

تعیین عمق و سرعت جریان سیلابی در آستانه شکست گیاهان زراعی و محاسبه موقعیت برش در آنها به روش آنالیز تحلیلی و آزمایشگاهی، مطالعه موردی: برنج

زهرا گنجی نوروژی^۱، علیرضا شکوهی^۲، جمال محمد ولی سامانی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترای گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه آبیاری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۳۳۶-۱۴۱۱۵

samani_j@modares.ac.ir

چکیده- بررسی رفتار مکانیکی گیاهان در برابر نیروهای هیدرودینامیکی وارد شده بر آنها، در تحلیل سیل و برآورد خسارت‌های ناشی از آن، طراحی کانال‌ها و مدیریت منابع آب اهمیت فراوانی دارد. از آنجا که عمق و سرعت جریان، مهمترین ویژگی‌های هیدرولیکی مؤثر بر میزان خم شدن گیاه و نقطه شکست آن است، تعیین آنها در هر نقطه از حوضه برای برآورد خسارت ناشی از سیل و مدیریت آن ضروری است. خم شدن و شکست گیاه به علت پیچیدگی ناشی از اثر متقابل بین گیاه و جریان، پدیده‌ای بسیار پیچیده است. در این مقاله روشی تحلیلی برای مطالعه شکست گیاه در شرایط غیر مستغرق، برای حالت استاتیک بررسی شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. حاصل ضرب عمق در سرعت جریان، به‌عنوان شاخص معرف در تحلیل شکست گیاه استفاده شد. نتایج مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی برای محاسبه شاخص مزبور و تنش کششی بیشینه برای شکست گیاه، به ترتیب اختلافی کمتر از ۰/۵ درصد و ۰/۱ درصد را نشان می‌دهد. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داد که در شرایط یکسان هیدرولیکی، نقطه شکست برای گیاهان سخت با قطر ثابت در قاعده گیاه است، اما برای گیاهان با قطر متغیر، به سمت بالا حرکت می‌کند. هرچه قطر گیاه با سرعت بیشتری کاهش یابد، این نقطه به سطح آب نزدیکتر می‌شود.

کلیدواژگان: تنش کششی بیشینه، آستانه شکست، رفتار هیدرولیکی جریان، گیاه برنج، سیل.

مناطق کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Berning et al, 2000). خسارت‌های کشاورزی ناشی از سیل، بسته به نوع گیاه و مرحله رشد آن از چند درصد تا

۱- مقدمه

به دلیل وجود منابع غنی خاک و دسترسی به آب، سیلابدشت‌ها با وجود خطر وقوع سیل همواره به عنوان

بالای گیاهان منعطف افزایش یافته و در درون آنها کاهش می‌یابد.

(2007) Tanaka و Takemura از داده‌های آزمایشگاهی برای بررسی اثر پوشش گیاهی غیرمستغرق بر الگوی جریان و ضریب کشانه استفاده کرده و نشان دادند که تغییر الگوی جریان، به فاصله گیاهان در راستای جریان (G) و عمود بر آن (L) و قطر گیاهان (D) وابسته است. سرعت عبور از میان گیاهان که بر تغییر الگوی جریان مؤثر است، نخست به شدت و سپس به آرامی با افزایش G/D افزایش می‌یابد. ضریب کشانه با افزایش توأم G/D و L/D افزایش می‌یابد. همچنین اگر $G/D > 1.8$ ، ضریب کشانه مستقل از نوع آرایش گیاهان بوده و تقریباً ثابت می‌شود. (1995) Groenewal و French سرعت حد لازم برای شکست ساقه گیاهان را در حالت غیر مستغرق بررسی کردند. آنان برای تحلیل رفتار مکانیکی گیاه در برابر جریان از نیروی کشانه استفاده و پارامتر حد Uh/D را برای شکست برابر ۱۲/۸ به دست آوردند. که U, h, D به ترتیب سرعت و عمق جریان و قطر گیاه است.

(2010) Tanaka و Yagisawa اثر تعداد، تراکم و مستغرق بودن/نبودن گیاهان را بر رفتار جریان، با انجام آزمایش‌هایی روی استوانه‌هایی به‌عنوان گیاه مطالعه و نیروی کشانه را با تغییر فاصله نسبی (G/D) و ارتفاع نسبی (h/H) اندازه‌گیری کردند (G, D, h, H به ترتیب فاصله استوانه‌ها در مقطع عرضی، قطر استوانه‌ها، ارتفاع استوانه و عمق آب است). تغییر الگوی جریان و ضریب کشانه با تغییر G/D قابل توجه و بزرگ است. ضریب کشانه برای G/D بزرگ به تعداد استوانه‌ها وابسته بوده و الگوی جریان برای $G/D > 1$ تغییر می‌کند. ضریب کشانه در شرایط غیرمستغرق کمی از شرایط مستغرق بزرگتر بوده و با تغییر G/D چندان تغییر نمی‌کند.

(2010) Dehsorkhi و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی اثر گیاهان و اندازه زبری کف (اندازه شن) بر الگوی

۱۰۰ درصد متغیر است. برای محاسبه خسارت‌های ناشی از سیل، شبیه‌سازی عمق و سرعت سیل در هر دوره بازگشت ضروری است (HEC_FDA, 2008; Dutta, 2003; Jonkman, 2007; Huang et al, 2008) از آنجا که مدیریت سیلاب بدون توجه به ویژگی‌های خسارت‌ها غیرعلمی و غیرمنطقی است، برای مدیریت سیل به مطالعه رفتار متقابل گیاهان و جریان سیل نیاز خواهد بود. همچنین برای برآورد خسارت‌های ناشی از سیلاب و نیز تعیین درجه نهایی حفاظت مناطق کشاورزی در برابر سیل لازم است عمق و سرعت بحرانی سیل که باعث شکسته شدن ساقه گیاه می‌شود، تعیین شود.

تحقیقات آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی متعددی در زمینه رفتار متقابل بین گیاه و سیال متحرک انجام شده، اما پیچیدگی مسأله، همواره محققان را وادار به ساده‌سازیهای گسترده در مطالعات می‌کند. مقدار زیادی از دانش امروزی در این زمینه مدیون آزمایش‌های بی‌شماری است که در محدوده وسیعی از شرایط جریان از غیرمستغرق تا مستغرق برای گیاهان صلب و منعطف اجرا شده است (Yang and Choi 2009; Stephan and Gutknecht 2002; Rhee et al. 2008) Choi و Yang (2010) در بررسی تأثیر گیاهان مستغرق بر رفتار جریان، دو مدل دولایه‌ای و سه لایه‌ای را با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که مدل دولایه‌ای برای گیاهان با تراکم زیاد، مقدار متوسط سرعت را بهتر پیش‌بینی می‌کند، اما برای گیاهان با تراکم کم، مدل سه‌لایه‌ای مناسب‌تر است. پیش‌بینی‌های این مدل‌ها به تنش برشی رینولدزی حساس است.

(2009) Choi و Yang دو نوع جریان با کشانه یکسان را برای بررسی تأثیر گیاهان سخت و منعطف بر سرعت متوسط جریان و الگوی آشفتگی با یکدیگر مقایسه کرده و دریافتند که ساقه‌های منعطف تأثیر کمی بر سرعت متوسط جریان دارند، اما مقدار بیشینه تنش برشی رینولدزی را افزایش می‌دهند و شدت آشفتگی عمودی در

می‌دهد. لازم است ذکر شود که اگر گیاه کاملاً در زیر آب باشد این تغییر بسیار ناچیز است. در تحلیل استاتیکی حاضر، گیاه به اجزای بسیار کوچک در عمق تقسیم شد. از آنجا که هر جزء در زیر آب قرار دارد، بنابراین می‌توان هر جزء را استوانه‌ای بدون تغییر در قطر و به صورت مستغرق در نظر گرفت؛ با این فرض، تغییر توزیع نیرو بسیار ناچیز بوده و قابل صرف نظر است. با این فرضها نیروی کشانه وارد شده بر هر جزء با استفاده از سرعت متناظر آن عمق قابل محاسبه است. سپس کل نیروی کشانه وارد شده بر گیاه با انتگرالگیری در طول گیاه به دست می‌آید. بنابراین برای به دست آوردن نیروی کشانه نخست باید توزیع سرعت در عمق در اختیار باشد. پروفیل توزیع سرعت به صورت رابطه (۱) است (Chanson, 1999).

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{h}\right)^{1/n} \quad \text{یا} \quad \frac{u}{u_0} = \frac{n+1}{n} \left(\frac{y}{h}\right)^{1/n} \quad (1)$$

که در آن y ارتفاع از کف کانال، u سرعت در ارتفاع y ، u_{\max} بیشینه سرعت در توزیع موجود، u_0 سرعت متوسط، h عمق جریان و n نمایی بین ۴ تا ۱۲ است که معمولاً مقدار γ را برای آن در نظر می‌گیرند (Chanson, 1999). برای گیاهی که قطر آن بر طبق شکل ۱ از D در کف تا kD در سطح آب به صورت خطی تغییر می‌کند، می‌توان رابطه (۲) را نوشت:

$$d = D - \frac{\gamma}{h}(1-k)D \quad (2)$$

که در آن d قطر ساقه گیاه در ارتفاع y است.

نیروی کشانه‌ای که بر استوانه عمل می‌کند از رابطه (۳) به دست می‌آید (Crowe et al, 2009):

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (3)$$

که در آن F نیروی کشانه، C_D ضریب درگ، ρ چگالی سیال، U سرعت جریان و A مساحت استوانه‌ای است که در راستای جریان قرار دارد.

جریان را مطالعه و توزیع تنش برشی، پارامتر موج^۱، ضریب تصحیح انرژی (α) و ضریب تصحیح مومنتم (β) را در این شرایط ارزیابی کردند. آنان دریافتند که تغییر اثر گیاهان بر ضرایب α و β ، به ضریب موج بستگی دارد.

(Sun and Shiono, 2009) اثر مقاومت جریان را برای کانال مرکب در حضور گیاهان در سیلابدشت مطالعه کرده و دریافتند که توزیع سرعت و تنش برشی مرزی به طور قابل ملاحظه‌ای در حضور گیاهان تغییر می‌کند و تنش برشی مرزی به علت افزایش مقاومت جریان - به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. آنان رابطه‌هایی را برای محاسبه ضریب اصطکاک بر اساس تراکم گیاهان و ویژگی‌های جریان ارائه کردند و دریافتند که فاصله گیاهان و تراکم آنها بر تابع دبی - اشل اثر می‌گذارد.

با توجه به پژوهشهای گذشته، بررسی رفتار متقابل گیاه و جریان و تعیین محل شکست گیاه و حداکثر تنش وارد شده بر ساقه ضروری است. در این پژوهش، نخست روشی تحلیلی برای مطالعه رفتار شکست گیاهان سخت در حالت غیرمستغرق که تحت تأثیر محدوده‌ای از شرایط جریان قرار دارند ارائه و سپس نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی برای گیاه خاص برنج مقایسه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل استاتیکی رفتار متقابل گیاه و جریان

در این بخش رفتار مکانیکی گیاه به طور مجزا و غیرمستغرق در وضعیتی که در معرض نیروی کشانه هیدرولیکی قرار دارد مطالعه می‌شود. قطر گیاه را در حالت کلی می‌توان متغیر در نظر گرفت که این باعث پیچیدگی بیشتر تحلیل می‌شود و از سوی دیگر تغییرات توزیع نیرویی که گیاه تحمل می‌کند، پیچیدگی را افزایش

1. Wave Parameter

-تعیین نقطه شکست گیاه و عمق و سرعت حد

شکست

برای محاسبه نقطه شکست، محاسبه لنگر خمشی لازم است. لنگر خمشی (مومنتم) برای گیاه در عمق y از جمع مومنتم‌ها از عمق y تا سطح آب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M = \int_y^h y dF = \int_y^h y \cdot \frac{1}{2} \rho C_D \left(\frac{n+1}{n} \left(\frac{y}{h} \right)^{1/n} u_0 \right)^2 \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right) dy$$

$$= \frac{1}{2} \rho C_D \left(\frac{n+1}{n} \right)^2 u_0^2 h^2 D \left[\frac{n}{n+2n} - \frac{n}{2+3n} (1-k) - \left(\frac{n}{2+2n} y_*^{2+2} - \frac{n(1-k)}{2+3n} y_*^{2+3} \right) \right]$$

(۷)

و تنش کششی (σ_c) در هر مقطع دلخواه از گیاه، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_c = \frac{Md/2}{I} = \frac{M \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right) / 2}{\frac{\pi}{64} \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right)^4} =$$

$$B \frac{\left[\frac{n}{2+2n} - \frac{n(1-k)}{2+3n} - \left(\frac{n}{2+2n} y_*^{2+2} - \frac{n(1-k)}{2+3n} y_*^{2+3} \right) \right]}{(1-y_*(1-k))^3}$$

(۸)

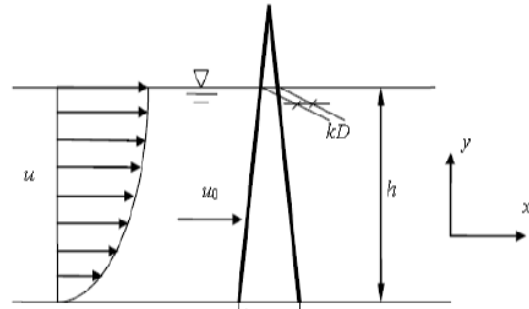
که در آن $I = \frac{\pi}{4} r^4 = \frac{\pi}{64} D^4$ ممان اینرسی ساقه گیاه،

$$B = \frac{16h^2}{\pi D^2} \rho C_D \left(\frac{n+1}{n} \right)^2 u_0^2$$

است. بر این اساس شکل بی‌بعد تنش کششی (σ_{c*}) را می‌توان به صورت تابع زیر تعریف کرد:

$$\sigma_{c*} = BP / \frac{1}{2} \rho u_0^2 = \frac{32}{\pi} \left(\frac{h}{D} \right)^2 C_D \left(\frac{n+1}{n} \right)^2 P \quad (۹)$$

اگر بخواهیم نقطه شکست احتمالی (y_m) یعنی محل وقوع تنش کششی بیشینه σ_m را به صورت دقیق و تحلیلی به دست آوریم، باید مشتق σ_c نسبت به y را برابر صفر قرار دهیم که معادله زیر برای y_m بی‌بعد یعنی y_{m*} به دست می‌آید.



شکل ۱ ساقه گیاه با قطر متغیر در مقابل جریان

۲-۱-۱- بررسی تحلیلی استاتیکی با ضریب کشانه ثابت

-تعیین نیروی کشانه وارد شده بر گیاه

نیروی کشانه کل وارد شده بر گیاه غیرمستغرق منفرد با انتگرالگیری از نیروی کشانه از قاعده گیاه تا سطح آب- و از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$F = \int_0^h \frac{1}{2} C_D \rho \left(\frac{n+1}{n} \left(\frac{y}{h} \right)^{1/n} u_0 \right)^2 \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right) dy \quad (۴)$$

اگر $\frac{y}{h}$ با y_* و $\frac{D}{h}$ با D_* نشان داده شوند، با انتگرالگیری از رابطه (۴) در محدوده صفر تا یک داریم:

$$F = \frac{1}{2} \rho u_0^2 h^2 F_* \quad (۵)$$

که در آن F_* به صورت زیر تعریف شده و نماینده مشخصات غیرهیدرولیکی است:

$$F_* = C_D D_* \left(\frac{n+1}{n} \right) \left(\frac{kn+n+2k}{2(n+2)} \right) \quad (۶)$$

بر اساس تجربه محققان C_D در بخش بزرگی از جریانهای آشفته، برابر $1/2$ در نظر گرفته می‌شود (Groeneveld and French, 1995). لذا نیروی کشانه بی‌بعد (F_*) در مقابل k ، برای مقادیر مختلف قطر بی‌بعد گیاه (D_*) از رابطه (۶)، قابل محاسبه است. بنابراین با استفاده از رابطه (۶) و با در دست داشتن مشخصات جریان یعنی عمق و سرعت، می‌توان نیروی کشانه وارد شده بر گیاه را از رابطه (۵) محاسبه کرد.

۲-۱-۲- تحلیل استاتیکی برای ضریب کشانه متغیر

ضریب کشانه به علت تغییر توزیع سرعت و قطر گیاه در طول ساقه گیاه- متغیر است. برای تحلیل صحیح استاتیکی باید تغییر C_D را نیز در نظر گرفت. در یک عمق معین y سرعت جریان و قطر گیاه به ترتیب با $u(y)$ و $d(y)$ نشان داده می‌شوند. عدد رینولدز در عمق y از رابطه زیر به دست می‌آید (Kundu and Cohen, 2004):

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{ud}{\nu} = \frac{u_0 \left(\frac{n+1}{n} \right) \left(\frac{y}{h} \right)^{1/n} \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right)}{\nu} \\ &= \frac{u_0 h}{\nu} \left(\frac{n+1}{n} \right) y_*^{1/n} D_* [1 - y_* (1-k)] = \quad (11) \\ &Re \left(\frac{n+1}{n} \right) y_*^{1/n} D_* [1 - y_* (1-k)] \end{aligned}$$

C_D را می‌توان بر اساس Re_D از جدول‌های مربوط به دست آورد (شکل ۲۲-۱۰ در Kundu and Cohen, 2004). سپس نیروی کشانه وارد شده بر کل گیاه و مومتم شکست به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} F &= \int_0^h \frac{1}{2} C_D \rho \left(\frac{n+1}{n} \left(\frac{y}{h} \right)^{1/n} u_0 \right)^2 \left(D - \frac{y}{h} (1-k) D \right) dy \\ &= \frac{1}{2} \rho u_0^2 h^2 \left(\frac{n+1}{n} \right)^2 D_* \int_0^1 C_D y_*^{2/n} (1 - (1-k) y_*) dy_* \\ &= \frac{1}{2} \rho u_0^2 h^2 F_* = \frac{1}{2} \rho \nu^2 Re^2 F_* \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= \int_y^h y dF = \frac{1}{2} \rho u_0^2 h^3 \int_{y_*}^1 C_D \left(\frac{n+1}{n} \right)^2 (t_* - y_*) t_*^{2/n} D_* (1 - t_* (1-k)) dt_* \\ &= \frac{1}{2} \rho u_0^2 h^3 M_* = \frac{1}{2} \rho \nu^2 Re^2 h M_* \quad (13) \end{aligned}$$

و تنش کششی وارد شده بر هر مقطع دلخواه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{Md/2}{\pi d^4/64} = \frac{32}{\pi} \frac{\rho u_0^2 h^3 M_*}{h^3 d_*^3} = \quad (14) \\ &\frac{1}{2} \rho u_0^2 \sigma_{c*} = \frac{1}{2h^2} \rho \nu^2 Re^2 \sigma_{c*} \end{aligned}$$

$$-\frac{2}{2+3n}(1-k)y_{m*}^{\frac{2}{n}+3} + \frac{4+n}{2+2n}(1-k)y_{m*}^{\frac{2}{n}+2} - y_{m*}^{\frac{2}{n}+1} + 3n(1-k) \left[\frac{n+k(2+2n)}{(2+2n)(2+3n)} \right] = 0 \quad (10)$$

با حل معادله (۱۰) و محاسبه y_{m*} و جایگذاری آن در معادله (۹)، تنش کششی بیشینه بی‌بعد (σ_m^*) که به ساقه گیاه وارد می‌شود به دست می‌آید. اکنون برای شرایط معین، یعنی عمق و سرعت مشخص جریان، و همچنین با فرض شکستن ساقه گیاه می‌توان با حل همزمان معادله (۸) و (۱۰) ارتفاع نقطه شکست (y_{m*}) و تنش کششی وارد شده بر آن مقطع را که بیشینه تنش کششی در طول ساقه گیاه نیز هست، به دست آورد. برای حالتی که ساقه گیاه نشکند، محل احتمالی شکست یعنی مقطعی که بیشترین تنش کششی را تحمل می‌کند و نیز مقدار تنش بیشینه بی‌بعد، با حل همزمان معادلات (۹) و (۱۰) به دست می‌آید. همانطو که مشخص است برای تعیین شرایط شکست یا شرایط حداکثر تنش کششی، با داشتن عمق یا سرعت حدی یا تنش کششی حدی که باعث شکست گیاه می‌شود، می‌توان پارامترهای دیگر را به دست آورد. برای مثال با داشتن تنش کششی بیشینه می‌توان به ترکیبی از سرعت و عمق بحرانی شکست رسید و از اینجا با محاسبه عمق جریان، با استفاده از تئوری هیدرولیک جریانهای روباز، سرعت بحرانی شکست را به دست آورد. برای این منظور و برای تعیین تنش کششی بیشینه‌ای که باعث شکست ساقه گیاه می‌شود، می‌توان از آزمایش ساده کشش در آزمایشگاه مقاومت مصالح استفاده کرده و به‌ازای ترکیب‌های مختلف $h-u$ با داشتن h مقدار u را محاسبه کرد. با توجه به اثر احتمالی تغییر ضریب کشانه بر غیرخطی شدن رفتار نیروی کشانه به ازای تغییر قطر بی‌بعد، در بخش بعدی شرایط نظری حاکم بر پدیده با اعمال ضریب کشانه متغیر مطالعه می‌شود.

- مشخصات فلوم و چیدمان گیاهان

آزمایشها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس (تهران) و در فلومی مستطیلی به طول ۱۰، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام شد. شیب این فلوم از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۲۵ قابل تنظیم است که در این آزمایشها از تمامی این محدوده برای ایجاد سرعت‌های مختلف جریان در کانال استفاده شد. آب توسط پمپ به داخل مخزن ورودی فلوم وارد می‌شود و پس از آرام شدن جریان در مخزن ورودی، به فلوم وارد و پس از عبور از فلوم به مخزن دیگری تخلیه می‌شود. سیستم تأمین آب بسته و گردشی است. دبی به وسیله دبی‌سنج و عمق در هر مقطع توسط عمق‌سنج خوانده می‌شود.

شکل ۲-الف نمایی از فلوم را نشان می‌دهد. برای ثابت کردن گیاهان از یونولیت استفاده و گیاهان توسط چسب آکواریوم بر روی یونولیت تثبیت شد. برای این کار از ابتدا تا انتهای کانال، یونولیت به ضخامت ۵ سانتی‌متر چسبانیده شد تا علاوه بر ایجاد امکان چسباندن گیاه بر روی یونولیت، یکنواختی جریان از بین نرود. در هر آزمایش ۲۱ گیاه به طور تصادفی انتخاب و در ۷ ردیف و ۳ ستون به فاصله ۵ سانتیمتر از یکدیگر تثبیت شد. نحوه تثبیت گیاهان در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

که در آن $\sigma_{c*} = \frac{32 M_*}{\pi d_*^3}$ به علت غیرخطی بودن نسبت C_D و Re ، حل تحلیلی این معادلات امکان‌پذیر نیست، اما با استفاده از روش‌های عددی، F_* ، σ_{m*} و y_{m*} به‌ازای مقادیر مختلف Re ، k ، D_* و n قابل محاسبه است. به‌منظور تأیید نتایج حاصل از تحلیل تئوری، در مورد تناسب تنش کششی بیشینه با حاصل‌ضرب توان دوم سرعت و عمق، تعدادی آزمایش هیدرولیکی انجام شد.

۲-۲- آزمایشهایی برای مطالعه رفتار متقابل گیاه و جریان

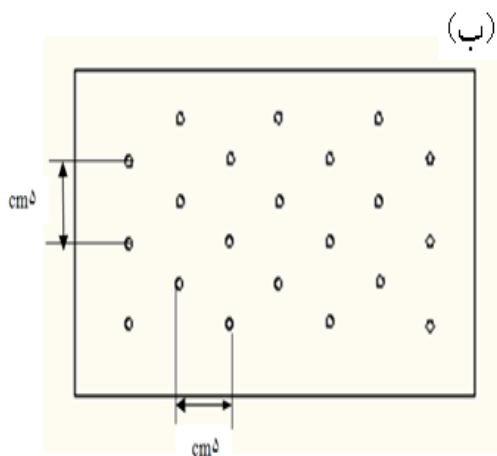
این آزمایشها به‌منظور مطالعه عوامل مؤثر بر خسارت‌های کشاورزی و به طور خاص برای گیاه برنج طرح‌ریزی شده و لذا آنچه بررسی می‌شود، رفتار متقابل گیاه و جریان برای گیاهان غیرمستغرق است. سعی بر آن بوده که در عمق و سرعت حدى شکست گیاهان و نیز محل شکست گیاه تعیین شود.

- مشخصات نمونه‌های انتخابی

مشخصات نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش هیدرولیکی و کشش که به‌طور تصادفی از مزرعه برنج انتخاب شدند در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش هیدرولیکی و کشش

نسبت تغییر قطر (k)	D(mm)	ارتفاع (cm)	مشخصات نمونه	
			نوع آزمایش	
۰/۸۷-۰/۹۶	۴/۳-۷/۱	۸۸-۱۱۰	محدوده تغییر	آزمایش هیدرولیکی
۰/۹۱	۵/۸	۱۰۱/۷۲	متوسط	
۰/۸۹-۰/۹۷	۴/۷-۶/۹	۹۱-۱۰۵	محدوده تغییر	آزمایش کشش
۰/۹۳	۵/۴	۹۹/۸۵	متوسط	



شکل ۲ الف- فلوم هیدرولیکی آزمایش ب- چیدمان گیاهان

- آزمایشها

پس از تثبیت گیاهان در کانال، دبی فلوم از صفر تا ۰/۰۴۱ مترمکعب بر ثانیه و شیب آن از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۲۵ به تدریج افزایش داده شد و در هر مرحله، دبی، عمق و تعداد گیاهان شکسته شده و ارتفاع شکست گیاه از ریشه ثبت شد. این روند تا جایی ادامه یافت که تمامی نمونه‌ها بشکنند. در هر مرحله، عمق آب در ۱۸ نقطه ثبت شد که ۷ نقطه در محل گیاهان، ۳ نقطه قبل از گیاهان و ۸ نقطه پس از محل گیاهان انتخاب شد. این آزمایش برای هفت گروه از گیاهان یعنی برای ۱۴۷ ساقهٔ برنج انجام شد.

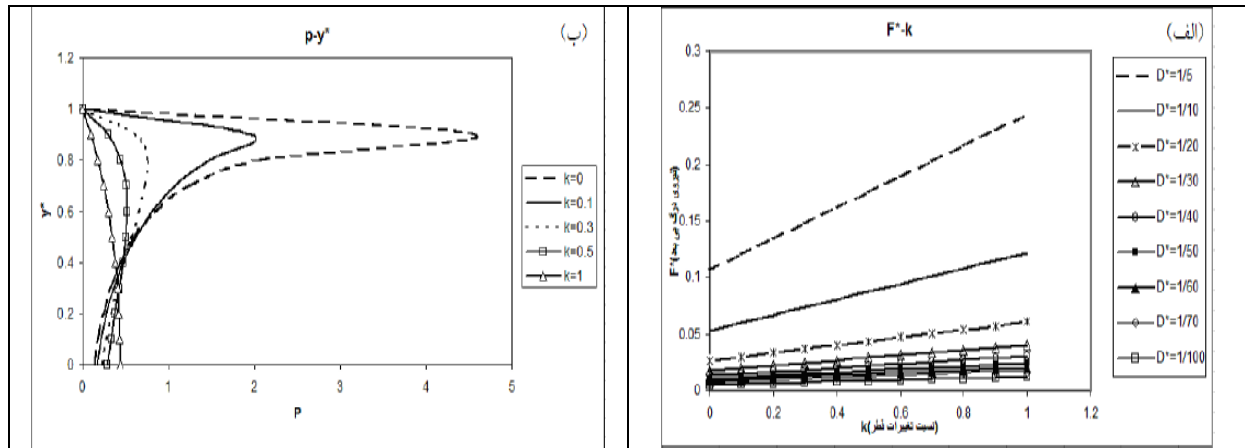
۳- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، نخست معادلات معرفی شده در بخش ۱-۳ برای مطالعهٔ تغییر نیروی کشانه و تنش کششی بیشینه حل شده و مفهوم فیزیکی آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس نقطهٔ شکست، عمق و سرعت حد برای گیاه برنج با استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی تعیین شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۳-۱- حل کلی معادلات نیروی کشانه و تنش

کششی بیشینه

با حل معادله (۶) و با فرض C_D برابر ۱/۲، (Groeneveld and French, 1995) مقادیر نیروی کشانهٔ بی‌بعد (F_*) در مقابل k ، برای مقادیر مختلف قطر بی‌بعد گیاه (D_*) به دست آمد که نتایج در شکل ۳-الف آورده شده است. دیده می‌شود که نیروی کشانه به تغییر k -مگر برای D_* های بزرگ- حساس نیست، اما به تغییر D_* حساس است. برای بررسی توزیع تنش کششی بی‌بعد، حل معادلهٔ (۹) ضروری است، اما از آنجا که σ_{c*} از ضرب کردن P در یک ضریب ثابت به دست می‌آید، از تغییرات تابع P برای نشان دادن تغییرات σ_{c*} استفاده می‌شود. شکل ۳-ب توزیع عمودی تنش کششی بی‌بعد را در هر مقطع دلخواه برای $n=7$ نشان می‌دهد. روشن است که توزیع σ_{c*} برای سایر مقادیر n مشابه خواهد بود. از آنجا که سطح مقطع در معرض جریان، در سطح آب برابر صفر است، بنابراین نیرویی که آب در این مقطع به گیاه وارد می‌کند برابر صفر است و همان‌طور که در شکل ۳-ب دیده می‌شود، تنش در سطح آب، برای تمامی مقادیر k برابر صفر است.



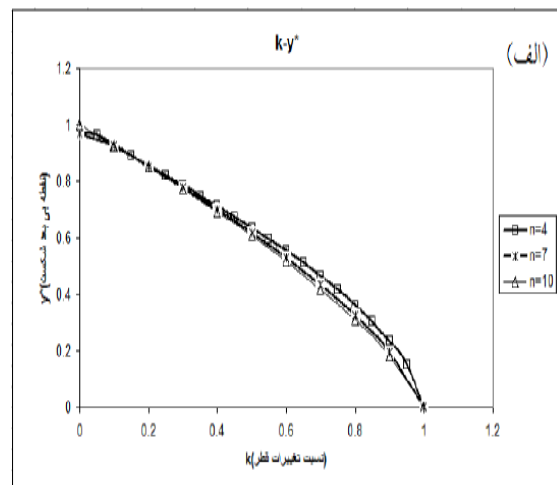
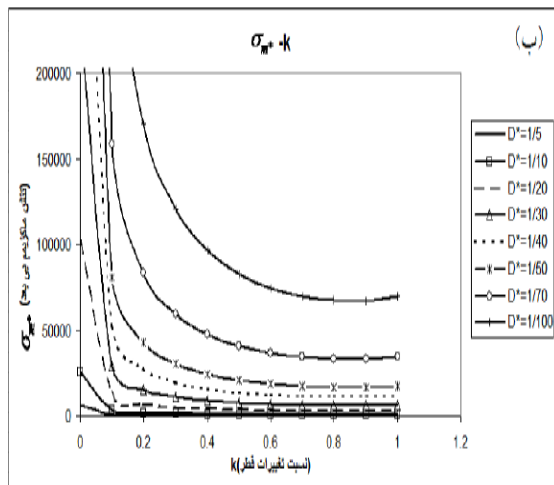
شکل ۳ الف- مقادیر نیروی کشانه بی بعد (F^*) در مقابل k ، برای مقادیر مختلف قطر بی بعد گیاه (D_*)

ب- توزیع عمودی تنش کششی بی بعد در هر مقطع دلخواه برای $n=7$

تحمل می کند و نیز مقدار تنش بیشینه بی بعد باید معادلات (۹) و (۱۰) به طور همزمان حل شود. نتیجه حل این دو معادله، تنش بیشینه بی بعد در مقابل k را برای $10, 7, 4$ و $n=7$ مقادیر مختلف D_* در شکل ۴ نشان می دهد. شکل ۴ نشان می دهد که تنش کششی بیشینه بی بعد با افزایش k و برای مقدار ثابت k با افزایش D_* کاهش می یابد که با نتایج شکل ۳-ب سازگار است. دلیلی که می توان برای کاهش تنش کششی بیشینه در ازای افزایش k ذکر کرد، آن است که تنش کششی با توان سوم قطر گیاه نسبت معکوس دارد. از آنجا که افزایش k با ثابت بودن سایر شرایط، به مفهوم افزایش قطر گیاه در هر مقطع دلخواه است، لذا تنش کششی با افزایش قطر برای هر نقطه از گیاه یا برای هر مقطع جریان کاهش خواهد یافت. همچنین برای مقدار معین k با افزایش D_* - که برای هر عمق ثابت به مفهوم افزایش قطر گیاه است - تنش کششی کاهش خواهد یافت.

همچنین نتایج نشان می دهد که بیشینه تنش کششی (σ_m) برای ساقه گیاه با قطر ثابت ($k=1$)، در کف جریان یا به بیان دیگر نزدیک به قاعده گیاه وارد می شود و نقطه شکست احتمالی در چنین نقطه ای خواهد بود. این ناشی از آن است که وقتی $k=1$ ، قطر گیاه ثابت بوده و تغییر نکردن قطر با عمق بدان مفهوم است که ممان اینرسی تغییری نمی کند و لذا با توجه به معادله (۸)، تنش کششی فقط به لنگر خمشی وابسته می شود.

از آنجا که لنگر خمشی از حاصل ضرب نیروی کشانه در بازوی گشتاور به دست می آید، مقدار آن در نزدیکی کف جریان بیشینه می شود، اما برای گیاهان با قطر متغیر ($k \neq 1$)، تنش کششی، به طور همزمان به تغییر لنگر خمشی و قطر گیاه وابسته خواهد بود و با افزایش لنگر خمشی یا کاهش قطر، افزایش می یابد. بنابراین محل وقوع تنش کششی بیشینه (σ_m) دیگر در قاعده گیاه نخواهد بود و به سمت بالا حرکت می کند. در این جا هر چه k کوچکتر باشد، نقطه شکست احتمالی بالاتر خواهد بود. همان طور که پیشتر گفته شد، برای تعیین محل احتمالی نقطه شکست، یعنی مقطعی که بیشترین تنش کششی را



شکل ۴ الف- تغییر نقطه بی بعد شکست در مقابل تغییر نسبت قطر برای $n=4, 7, 10$
 ب- تنش بیشینه بی بعد در مقابل k (نسبت تغییرات قطر) برای D_* های مختلف

برای به دست آوردن نقطه شکست و نیز شرایط جریانی که باعث شکست می شوند، باید معادلات (۸) و (۱۰) را در کنار معادله مقاومت جریان حل کرد. بیشینه تنش کششی که باعث شکست ساقه می شود (σ_m) از آزمایش ساده کشش که همان آزمایش تعیین مدول الاستیسیته است، تعیین می شود. این آزمایش برای ساقه برنج در مرحله دو برای ۶ نمونه انجام شد که شکل ۵-ب نتایج نمونه را از این آزمایش نشان می دهد.

بر اساس این آزمایشها، میانگین بیشینه تنش کششی برای ۶ نمونه مورد نظر برابر با $1/4785$ مگاپاسکال است. با حل معادله (۱۰)، y_{m*} برابر $0/18$ به دست می آید. سپس معادله (۸) برای سه مقدار C_D یعنی $0/5$ ، $1/1$ و $1/6$ حل و نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

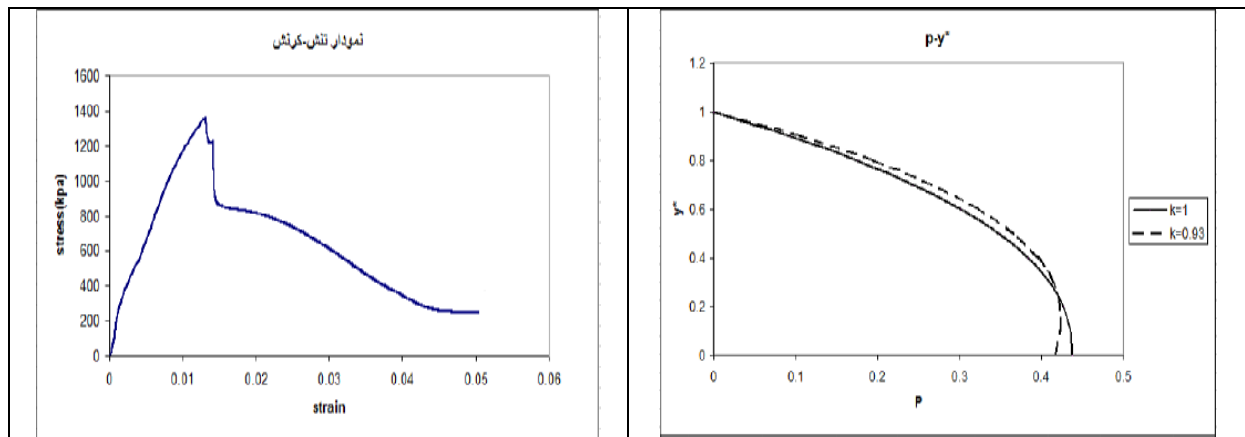
با داشتن مقدار h - که می توان آن را از روندیابی سیل در آبراهه اصلی حوضه برای دوره های مختلف بازگشت، به دست آورد- و با اعمال آن در معادله hu_0 یا استفاده از شکل ۶، سرعت بحرانی شکست برای عمق مورد نظر تعیین می شود.

۳-۲- تعیین نقطه شکست، عمق و سرعت حد برای گیاه برنج به روش تحلیلی و آزمایشگاهی

- تعیین شرایط بحرانی شکست (روش تحلیلی و آزمایش کشش)

هدف این بخش، حل معادلات (۸) و (۱۰) برای ساقه گیاه برنج و به دست آوردن نقطه شکست و عمق و سرعت حد شکست برای آن است. با انتخاب $n=7$ ، تمامی متغیرهای پارامتر P به جز y_* در معادله (۸) مشخص است، بنابراین می توان منحنی $P-y_*$ را برای گیاه برنج ترسیم کرد.

در شکل ۵-الف منحنی تغییر P و در حقیقت تنش کششی نسبت به y_* برای $k=0/93$ برای گیاه برنج ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می شود منحنی $P-y_*$ برای $k=1$ و $k=0/93$ تفاوت معناداری ندارد. این منحنی برای ساقه برنج نشان می دهد که بیشینه تنش وارد شده بر ساقه برنج در نزدیکی ریشه آن بوده و احتمالاً نمونه ها از پایین خواهند شکست.



شکل ۵ الف- منحنی تغییرات P نسبت به y_* برای $k=0.93$ برای گیاه برنج در مقایسه با $k=1$

ب- تنش کششی بیشینه برای ساقه برنج بر اساس آزمایش کشش

جدول ۲ شرایط بحرانی شکست برای ساقه برنج برای مقادیر مختلف C_D

hu_0	D(mm)	k	N	$\rho(kg/m^3)$	C_D
۰/۱۷۴۹	۵/۴	۰/۹۳	۷	۱۰۰۰	۰/۵
۰/۱۱۷۹	۵/۴	۰/۹۳	۷	۱۰۰۰	۱/۱
۰/۰۹۷۷	۵/۴	۰/۹۳	۷	۱۰۰۰	۱/۶

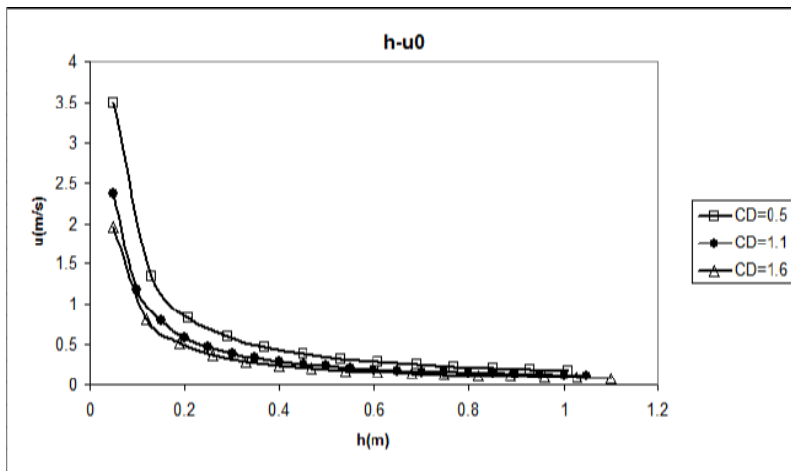
محدوده دبی‌های مورد آزمایش از ۰/۰۲ تا ۰/۱۵ تغییر می‌کند. در بخش تئوری منحنی تغییر نیروی کشانه در مقابل تغییر D_* با ثابت نگاه داشتن h و تغییر D بررسی شد، اما در این بخش به علت تغییرات کم قطر، برای به دست آوردن منحنی‌های مربوط از تغییرات h در مقابل D ثابت استفاده شد. نیروی کشانه بی‌بعد برای مقادیر مختلف k و D_* در رابطه (۶) برای ساقه برنج به دست آمده است.

اکنون با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، سرعت متوسط در هر عمق محاسبه شده و نیروی کشانه برای گیاه برنج با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود که تغییر نیروی کشانه بی‌بعد و نیروی کشانه در مقابل تغییر k برای ساقه برنج در شکل‌های ۷-الف وب قابل مشاهده است.

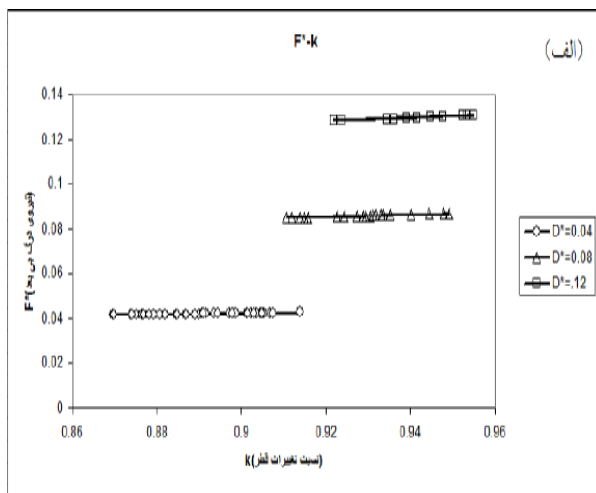
در بخش‌های بعدی نتایج آزمایش‌ها برای ساقه برنج ۱۴۷ و اندازه‌گیری‌ها و محاسبه نیروی کشانه وارد شده بر گیاه، نقطه شکست، عمق، سرعت و تنش کششی حد شکست آورده می‌شود.

- تعیین نیروی کشانه وارد شده بر گیاه برنج (آزمایش هیدرولیکی)

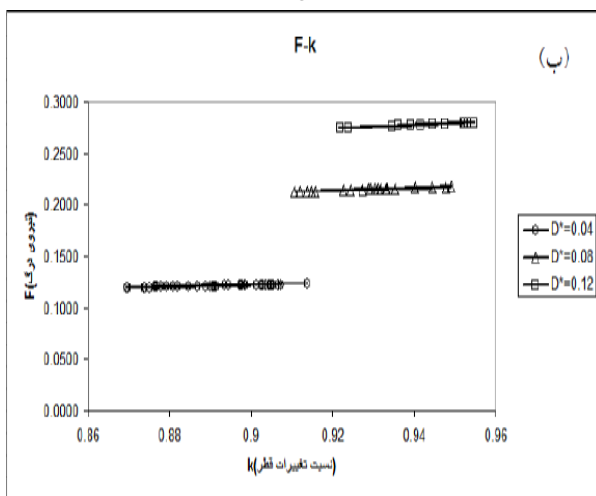
برای تعیین نیروی کشانه، نخست باید C_D را به دست آورد که در اینجا با استفاده از تنش بیشینه حاصل از آزمایش کشش و شرایط شکست حاصل از آزمایش هیدرولیکی و با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۱۰) به طور عکس عمل کرده و C_D برابر ۱/۱ به دست آمد. بر طبق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، مقدار D_* برای نمونه‌ها در



شکل ۶ منحنی عمق-سرعت حد شکست برای ساقه برنج



شکل ۷ الف- نیروی کشانه بی بعد در مقابل نسبت تغییر قطر برای مقادیر مختلف D_*



شکل ۷ ب- نیروی کشانه در مقابل نسبت تغییر قطر برای مقادیر مختلف D_*

بیشینه (y_{m*}) تغییر نمی‌کند که معادله (۱۰) نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد.

نمایش بی‌بعد تنش بیشینه با C_D در شکل ۹ آورده شده است. نتیجه مهم حاصل از این شکل آن است که تعیین درست C_D برای k کوچک (گیاهان با قطر متغیر) اهمیت بیشتری در محاسبه تنش بیشینه شکست و در نتیجه محاسبه شرایط هیدرولیکی حد شکست دارد. اگرچه نسبت تغییر قطر (k) برای گیاه برنج برابر ۰/۹۱ بوده و بر این اساس تغییر تنش کششی بیشینه به‌ازای تغییر C_D اندک خواهد بود، اما این تغییرات در ترکیب با تغییر Re به‌ازای شرایط مختلف جریان ممکن است قابل ملاحظه باشد.

در این راستا لازم است تغییر C_D در مقابل Re یا Re_D دیده شود که C_D را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۱):

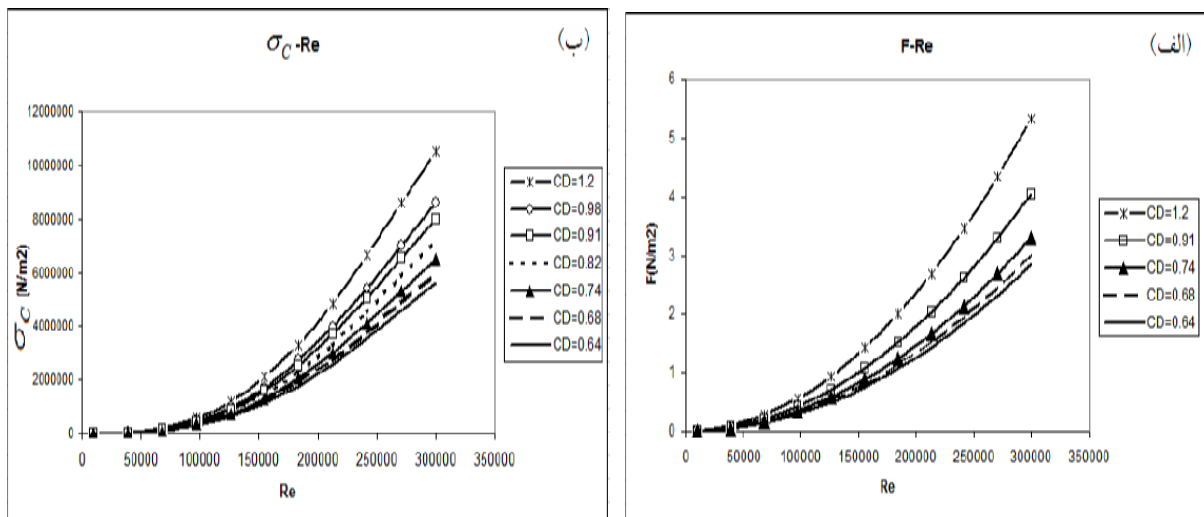
$$\begin{aligned} \sum F &= F_1 + W \sin \alpha - F_2 - F_f - F_D \\ &= \frac{\gamma}{2}(y_1^2 - y_2^2) + \gamma W \sin \alpha - \tau_0 A - \frac{1}{2} \rho C_D A_p v_0^2 \\ &= \rho Q \Delta v = \rho Q (v_2 - v_1) \end{aligned} \quad (18)$$

همان‌گونه که دیده می‌شود، روند تغییر F_* با نتایج تحلیلی مطابقت دارد. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش k و D_* نیروی کشانه بی‌بعد افزایش می‌یابد. همان‌طور که شکل ۳-الف در بخش نظری و شکل‌های ۷-الف و ۷-ب حاصل از نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند، نیروی کشانه به تغییر k مگر برای D_* های بزرگ حساس نیست، اما به تغییر D_* حساس است.

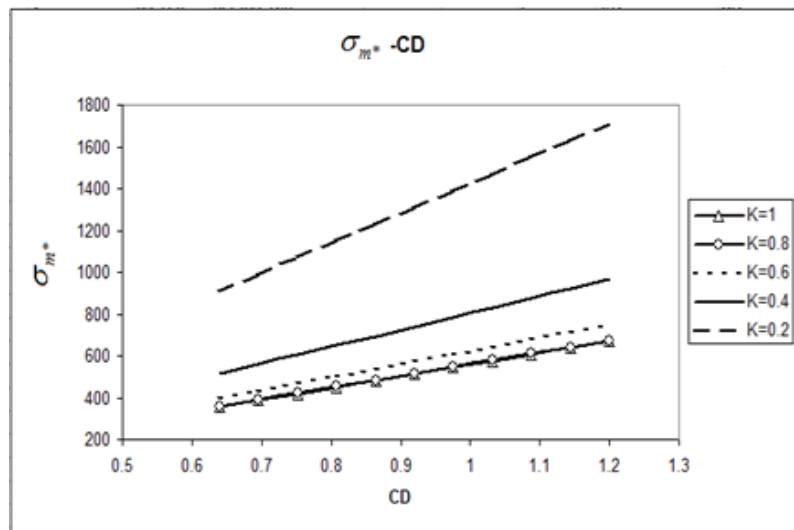
-تأثیر ضریب کشانه متغیر بر شرایط شکست (آزمایش هیدرولیکی)

برای بررسی تأثیر ضریب کشانه بر شرایط شکست، معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) برای محدوده عدد رینولدز در ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ حل شده است. نتایج حاصل در شکل‌های ۸-الف و ب، نشان می‌دهد که نیروی کشانه به‌آرامی با افزایش Re و C_D ، افزایش می‌یابد و بنابراین تنش بیشینه نیز از همان روند تبعیت می‌کند.

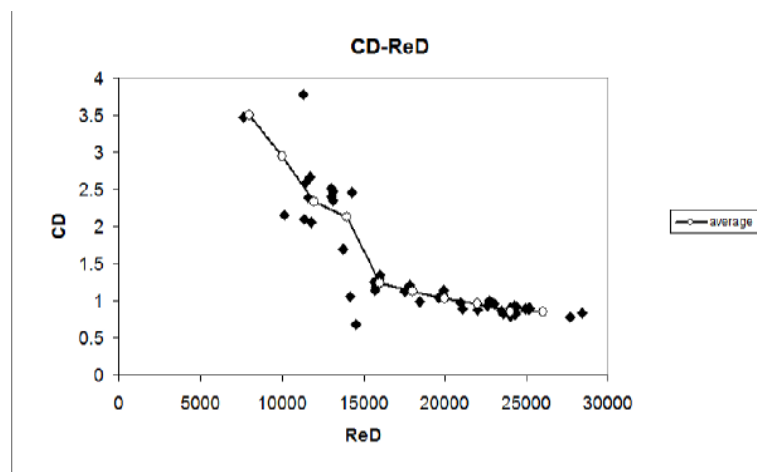
همان‌طور که دیده می‌شود تغییر نیروی کشانه و تنش بیشینه با تغییر ضریب کشانه مگر برای مقادیر بزرگ عدد رینولدز محسوس نیست. با وجود تغییر نیروی کشانه و تنش کششی بیشینه با تغییر Re و C_D ، محل تنش کششی



شکل ۸ الف- نیروی کشانه به‌ازای تغییر اعداد رینولدز و ضریب کشانه ب- تنش بیشینه در مقابل تغییر عدد رینولدز و ضریب کشانه



شکل ۹ تغییرات تنش کششی پیشینه بی بعد در مقابل ضریب کشانه به ازای نسبت تغییر قطر



شکل ۱۰ تغییر C_D نسبت به Re_D برای گیاه برنج

سرعت (Re_D مشخص C_D به دست می آید. شکل ۱۰ تغییرات C_D را نسبت به Re_D بر اساس آزمایشهای انجام شده برای گیاه برنج نشان می دهد.

- نتایج تعیین نقطه شکست، عمق، سرعت و تنش کششی حد شکست (آزمایش هیدرولیکی) آزمایشها نشان می دهد که متوسط نقطه شکست در ۰/۶۷ سانتیمتری کف قرار دارد (بنابر آزمایشها $y_{m*} = 0.11$) و

که در آن F_1 و F_2 به ترتیب نیروی فشاری وارد بر سیال در مقاطع ۱ و ۲، F_f نیروی اصطکاکی، F_D نیروی کشانه ناشی از گیاهان، γ وزن مخصوص سیال، y_1 و y_2 ارتفاع سیال در مقاطع ۱ و ۲، V حجم سیال، α زاویه بین کف کانال و افق، τ_0 تنش برشی وارد شده بر کف، ρ چگالی سیال، A_p مساحت گیاه در مقابل جریان، n تعداد گیاهان، v_0 سرعت متوسط، Q دبی جریان و v_1 و v_2 به ترتیب سرعت جریان در مقطع ۱ و ۲ است. به ازای هر عمق و

گیاهان با قطر متغیر ($k \neq 1$) محل وقوع بیشینه تنش کششی (σ_m) به سمت بالا حرکت می‌کند و هر چه k کوچکتر باشد، نقطه شکست احتمالی بالاتر خواهد بود.

- تنش کششی بیشینه با افزایش k (برای گیاهان با قطر یکنواخت‌تر) کاهش می‌یابد.

- تنش کششی بیشینه برای مقدار ثابت k با افزایش D_* به طور غیرخطی کاهش می‌یابد.

- نیروی کشانه بی‌بعد (F_*) و تنش کششی بیشینه، با افزایش عدد رینولدز، به‌طور غیرخطی افزایش می‌یابد.

- ترکیب نتایج آزمایش کشش و روش تحلیلی نشان داد که تغییر C_D تأثیر قابل توجهی بر شرایط شکست می‌گذارد و لذا تعیین درست C_D برای محاسبه شرایط شکست ضروری است.

- نتایج بررسی شرایط شکست با ضریب کشانه متغیر نشان می‌دهد که نیروی کشانه و تنش بیشینه به آرامی با افزایش عدد رینولدز (Re) و C_D ، افزایش می‌یابد، اما این تغییر، مگر برای مقادیر بزرگ عدد رینولدز محسوس نیست.

- با وجود تغییر نیروی کشانه و تنش کششی بیشینه با تغییر Re و C_D ، محل وقوع تنش کششی بیشینه (y_{m*}) تغییر نمی‌کند.

- بررسی تغییرات تنش کششی بیشینه با تغییر C_D و k نشان داد که تعیین درست C_D برای k کوچک (گیاهان با قطر متغیر) اهمیت بیشتری در محاسبه تنش بیشینه شکست و در نتیجه محاسبه شرایط هیدرولیکی حد شکست، دارد.

- با استفاده از تنش بیشینه حاصل از آزمایش کشش و شرایط شکست حاصل از آزمایش هیدرولیکی و با استفاده از روابط تحلیلی، ضریب C_D برای ساقه برنج برابر $1/1$ به‌دست آمد.

مقدار متوسط عمق و سرعت حد شکست به ترتیب برابر $0/08$ متر و $1/48$ متر بر ثانیه است. بر اساس نتایج مزبور، شاخص hu برابر $0/1184$ خواهد بود که در مقایسه با نتایج تحلیلی، فقط $0/4\%$ اختلاف را نشان می‌دهد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۸) تنش بیشینه شکست برابر $1/4768$ مگاپاسکال خواهد بود که در مقایسه با نتایج تحلیلی، فقط $0/1\%$ اختلاف وجود دارد. این اختلاف اندک در برآورد عمق و سرعت حد شکست و تنش بیشینه وارد شده بر ساقه گیاه در روش تحلیلی و آزمایشگاهی، روند تحلیل و فرضها را تأیید می‌کند.

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، ابتدا به بررسی تحلیلی استاتیکی رفتار یک گیاه غیرمنعطف و غیرمستغرق با قطر متغیر که به صورت منفرد در مقابل جریان قرار گرفته، پرداخته شد و معادلات کلی نیروی کشانه، گشتاور و تنش کششی وارد شده در هر مقطع از ساقه گیاه برای ضریب کشانه (C_D) ثابت و متغیر استخراج شد. سپس این معادلات با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری حل شده و محل شکست، تنش کششی ماکزیمم و شرایط حد شکست به‌دست آمد. سپس نتایج تحلیلی با انجام یک سری آزمایش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصل عبارتند از:

- نیروی کشانه وارد شده بر گیاه با افزایش قطر بی‌بعد (D_*) و نسبت قطر ساقه در سطح آب به قطر ساقه در کف (k)، افزایش می‌یابد. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نیروی کشانه، به تغییر k (مگر برای D_* بزرگ) حساس نیست، اما به تغییر D_* حساس است.

- برای ساقه گیاه با قطر ثابت، بیشینه تنش کششی در نزدیکی کف جریان وارد می‌شود و لذا نقطه شکست احتمالی در نزدیک قاعده گیاه قرار می‌گیرد، اما برای

F_*	نیروی کشانه بی‌بعد	- یکی از فرضهای اساسی در تحلیل استاتیکی، ثابت بودن ضریب کشانه در تحلیل و در آزمایشها است. نتایج آزمایشگاهی، این فرض را فقط برای عدد رینولدز بیشتر از ۲۰۰۰۰۰ (که شکست ساقه برنج همواره در این محدوده رخ می‌دهد) تأیید می‌کند و لذا تحلیل استاتیکی برای گیاهانی که برای عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰۰۰ می‌شکنند، قابل استفاده نیست.
σ_c	تنش کششی	- مقایسه روش تحلیلی و آزمایشگاهی برآورد عمق و سرعت حد شکست، اختلافی را برابر ۰/۱ درصد نشان می‌دهد.
y_m	نقطه شکست احتمالی	- اختلاف تنش بیشینه وارد شده برگیه در دو روش آزمایشگاهی و تحلیلی برابر ۰/۵٪ است.
σ_m	تنش کششی حداکثر در طول ساقه	- نتایج آزمایشگاهی هیدرولیکی، روش ارائه شده در بخش تحلیلی را تأیید می‌کند، بنابراین می‌توان برای محاسبه شرایط حد شکست از روش تحلیلی در کنار آزمایش کشش (به‌جای آزمایش هیدرولیکی) که بسیار ساده و کم‌هزینه بوده و در مدت زمان بسیار کمی قابل انجام است، به روش ارائه شده در این تحقیق استفاده کرد.
y_{m*}	نقطه شکست بی‌بعد	- تحلیل این مقاله برای سایر گیاهان غیر منعطف نیز قابل استفاده است و با استفاده از آن می‌توان عمق و سرعت حد شکست و محل شکست را محاسبه کرد.
σ_m^*	تنش کششی حداکثر بی‌بعد در طول ساقه	
Re_D	عدد رینولدز در عمق y	
γ	وزن مخصوص سیال	
α	زاویه بین کف کانال و افق	
τ_0	تنش برشی وارد بر کف	
A	مساحت استوانه‌ای که در راستای جریان قرار دارد	
A_p	مساحت گیاه در مقابل جریان	
D	قطر گیاهان در کف جریان	
d	قطر ساقه گیاه در هر ارتفاع y از گیاه	
F	نیروی کشانه	
F_2 و F_1	نیروی فشاری وارد بر سیال در مقاطع ۱ و ۲	
F_D	نیروی کشانه ناشی از گیاهان	
F_f	نیروی اصطکاکی	
G	فاصله بین گیاهان در راستای جریان	
h	عمق جریان	
H	ارتفاع استوانه	
I	ممان اینرسی ساقه گیاه	
k	نسبت تغییرات قطر گیاه	
L	فاصله بین گیاهان در راستای عمود بر آن	
M	لنگر خمشی (مومنتم)	
n	نمایی است که از ۴ تا ۱۲ تغییر می‌کند	
P	یک تابع بی‌بعد از y_*	
Q	دبی جریان	
Re	عدد رینولدز	
U	سرعت جریان	
u	سرعت در ارتفاع y	
V	حجم سیال	
v_0	سرعت متوسط	

۵- فهرست علائم

α	فاکتور تصحیح انرژی
β	فاکتور تصحیح مومنتوم
u_{max}	سرعت حداکثر در پروفیل سرعت
u_0	سرعت متوسط
C_D	ضریب کشانه
ρ	چگالی سیال
y_*	عمق بی‌بعد در هر مقطع از جریان
D_*	قطر بی‌بعد گیاه

Jonkman, S.N. (2007). Loss of life estimation in flood risk assessment, PhD thesis Delft University, 360 Pages.

Kundu, P. K. and Cohen, I. M. (2004). Fluid Mechanics, 3rd Ed., Elsevier Academic Press.

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.

Sun, X. and Shiono, K. (2009). Flow resistance of one-line emergent vegetation along the floodplain edge of a compound open channel, Advances in Water Resources, 32, 3: 430-438

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.

Tanaka, N., and Yagisawa, J. (2010). Flow structures and sedimentation characteristics around clump-type vegetation, Journal of Hydro-Environment Research, 4, 1: 15-25

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

Yang, W. and Choi, S. (2010). Development of mean flow model for depth-limited vegetated open-channel flows, Journal of Korea Water Resources Association, 43, 9, 823-833

v_2 و v_1

سرعت جریان در مقاطع ۱ و ۲

y

ارتفاع از کف کانال

y_2 و y_1

ارتفاع سیال در مقاطع ۱ و ۲

۶- منابع

حسینی، م. و ابریشمی، ج. (۱۳۸۱). هیدرولیک کانالهای باز، دانشگاه فردوسی مشهد، ص. ۶۱۳

Berning, C., Viljoen, M.F. and Plessis, L.D. (2000). Loss functions for sugar-cane: Depth and duration of inundation as determinants of extent of flood damage, Water SA, 26, 4, 527,530

Chanson, H. (1999). The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Butterworth Heinemann, London, UK.

Crowe, C.T., Elger, D.F., Williaams, B.C., and Roberson, J.A. (2009). Engineering Fluid Mechanics, USA, John Wiley & Sons, Inc.

Dehsorkhi, E.N., Afzalimehr, H. and Sui, J.Y. (2010). Effects of vegetation channel banks and gravel size on flow structure, International Journal of Sediment Research, 25, 2 : 110-118

Dutta, D. (2003). A mathematical model for flood loss estimation, Journal of Hydrology 277:24-49.

Groeneveld, D. P. and French, R. H. (1995). Hydrodynamic control of an emergent aquatic plant (scirpus-acutus) in open channels, Water Resources Bulletin, 31, 3:505-514.

HEC-FDA, (2008). Flood Damage Reduction Analysis, User Manual Version 1.2.4, Us Army Corps of Engineers, Water Resources Hydrologic Engineering Center.

Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T., Benjamin, A., Wen, S. W., Li, S., Liu, A., Li, X., Fen, S. and Li, X. (2008). Flood hazard in Hunan province of China: an economic loss analysis, Nat Hazards, 47: 65-73.