

یادداشت فنی

تحلیل دینامیکی نیروی کشانه، تنش بیشینه کششی و محاسبه موقعیت برش در گیاهان منعطف غیرمستغرق

زهرا گنجی^{۱*}، جمال محمدولی سامانی^۲ و علیرضا شکوهی^۳

چکیده

تحلیل رفتار متقابل گیاه و جریان برای تعیین درجه محافظت از سیل در بخش کشاورزی، مهم است. در این مقاله یک روش تحلیلی برای بررسی منحنی خمش گیاهان منعطف و نقطه شکست آن‌ها در شرایط غیرمستغرق برای حالت دینامیک ارائه شده است. نتایج نشان داد که تحت شرایط یکسان هیدرولیکی نقطه شکست برای گیاهان منعطف با قطر ثابت، در قاعده گیاه است ولی این نقطه برای گیاهان با قطر متغیر به سمت بالا حرکت می‌کند. همچنین میزان خم‌شدگی با افزایش قطر ساقه و ثابت بودن سایر عامل‌ها به دلیل افزایش نیروی کشانه، افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد برای گیاهان مخروطی، خمش کل بیشتر از گیاهان با قطر ثابت است. همچنین برای گیاهان با قطر غیریکنواخت میزان خمش بیشتر است و هرچه گیاه منعطف‌تر باشد محل وقوع بیشینه خمش، به سمت بالا منتقل می‌شود که این امر زبری جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی، تنش کششی بیشینه، ضریب کشانه، گیاه منعطف غیرمستغرق، نقطه شکست.

ارجاع: گنجی ز. محمدولی سامانی ج. و شکوهی ع. ۱۳۹۴. تحلیل دینامیکی نیروی کشانه، تنش بیشینه کششی و محاسبه موقعیت برش در گیاهان منعطف غیرمستغرق. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۱۷۷-۱۸۲.

۱- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.

* نویسنده مسئول: zahraa.ganji@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۲۰

مقدمه

بررسی رفتار متقابل گیاه و جریان، در هنگام عدم وجود مبنای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در تعریف توابع خسارت کشاورزی و نیز تعیین رژیم جریان مهم است. گیاهان منعطف که در معرض جریان قرار می‌گیرند قبل از شکستن، خم می‌شوند و بنابراین در هر مرحله ضریب کشانه (C_D) و توزیع نیروهای وارد بر گیاه به صورت دینامیک تغییر می‌کند. این عوامل سبب می‌شود که تحلیل استاتیکی که بر مبنای عدم تغییر نیروهای وارد بر گیاه در طول شکست گیاه استوار است فقط برای گیاهان سخت قابل استفاده باشد (گنجی و همکاران، ۱۳۹۰)، حال آنکه پوشش گیاهی در مجاری روباز از نوع منعطف است. پژوهش‌های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی زیادی بر روی رفتار متقابل بین گیاه و سیالات جاری انجام شده است. بخش وسیعی از دانش امروزی ما در این زمینه مدیون آزمایش‌های است که برای محدوده وسیعی از شرایط جریان از غیرمستغرق تا مستغرق برای گیاهان صلب و منعطف اجرا شده است (یانگ و چوی، ۲۰۰۹؛ استفان و گاتنک، ۲۰۰۲ و ری و همکاران، ۲۰۰۸). ویلسون و همکاران (۲۰۰۶a؛ ۲۰۰۶b و ۲۰۰۸) چند پژوهش عددی و تجربی برای بررسی اثرات شاخ و برگ و مورفولوژی گیاهان روی خصوصیات نیروی کشانه (Drag Force) انجام داده‌اند. تاکمورا و تاناکا (۲۰۰۷) در بررسی اثرات تراکم پوشش گیاهی غیرمستغرق روی الگوی جریان و ضریب کشانه (C_D) نشان دادند که وقتی $G/D > 1.8$ باشد (G فاصله بین گیاهان در راستای جریان و D قطر گیاهان) ضریب کشانه (C_D) مستقل از نوع آرایش گیاهان بوده و به طور تقریبی ثابت می‌شود. نتایج مطالعه افصلی مهر و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که توزیع سرعت در نزدیک گیاهان به‌طور تقریبی شبیه شکل S تغییر شکل می‌کند و گیاهان تأثیر زیادی روی موقعیت بیشینه سرعت دارند و تا $y/h=0.2$ توزیع سرعت از توزیع لگاریتمی پیروی می‌کند. با توجه به ضرورت بررسی رفتار متقابل گیاه و جریان و تعیین محل شکست برای تخمین زبری ناشی از وجود گیاهان در جریان‌های دارای پوشش گیاهی و عدم پرداخت پژوهش‌های قبلی به موردهای بالا، این پژوهش پایه‌ریزی شده است. با توجه به پیچیدگی رابطه‌های حاکم بر اندرکنش دینامیک گیاه و جریان، پایه‌ریزی و انجام آزمایش‌ها برای تعیین شکلی صریح از معادلات حاکم،

نیازمند تحلیل تئوریک و تعیین پارامترهای اصلی مؤثر بر پدیده و سپس بدون بعدسازی آن‌ها است. بر این اساس در این مقاله با ارائه یک روش تحلیلی به بررسی رفتار متقابل گیاه و جریان، نوع و میزان خم‌شدگی گیاه و محل شکست گیاه، برای گیاهان منعطف غیرمستغرق به صورت دینامیک پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش با ارائه یک روش نیمه‌تحلیلی، نیروها و گشتاورهای مؤثر روی گیاه منفرد منعطف و غیرمستغرق در معرض جریان بررسی شده است. برای استخراج و حل معادله خمش از رابطه‌های خمش تیر یک‌سر گیردار استفاده شده است. قطر گیاه و توزیع نیرویی که گیاه تحمل می‌کند، متغیر است. گیاه به اجزای بسیار کوچک تقسیم شده به نحوی که بتوان هر جزء آن را در زیر آب به طور تقریبی به صورت یک استوانه مایل، بدون تغییر در قطر و مستغرق، مدل کرد و برای هر جزء از تغییرات توزیع نیرو صرف‌نظر کرد. شکل ۱ تغییرات قطر گیاه و نیروهای وارد شده به آن را نشان می‌دهد. تغییرات قطر گیاه و صورت بی‌بعد آن را می‌توان با رابطه‌های ریاضی زیر نشان داد.

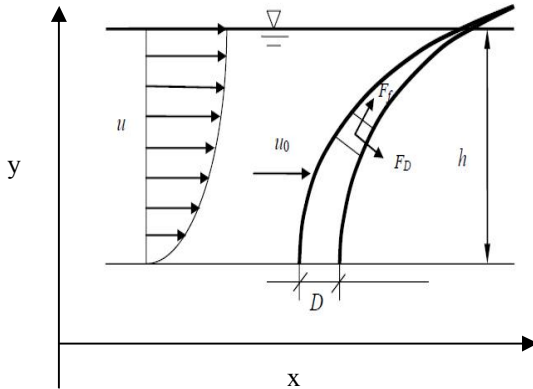
$$d = D \left[1 - (1 - k) \frac{s}{h} \right] \quad (1)$$

$$d_* = D_* \left[1 - (1 - k) s_* \right]$$

که در آن d قطر گیاه در عمق دلخواه y ، s طول اندازه‌گیری شده در امتداد خط خمش از قاعده گیاه تا عمق y ، k نشان دهنده تغییرات نسبی قطر گیاه، $D_* = \frac{D}{h}$ ، $d_* = \frac{d}{h}$ و $s_* = \frac{s}{h}$ است. سپس نیروی کشانه روی هر جزء با استفاده از سرعت متناظر آن عمق، که در این مطالعه از تابع نمایی پرنده‌ت استفاده شده است (چنسون، ۱۹۹۹)، محاسبه شد و کل نیروی کشانه وارد بر گیاه با انتگرال‌گیری در طول گیاه به دست آمد.

نیروهای اعمال شده با آب به یک بخش کوچک از گیاه خم‌شده عبارتند از نیروی کشانه قائم بر گیاه (F_D) و نیروی اصطکاک در طول گیاه (F_f). نسبت بین مومنتم خمش و تغییر شکل تیر (چن، ۲۰۱۰) از رابطه زیر به دست می‌آید.

در این پژوهش برای حل این مسئله، D_* برابر با 0.1 ، 0.05 و 0.1 ؛ k برابر با 0 ، 0.3 ، 0.5 ، 0.7 ، و 0.9 ؛ α برابر با 10^{-11} و 10^{-12} و عدد رینولدز از 10000 تا 800000 انتخاب شده‌اند.



شکل ۱- ساقه گیاه با قطر متغیر که به طور معنی دار در مقابل جریان خم شده به همراه نیروهای وارد بر آن

نتایج و بحث

به دلیل پیچیدگی معادلات بالا، حل تحلیلی آن‌ها ممکن نیست و با استفاده از روش‌های عددی طی یک برنامه کامپیوتری این معادلات حل شد که در شکل ۲ برای محدوده‌ای از شرایط جریان با k های متفاوت آمده است. منحنی‌های خم‌شدگی در شکل ۲ برای مقادیر متفاوت k نشان می‌دهد که برای شرایط جریان مشابه (عدد‌های رینولدز مشابه) خمش کل برای مقادیر کوچک k ، افزایش می‌یابد زیرا گیاهان مخروطی شکل که در قسمت بالایی مقطع باریک‌تری دارند، راحت‌تر خم می‌شوند. به عبارت دیگر از آنجا که به ازای یک D ثابت، با کاهش k ، قطر در هر مقطع کاهش می‌یابد، نیروی کشانه اعمال شده نیز کمتر خواهد بود ولی مومنتوم مؤثر به دلیل کاهش قطر افزایش می‌یابد و در نتیجه خمش بیشتری رخ می‌دهد. در ضمن در گیاهان با k کوچک‌تر، بیشینه تابع ds/dy (شدت خمش) در قسمت بالایی گیاه یعنی نزدیک سطح آب رخ می‌دهد. یکی دیگر از نتایج قابل ذکر این است که برای Re مشابه، وابستگی میزان خمش به مقدار k ، کم بوده ولی محل وقوع بیشینه شدت خمش (نقطه شکست احتمالی) به k وابسته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه k بزرگ‌تر باشد نقطه شکست در نزدیک قاعده گیاه خواهد بود و با کاهش مقدار k به سمت بالا حرکت می‌کند. شکل ۳ منحنی‌های خم‌شدگی را برای مقادیر

$$\frac{d^2 x}{dy^2} = \frac{M(y)}{EI} \left[1 + \left(\frac{dx}{dy} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (2)$$

که در آن x و y طول و عرض نقاط در دستگاه مختصات، M گشتاور خمشی در مقطع y و E ضریب الاستیسیته عنصر تیر و I ممان اینرسی تیر در مقطع عمود بر امتداد خمش است. با جایگذاری نیروهای اعمال شده روی گیاه و محاسبه گشتاور انتگرال‌گیری در طول ساقه گیاه و انجام یک مجموعه عملیات ریاضی معادله زیر برای منحنی خمش به دست آمد.

$$\frac{ds}{dy} = \pm \frac{1}{\sqrt{1 - G^2(y)}} \quad (3)$$

که در آن $G(y) = \int_0^y \frac{M(y)}{EI} dy$ و $ds = \frac{dx}{\sin \theta}$ است و $\frac{ds}{dy}$ همان منحنی خمش می‌باشد. روش تکرار، روشی کارآمد برای حل معادله ۳، است. به این ترتیب که ابتدا یک منحنی خمش فرض می‌شود و نیروهای کشانه و اصطکاک و گشتاور خمش متناظر براساس این منحنی خمش محاسبه می‌شود، سپس معادله ۳ براساس این نیروها و گشتاورها حل شده و منحنی خمش جدیدی به دست می‌آید و این تکرار تا زمان همگرایی ادامه می‌یابد. می‌توان معادله ۳ را به صورت زیر بی‌بعد کرد.

$$\frac{ds_*}{dy_*} = \frac{1}{\sqrt{1 - \omega^2 G_*^2}} \quad (4)$$

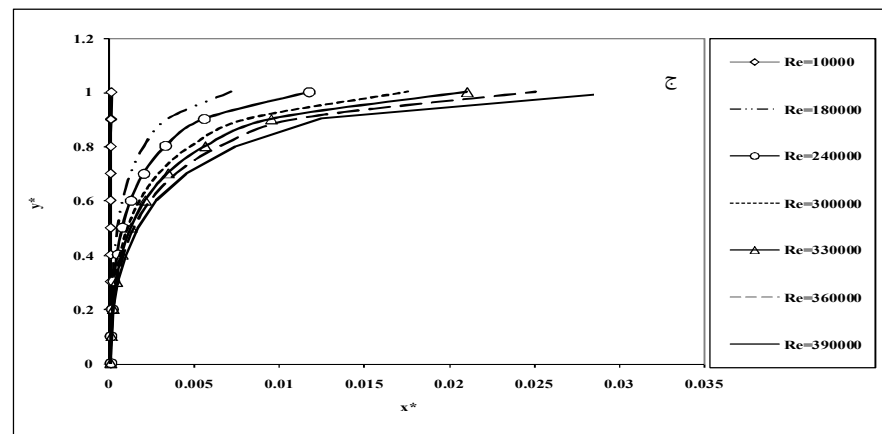
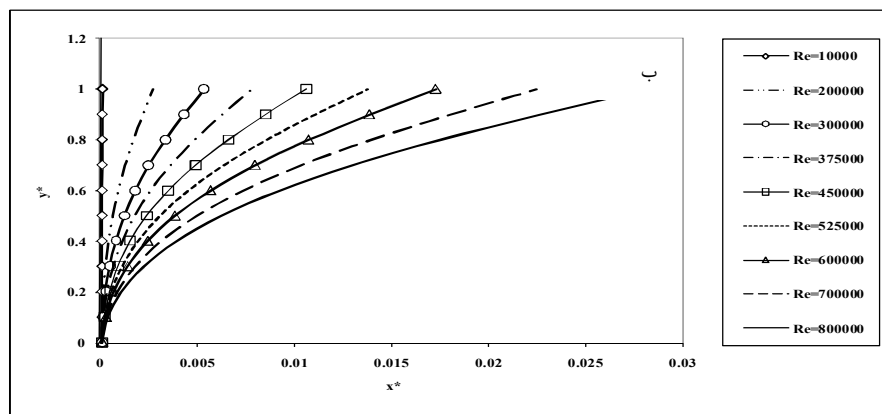
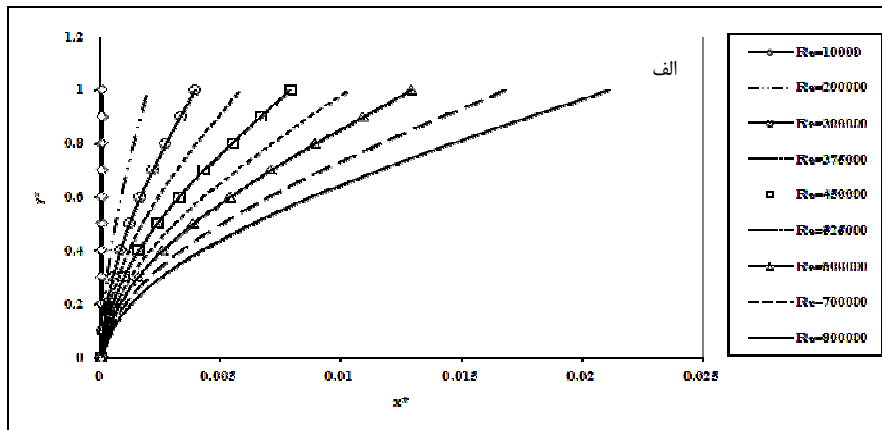
که در آن $ds_* = \frac{ds}{h}$ ، $dy_* = \frac{dy}{h}$

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\rho h^2 v^2}{EI_0} \quad \text{و} \quad \omega = \frac{1}{2} \frac{\rho u_0^2 h^4}{EI_0} = \alpha Re^2$$

می‌باشد. توجه شود که در اینجا پارامتر بی‌بعد α نشان‌دهنده مقاومت عنصر گیاه است که به دو پارامتر الاستیسیته و قطر قاعده گیاه وابسته است. با دقت در معادلات بالا، روشن است که پارامترهای مربوط به مسئله بالا عبارتند از Re ، α یا ω ، D_* و k هستند که با توجه به تجربیات موجود، حدود این پارامترها برای گیاهان منعطف غیرمستغرق بدین شرح است: $Re = 10^4 - 10^7$ ، $\alpha = 10^{-14} - 10^{-9}$ ، $D_* = 0.01 - 0.1$ و $k = 0 - 1$.

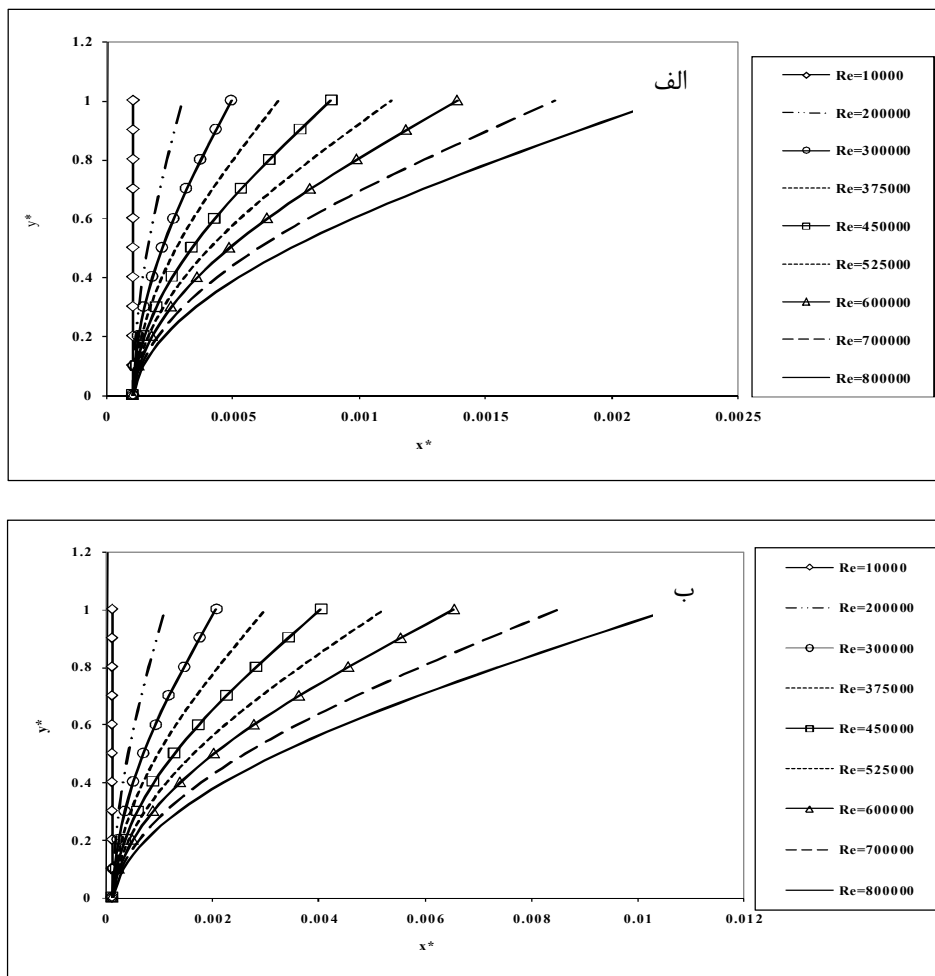
بارگیری روی گیاه به قطر گیاه (D_*) وابسته است، برای مقادیر یکسان α (انعطاف یکسان)، D_* بزرگتر بیانگر نیروی کشانه و اصطکاک بزرگتر است و در نتیجه مومنتم بیشتری به آن وارد می‌شود و گیاه متحمل خمش بیشتری می‌شود. به عبارت دیگر برای داشتن خمش معین، عدد رینولدز کمتری لازم است.

متفاوت D_* نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار D_* ، مقدار رینولدز برای دستیابی به خم‌شدگی مشابه کاهش می‌یابد که در ظاهر مخالف با دانش عمومی است، مبنی بر اینکه گیاهان با قطر بزرگتر دیرتر خم می‌شوند. این باور ناشی از عدم توجه به انعطاف‌پذیری گیاه و واکنش گیاهان منعطف نسبت به جریان است. با توجه به آنکه در سیستم بی‌بعد، مقاومت گیاه با پارامتر α بیان می‌شود و ظرفیت



شکل ۲- منحنی‌های خم‌شدگی برای گیاهان غیرمستغرق برای شرایط الف: $D_* = 0.01, \alpha = 10^{-11}, k = 0.9$

ب: $D_* = 0.01, \alpha = 10^{-11}, k = 0.5$ و ج: $D_* = 0.01, \alpha = 10^{-11}, k = 0.1$



شکل ۳- منحنی‌های خم شدگی گیاهان غیرمستغرق برای شرایط الف: $D_* = 0.01, \alpha = 10^{-12}, k = 0.9$

و ب: $D_* = 0.05, \alpha = 10^{-12}, k = 0.9$

نتیجه‌گیری

بررسی رفتار متقابل گیاه و جریان، محل شکست، میزان و نحوه خم‌شدگی به دلیل تأثیر آن‌ها در مقاومت جریان و تغییر رژیم جریان مهم هستند. در این پژوهش، نیروها و گشتاورهای مؤثر روی گیاه منفرد منعطف و غیرمستغرق که در معرض جریان قرار دارد، بررسی شد. حل منحنی خمش، نوع رفتار گیاه را در مقابل جریان نشان داده و محل خم‌شدگی را به دست می‌دهد. در این پژوهش ضمن استخراج معادله خمش و بی‌بعدسازی آن با استفاده از روش‌های عددی برای محدوده‌ای از شرایط جریان حل شد و تغییرات منحنی خمش و محل احتمالی شکست برای شرایط مختلف جریان و گیاه تعیین شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

- افزایش می‌یابد. رینولدز مشابه) خمش کل برای مقادیر کوچک k .
- در گیاهان با k کوچک‌تر، بیشینه تابع ds/dy (شدت خمش) در قسمت بالایی گیاه یعنی نزدیک سطح آب رخ می‌دهد.
- برای عددهای رینولدز مشابه، برای k های کوچک‌تر، گیاه متحمل خمش بیشتری می‌شود.
- برای عددهای رینولدز مشابه، وابستگی میزان خمش به مقدار k ، کم بوده ولی محل وقوع بیشینه تابع شدت خمش به k وابسته بوده و با کاهش k به سمت بالا حرکت می‌کند. این امر بدان مفهوم است که برای گیاهان با قطر غیریکنواخت میزان خمش بیشتر است و هرچه گیاه منعطف‌تر باشد این انحنا به سمت بالا منتقل می‌شود.
- با افزایش مقدار D_* ، مقدار عددهای رینولدز برای

منحنی‌های خم‌شدگی برای مقادیر متفاوت k نشان می‌دهد که برای شرایط جریان مشابه (عددهای

- vegetation in aquatic flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134: 885-891.
9. Wilson C. A. M. E. Yagci O. Rauch H. P. and Olsen N. R. B. 2006a. 3D numerical modelling of a willow vegetated river/ floodplain system. *Journal of Hydrology*. 327: 13-21.
10. Wilson C. A. M. E. Stoesser T. Bates P. D. and Batemann Pinzen A. B. 2006b. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(7): 750.
doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429
11. Yang W. and Choi S. U. 2009. Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structure in depth-limited open channel flows with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*. 47(4): 445-454.

دستیابی به خم‌شدگی مشابه کاهش می‌یابد.

- نتایج نشان داد که هرچه k بزرگ‌تر شود نقطه رخداد بیشینه تنش کششی و نقطه شکست احتمالی به قاعده گیاه نزدیک‌تر بوده و برای k های کوچک‌تر این نقطه به سمت بالا حرکت می‌کند.

- شکست ساقه از نزدیکی قاعده، نتایج مهمی برای مدل‌سازی هیدرولیکی دارد. تغییر ضریب زبری در عددهای رینولدز بالا، و کاهش زبری به دلیل خم شدن و یا شکست گیاه، می‌تواند زمان رسیدن حداکثر سیلاب را کاهش دهد و در نتیجه خسارات ناشی از سیل افزایش پیدا کند. بنابراین باید در مجاری دارای پوشش گیاهی، ضریب زبری در مرحله‌های مختلف جریان متغیر در نظر گرفته شده و برای مقادیر بالای عدد رینولدز (سرعت و عمق زیاد)، زبری جریان با دقت بیشتری برآورد شود.

منابع

- گنجی ز. شکوهی ع. و سامانی ج. ۱۳۹۰. تعیین عمق و سرعت جریان سیلابی در آستانه شکست گیاهان زراعی و محاسبه موقعیت برش در آن‌ها با استفاده از آنالیز تحلیلی و آزمایشگاهی، مطالعه موردی؛ برنج. *مجله هیدرولیک*. ۶(۱): ۵۳-۶۸.
- Afzalimehr H. Najfabadi E. F. and Singh V. P. 2010. Effect of Vegetation on Banks on Distributions of Velocity and Reynolds Stress under Accelerating Flow. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15(9): 708-713.
- Chanson H. 1999. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Butterworth Heinemann, London, UK. 512 p.
- Chen L. 2010. An integral approach for large deflection cantilever beams. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 45(3): 301-305.
- Rhee D. S. Woo H. Kwon B. A. and Ahn H. K. 2008. Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows. *River Research and Applications*. 24: 673-687.
- Stephan U. and Gutknecht D. 2002. Hydraulic resistance of submerged flexible Vegetation. *Journal of Hydrology*. 269: 27-43.
- Takemura T. and Tanaka N. 2007. Flow structures and drag characteristics of a colony type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow. *Fluid Dynamics Research*. 39(9-10): 694-710.
- Wilson C. A. M. E. Hoyt J. and Schnauder I. 2008. Impact of foliage on the drag force of