعر، صاف و محدب و شکل پلان دامنه به سه حالت همگرا، موازی و واگرا تقسیم شد که نهایتاً نه حالت ممکن از دامنه‌های طبیعی بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده، دامنه‌های مذکور شرایط هیدرولوژیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهند بطوریکه هر چه شکل دامنه از واگرا به همگرا نزدیک می‌شود، ارتفاع سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. در حقیقت این‌گونه می‌توان بیان کرد که از بین عوامل توپوگرافی، علاوه بر عامل شیب دامنه، عوامل دیگری مانند پروفیل طولی و



شکل پلان دامنه هم فرآیندهای هیدرولوژیکی دامنه‌ها (تشکیل سطح آب زیرزمینی) را کنترل نموده و در پایداری یا ناپایداری آن نقش اساسی دارند.

منابع مورد استفاده

1. Evans, I. S. (1980), "An integrated system of terrain analysis and slope mapping", *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband*, 36, 274-295.
2. Fan, Y., and R. L. Bras (1998), "Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow", *Water Resour. Res.*, 34(4): 921-927.
3. Hilberts, A., E. Van Loon, P. A. Troch and C. Paniconi (2004), "The hillslope-storage Boussinesq model for non-constant bedrock slope", *J. Hydrol.*, 291, 160-173.
4. Talebi, A., P. A. Troch and R. Uijlenhoet (2008), "A steady-state analytical hillslope stability model for complex hillslopes", *Hydrol. Proces.*, 21, doi:10.1002/hyp.6881.
5. Troch, P. A., E. Van Loon and A. Hilberts (2002), "Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow", *Adv. Water Resour.*, 25, 637-649.
6. Troch, P. A., C. Paniconi and E. Van Loon (2003), "Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1- Formulation and characteristic response", *Water Resour. Res.*, 39(11):1316, doi: 10.1029/2002WR001728.