

تخمین ضریب درگ در کانال‌های روباز با پوشش گیاهی مستغرق با استفاده از تحلیل پارتو و برنامه‌ریزی بیان چندژنی

حسین ریاحی مدوار*

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۲/۲۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۶/۱۵)

چکیده

یکی از مشخصه‌های مهم در مطالعه هیدرولیکی و اکوهیدرولوژیکی جریان در رودخانه‌ها، مقاومت پوشش گیاهی در مقابل جریان، نیروی درگ و ضریب درگ به دست آمده است. ضریب درگ تابع خصوصیات جریان، مشخصات تراکم و توزیع پوشش گیاهی است و اغلب با استفاده از روابط تجربی که دقت مطلوبی ندارند، تخمین زده می‌شود. در تحقیق حاضر، با هدف بهبود دقت و استخراج روابط بهینه برای ضریب درگ جریان در کانال‌های روباز حاوی پوشش گیاهی مستغرق، از رویکرد بهینه‌سازی پارتو و برنامه‌ریزی بیان چندژنی در ترکیب با الگوریتم دسته‌بندی حداکثر عدم تشابه استفاده شده است. با آنالیز ابعادی، متغیرهای حاکم بر پدیده به صورت بدون بعد استخراج شده و سپس، تعداد ۹۱۰ سری داده اندازه‌گیری شده مربوط به ضریب درگ پوشش گیاهی، مشخصات هیدرولیکی جریان و پوشش گیاهی تهیه شد و روابط صریحی برای تخمین ضریب درگ به دست آمد. بررسی نتایج مدل پیشنهادی نشان داد مدل یادشده با $R^2=0.9$, $RMSE=0.41$, $MPE=17\%$ بسیار بیشتری نسبت به روابط تجربی دارد و ۲۰ درصد کمتر بودن خطای رابطه بهینه پیشنهادی از روابط تجربی، بیانگر کارایی مطلوب آن است. همچنین، تحلیل مفهومی رابطه پیشنهادی نشان داد علاوه بر سادگی فرم رابطه بهینه، مفاهیم فیزیکی حاکم بر پدیده و اجزای مؤثر بر مقاومت درگ جریان را نیز به خوبی استنتاج کرده است. بنابراین، کارآمدی مدل جدید پیشنهادی نسبت به مطالعات قبلی تأیید شده است و می‌توان از نتایج آن در مطالعات و مدل‌های هیدرولیکی و اکوهیدرولوژیکی جریان در رودخانه‌ها و کانال‌ها در شرایط وجود پوشش گیاهی استفاده کرد.

کلیدواژگان: بهینه‌سازی پارتو، پوشش گیاهی، ضریب درگ، مقاومت جریان، مدل بیان چندژنی.

مقدمه

وجود پوشش گیاهی در رودخانه‌ها و وتلندهای آبی با ایجاد مقاومت اضافه، تأثیر زیادی بر فرایندهای هیدرودینامیکی، هیدرولیکی، فیزیکی و بیولوژیکی اکوسیستم‌های آبی دارد [۱]. در جریان کانال‌های روباز در حضور پوشش گیاهی علاوه بر مقاومت برشی مرزها، نیروی مقاومت و درگ به وجود آمده از ساقه، شاخ و برگ گیاهان نیز مؤثر است [۲]. درگ به وجود آمده از پوشش گیاهی سبب کاهش دبی جریان، کاهش سرعت جریان، افزایش تراز سطح آب، کاهش ظرفیت انتقال، تسکین و تخفیف سرعت سیلاب، افزایش ریسک سیل‌گرفتگی، و کاهش فرسایش و افزایش ته‌نشینی رسوبات در کانال‌ها و رودخانه‌ها می‌شود [۳] و تخمین ضریب درگ براساس مطالعات آزمایشگاهی با استوانه‌های با قطر d در نقش پوشش گیاهی انجام شده است [۳-۵]. تأثیر مقاومت به وجود آمده از پوشش گیاهی توسط نیروی درگ و ضریب درگ C_d طبق رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A U_{ref}^2} \quad (1)$$

که در این رابطه، F_D نیروی درگ به وجود آمده از پوشش گیاهی، τ جرم مخصوص آب، A مساحت پوشش گیاهی در مقابل جریان که برای استوانه برابر dL است، L ارتفاع استوانه داخل آب و U_{ref} سرعت مرجع است. با توجه به شدت تراکم پوشش گیاهی، سرعت متوسط منفذی U_p ، $U_p = U / (1 - \lambda) = Q / (Wh (1 - \lambda))$ پارامتر مناسب‌تری نسبت به سرعت جریان در بالادست است [۶]. در اینجا W عرض جریان، $\lambda = \pi n d^2 / 4$ درجه تراکم پوشش گیاهی در واحد سطح و n تعداد استوانه‌ها در واحد سطح بستر است. در مطالعات متعددی پارامتر U_p به عنوان سرعت مبنا در محاسبات ضریب درگ استفاده شده است [۳، ۷ و ۸]. ضریب درگ C_d معمولاً به روش مستقیم و از طریق اندازه‌گیری مستقیم نیروی درگ با استفاده از سنسورهای فشار و نیرو [۹ و ۱۰] و یا از طریق تعادل نیروهای مقاومتی مؤثر بر پوشش گیاهی [۱۱] تعیین می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم نیز ضریب درگ از طریق مدل‌سازی عددی و سه‌بعدی میدان جریان و آشفتگی [۱۲ و ۱۳]

محاسبه می‌شود و یا اینکه با استفاده از روابط تجربی [۲، ۱۴-۱۶] تخمین زده می‌شود. در فقدان تجهیزات آزمایشگاهی، اندازه‌گیری مستقیم نیروی درگ، C_d با تعادل نیروها در واحد جرم سیال عبوری از پوشش گیاهی تعیین می‌شود (رابطه ۲):

$$(1 - \lambda) C_b U^2 + \frac{1}{2} C_D a h U^2 = (1 - \lambda) g h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

در این رابطه ضریب مقاومت اصطکاک $C_b = 0.001$ ، h عمق جریان، $\frac{\partial h}{\partial x}$ در جریان غیریکنواخت شیب سطح آب و در جریان یکنواخت شیب بستر کانال، a تراکم در واحد سطح است. در این رابطه عبارت اول سمت چپ درگ به وجود آمده از مقاومت بستر است که ۰/۸۲ تا ۶ درصد مقاومت کل جریان را به خود اختصاص می‌دهد و نسبت به مقاومت درگ پوشش گیاهی ناچیز است. عبارت دوم سمت چپ، درگ به وجود آمده از پوشش گیاهی است. با توجه به ناچیز بودن مقاومت بستر نسبت به مقاومت درگ، C_d از رابطه ۳ قابل محاسبه است:

$$C_d = \frac{2g(1-\lambda) \frac{\partial h}{\partial x}}{aU^2} \quad (3)$$

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری با استفاده از روش‌های محاسباتی هوشمند سیستم استنتاج نروفازی، شبکه عصبی مصنوعی، برنامه‌نویسی ژنتیک^۱ (GP)، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌نویسی بیان ژن^۲ (GEP) در تحلیل فرایندهای هیدرولیکی به عنوان جایگزین روش‌های کلاسیک انجام شده است [۱۵]. پیش‌بینی ضریب پراکندگی طولی در جریان کانال‌های روباز [۱۵]، برآورد مقاومت جریان در پوشش گیاهی [۱۶]، برآورد ظرفیت انتقال جریان در مقاطع مرکب [۱۷]، فرسایش پایاب سرریزها و سازه‌های آبی [۱۸]، دبی جریان رودخانه [۱۹]، سرعت جریان عبوری از درون پوشش گیاهی [۲۰] از جمله مواردی هستند که کاربرد موفق مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی بیان ژن در مهندسی رودخانه را نشان می‌دهند. با توجه به محدودیت‌های موجود در زمینه اندازه‌گیری مستقیم و تخمین دقیق ضریب C_d از یک طرف و اهمیت ویژه این ضریب در مطالعات اکوهیدرولوژی، جریان،

که در این رابطه ad درجه تراکم پوشش گیاهی و a تراکم در واحد سطح است. کوتیاری و همکاران (۲۰۰۹) با برآزش رگرسیون چندگانه بر داده‌های آزمایشگاهی رابطه γ را برای ضریب درگ پیشنهاد داده‌اند [۷]:

$$C_d = 1.53(1 + 0.45 \ln(1 + 100\lambda)) R_e^{-3/50} \quad (7)$$

تانینو و نپ (۲۰۰۸) براساس رابطه ارگان (۱۹۵۲) که افت انرژی روی بستر متخلخل را بیان می‌کند، رابطه λ را برای محاسبه ضریب درگ جریان عبوری از درون پوشش گیاهی ارائه داده‌اند [۸]:

$$C_d = 2 \left(\frac{\alpha_0}{R_e} + \alpha_1 \right) \quad (8)$$

که در این رابطه α_0 نشان‌دهنده مقاومت و افت انرژی مربوط به تنش برشی سیال و لزجت سیال روی پوشش گیاهی است و α_1 مقاومت و افت انرژی مربوط به اینرسی سیال و جریان در برخورد با پوشش گیاهی است و اثرات مقاومت تنش برشی جداره پوشش گیاهی و مقاومت توده پوشش گیاهی را شامل می‌شود. تانینو و نپ در نهایت رابطه ۹ را برای تخمین ضریب درگ پیشنهاد داده‌اند:

$$C_d = 2(0.46 + 3.8\lambda) \quad (9)$$

چنگ و گوین (۲۰۱۱) با تعریف شعاع هیدرولیکی متناسب با پوشش گیاهی به صورت $r_v = \pi(1-\lambda)d/(4\lambda)$ و استفاده به عنوان مقیاس طول در محاسبه عدد رینولدز، رابطه ۱۰ را برای ضریب درگ پیشنهاد داده و با برآزش آن بر داده‌های موجود رابطه ۱۰ را برای ضریب درگ پیشنهاد داده‌اند [۲]:

$$C_d = \frac{50}{Re^{0.43}} + 0.7 \left(1 - \exp\left(\frac{-Re}{15000}\right) \right) \quad (10)$$

همچنین، تینوکو و کاوان (۲۰۱۳) نیز رابطه ۱۱ را برای ضریب درگ براساس درجه تراکم پوشش گیاهی و مستقل از عدد رینولدز پیشنهاد داده‌اند:

$$C_d = 2(0.58 + 6.49\lambda) \quad (11)$$

چنگ (۲۰۱۳) با استفاده از مفهوم مدل شبه‌سیال و تعریف قطر بدون بعد $d^* = (2C_d Re^2 / \pi)^{1/3}$ رابطه ۱۲ را برای ضریب درگ پیشنهاد داده است [۵].

رسوب و آلودگی در رودخانه‌های با پوشش گیاهی، تحقیق حاضر با هدف توسعه روابط بهینه برای تخمین ضریب C_d با دقت و کارایی بهتر و محدوده شرایط وسیع‌تر نسبت به روابط تجربی قبلی انجام شده است. نوآوری اصلی تحقیق حاضر، توسعه روابط با مبنای فیزیکی برای تخمین ضریب درگ C_d با رویکرد ترکیب انتخاب زیرمجموعه‌ها با روش حداکثر عدم تشابه^۱ (SSMD) و بهینه‌سازی پارتوی برنامه‌ریزی بیان چندژنی^۲ (POMGGP) با استفاده از یک پایگاه داده‌ای وسیع و بهبود دقت تخمین C_d نسبت به روابط قبلی است.

مواد و روش‌ها

روابط تخمین ضریب درگ جریان در کانال‌های با پوشش گیاهی

روابط مختلفی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی و عددی و تحلیل تجربی برای C_d پیشنهاد شده است که در این مطالعه بررسی و ارزیابی شده‌اند. رابطه ضریب درگ جریان اطراف یک استوانه منفرد به صورت رابطه ۴ توسط وایت (۲۰۰۶) پیشنهاد شده است [۲۱]:

$$C_d = 1 + R_e^{-2/3} \quad (4)$$

که در این رابطه $Re = \rho U d / \mu$ عدد رینولدز است و μ لزجت دینامیکی آب است. توجه شود که برای یک تک‌استوانه $\lambda = 0$ و $U = U_p$ است. نات و همکاران (۱۹۹۶) با استفاده از مدل‌سازی عددی و مدل آشفته $k-\epsilon$ معادله ۵ را برای ضریب درگ پیشنهاد داده‌اند [۲۴]:

$$C_d = \frac{1000}{R_e^{0.25}} \text{ for } Re \leq 1000 \quad (5)$$

$$C_d = \text{Min} \left(0.976 + \left(\frac{0.001}{20.5 R_e^2} \right)^2, 1.15 \right) \text{ for } 1000 < Re < 10000$$

ژیبرتی و نپ (۲۰۰۴) نیز با مدل‌سازی عددی میدان جریان عبوی از درون پوشش گیاهی رابطه ۶ را برای محاسبه ضریب درگ ارائه داده‌اند [۲۵]:

$$C_{dc} = 1 + 10 R_e^{-2/3} \quad (6)$$

$$C_d = \frac{C_{dc}}{1.16} \{ 1.16 - 9.31(ad) + 38.6(ad)^2 - 59.8(ad)^3 \}$$

رابطه‌ای با دقت بهتر نسبت به روابط و روش‌های قبلی برای تخمین ضریب درگ توسعه یافته است.

آنالیز ابعادی و داده‌های آزمایشگاهی

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، طبق مطالعات و روابط توسعه‌یافته قبلی، ضریب درگ در جریان عبوری از پوشش گیاهی تابعی از مشخصات هیدرولیک جریان، خصوصیات پوشش گیاهی و هندسی پدیده است (رابطه ۱۶) [۳]:

$$\Phi_{C_d}(C_d, d, L_x, L_y, U_p, \mu, \rho, \lambda, \xi) = 0 \quad (16)$$

که در این رابطه L_x فاصله بین دو ردیف پوشش گیاهی در جهت جریان، L_y رابطه بین دو ردیف پوشش گیاهی در جهت عرضی، ξ ضریب بدون بعد بیانگر الگوی توزیع پوشش گیاهی، Φ_{C_d} فرم تابعی پدیده است و بقیه پارامترها پیش‌تر معرفی شده‌اند. با انتخاب d, U_p, ρ به عنوان متغیرهای اصلی و انجام آنالیز ابعادی تابع زیر به دست می‌آید (رابطه ۱۷):

$$\Phi_{C_d}\left(C_d, \frac{d}{L_x}, \frac{d}{L_y}, \frac{\rho U_p d}{\mu}, \lambda, \xi\right) = 0 \quad (17)$$

در این رابطه پارامتر دوم نیز از ترکیب پارامتر سوم و λ قابل محاسبه است و حذف می‌شود. پارامتر بدون بعد سوم به عنوان ضریب انسداد پوشش گیاهی ($\psi = \frac{d}{L_y}$) تعریف می‌شود و پارامتر چهارم عدد رینولدز گیاه Re_p است [۱، ۳ و ۱۶]. پارامتر ξ اثرات الگوی توزیع پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و به علت تأثیرگذاری اندک و مشکلات اندازه‌گیری آن در تحقیقات قبلی از آن صرف نظر شده است [۱، ۳، ۸، ۲۶ و ۲۷] و در این تحقیق نیز به علت نبود داده‌های آزمایشگاهی حذف شده است. بنابراین، فرم نهایی و بدون بعد رابطه پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در جریان عبوری از درون پوشش گیاهی به صورت رابطه ۱۸ استفاده شد و سه متغیر بدون بعد به عنوان پارامترهای ورودی مدل POMGGP و ضریب درگ به عنوان پارامتر خروجی انتخاب شده است:

$$C_d = \Phi_{3, C_d}(\psi, Re_p, \lambda) \quad (18)$$

در مطالعه حاضر تعداد ۹۱۰ سری داده اندازه‌گیری ضریب درگ که از مطالعات محققان مختلف [۸، ۱۶، ۲۳ و ۲۸] گردآوری و پالایش شده است، استفاده شد. در جدول ۱، محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد در مجموعه داده‌های استفاده‌شده در تحقیق حاضر ارائه شده است.

$$C_d = 11 \left[\left(\frac{1+S}{1+80\lambda} Re \right)^{-0.75} + 0.9 [1 - \exp(-1000 \frac{1+80\lambda}{Re(1+S)})] + 1.2 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{1+S}{4500(1+80\lambda)} Re\right)^{0.7}\right) \right] \right] \frac{1+s}{1+\lambda} \quad (12)$$

که در این رابطه Re عدد رینولدز مبتنی بر سرعت متوسط حفره‌ای U_p و قطر استوانه d به صورت $Re = \rho U_p d / \mu$ است. با توجه به اینکه در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی تراکم پوشش گیاهی وجود دارد و تأثیرات برهمکنش پوشش گیاهی و میدان‌های جریان ثانویه وجود دارند، استفاده از رابطه تک‌استوانه‌یاد شده دقت مطلوبی ندارد. به همین منظور، با تغییر مفهوم سرعت‌مینا در محاسبه عدد رینولدز رابطه ۱۳ برای ضریب درگ توسط وان روزین (۲۰۱۸) پیشنهاد شده است [۲۲]:

$$C_{d,c} = 1 + Re_{ec}^{-2/3} \quad (13)$$

که در این رابطه $C_{d,c}$ و Re_{ec} ضریب درگ پوشش گیاهی و عدد رینولدز مبتنی بر سرعت U_c هستند که $U_c = U / (1 - U_c/U)$ (d/L_y و L_y فاصله عرضی بین دو استوانه است. سانولد و همکاران (۲۰۱۸) با توجه به معادله ارگان، معادله ۱۴ را برای تخمین ضریب درگ در جریان عبوری از پوشش گیاهی براساس برازش رگرسیونی ارائه داده‌اند [۲۳]:

$$C_d = 2 \left(\frac{6475d + 32}{Re} + 17d + 3.2\lambda + 0.5 \right) \quad (14)$$

لیو و همکاران (۲۰۲۰) رابطه ۱۵ را برای محاسبه ضریب درگ جریان عبوری از درون پوشش گیاهی پیشنهاد داده‌اند:

$$C_d = \frac{189}{Re} + 0.82 + \psi^2 + 6.02\lambda \quad (15)$$

در این رابطه ψ ضریب انسداد پوشش گیاهی است. بررسی روابط موجود برای ضریب درگ نشان می‌دهد این روابط براساس مدل‌های داده‌مبنای رگرسیونی و یا برازش منحنی با شکل تابع مفروض اولیه، توسعه یافته‌اند و فقط در محدوده داده‌های استفاده‌شده در برازش روابط قابل استفاده هستند و برای شرایطی فراتر از محدوده داده‌های برازش‌یافته دقت قابل اعتمادی ندارند و همچنین، برخی از این روابط از نظر فیزیکی مفهوم مشخصی ندارند [۳]. به همین دلیل، در این تحقیق با گردآوری مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی وسیع‌تر با روش بیان چندزنی

جدول ۱. محدوده تغییرات پارامترهای بدون بعد در مجموعه داده‌های پژوهش

محدوده تغییرات	نماد	پارامتر بدون بعد
۱۰/۷۷ - ۰/۲۳	C_d	ضریب درگ
۰/۰۷ - ۰/۰۰	ψ	نسبت انسداد پوشش گیاهی
۱۰۰۰۰ - ۱۸	R_{ep}	عدد رینولدز
۰/۳۵ - ۰/۰۰۱	λ	تراکم پوشش گیاهی

نقطهٔ اختیار شده در دورترین نقطه از دو نقطهٔ گزینش شدهٔ قبلی انتخاب می‌شود و با همین شیوه دسته داده‌های آموزشی با حداکثر کردن فاصلهٔ حداقل بین زیرمجموعهٔ آموزشی و نقاطی که در مجموعه داده‌های اولیه باقی مانده‌اند، انتخاب می‌شوند. اگر مربع فاصله بین i امین و j امین نقطه به صورت D_{ij}^2 تعریف شود و k نقطهٔ پیش‌تر انتخاب‌شده باشد ($k < p$)، حداقل فاصله از نقطهٔ کاندید N تا k نقطه به صورت رابطهٔ ۲۰ تعریف می‌شود:

$$D_{ij}^2 = x_i - x_j^2 = \sum_{k=1}^p (x_{ki} - x_{kj})^2 \quad (20)$$

$$\Delta_i^2(k) = \min(D_{ii}^2, D_{2i}^2, \dots, D_{ki}^2) \quad i \neq m$$

نقطهٔ N هنوز در زیرمجموعهٔ آموزشی که پیش از این در آن k نقطه بوده‌اند، نیست. نقطهٔ $(k+1)$ ام در زیرمجموعهٔ آموزشی از $N-k$ نقطهٔ دیگر به صورت رابطهٔ ۲۱ انتخاب می‌شود:

$$\Delta_{k+1}^2 = \max(\Delta_i^2(k)) \quad i \neq m \quad (21)$$

که نقطهٔ N متعلق به بقیهٔ مجموعه داده‌ها است که دورترین فاصله از نقاط موجود است. در این مطالعه به ترتیب ۸۰ و ۲۰ درصد کل داده‌ها به عنوان زیرمجموعه‌های آموزش و آزمون با تکنیک SSMD انتخاب می‌شوند. در شکل ۱ توزیع زیرمجموعه‌های آموزش و آزمون انتخابی توسط SSMD نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که تکنیک SSMD قادر به پخش مقادیر حدی بین زیرمجموعه‌های آموزش و آزمون است و این الگوریتم گزینش زیرمجموعه‌ها بر اساس صحیح و خطا را منتفی کرده و قابلیت کاربرد و اعتبار پیش‌بینی‌ها را بهبود می‌بخشد. طبق شکل ۱ تغییرات متغیرها در زیرمجموعهٔ آموزش بزرگ‌تر از زیرمجموعهٔ آزمون است و قابلیت تعمیم مدل‌های برون‌یاب را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، طبق

پیش‌پردازش و دسته‌بندی داده‌ها با SSMD

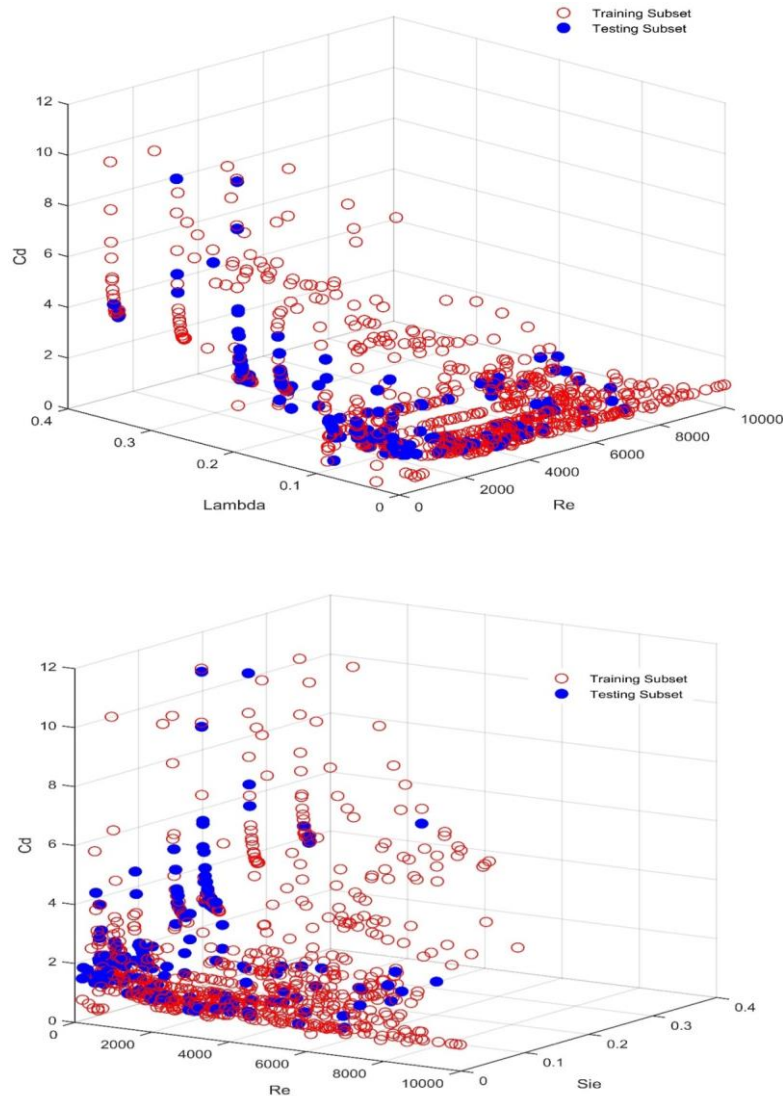
توسعهٔ مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی دسته‌بندی داده‌ها به دو دستهٔ آموزش و آزمایش نیاز دارد که معمولاً دسته‌بندی داده‌های آموزشی و آزمایشی به صورت تصادفی انجام شده است [۲۹-۳۱]. در حالی که برای پیش‌بینی مطلوب و کارآمدی مدل لازم است مدل با دسته‌بندی مناسب داده‌ها و انتخاب الگوی آموزشی مناسب، به طور مطلوب آموزش و واسنجی شود. به همین دلیل، در این قسمت از یک الگوریتم قابل اعتماد برای تقسیم داده‌ها به زیرمجموعه‌ها و استخراج مجموعهٔ آموزشی مناسب استفاده شده است. چنانچه مجموعه داده‌های آموزش هیچ مقادیر حدی از پارامترها را در بر نداشته باشند و این مقادیر در دستهٔ آزمایش قرار داشته باشند، مدل هنگام ارزیابی و آزمایش به خوبی توان برآورد مقادیر حدی را ندارد و باید توزیع مقادیر حدی در هر دو مجموعه یکسان باشد. در غیر این صورت، کاربرد فراگیر مدل‌های آموزش دیده کاهش می‌یابد. در مطالعهٔ حاضر، برای حل این مشکل، از روش انتخاب زیرمجموعه با حداکثر عدم تشابه (SSMD) برای کشف الگوی پنهان داده‌ها برای آموزش و آزمون زیرمجموعه‌ها استفاده می‌شود. فرض کنید X مجموعهٔ داده‌ها به صورت $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ باشد و مجموعه $m = 1, 2, \dots, N$ به عنوان نامزد زیرمجموعهٔ آموزشی تعریف شود (رابطهٔ ۱۹):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{pN} \end{bmatrix} \quad (19)$$

در هر مرحله هدف انتخاب نقاط با حداکثر فاصله و تمایز از پایگاه داده است. نخستین انتخاب برای دستهٔ آموزش، نزدیک‌ترین به میانگین داده‌ها و بعدی در دورترین فاصله از اولین گزینش انتخاب می‌شود. سومین

جریان داخل کانال‌های حاوی پوشش گیاهی است و لزوم استفاده از مدل‌های قدرتمند در استخراج روابط پنهان بین متغیر هدف را مشهود می‌سازد.

این شکل مشاهده می‌شود که همبستگی و رابطه قوی و مستقیمی بین متغیرهای مؤثر با ضریب درگ وجود ندارد و نشان‌دهنده پیچیدگی شرایط حاکم بر ضریب درگ در



شکل ۱. توزیع متغیرهای استفاده‌شده در تحقیق در دسته‌های آموزش و آزمایش و ارتباط آنها با C_d ($\text{Sie}=\psi$, $\text{Lambda}=\lambda$ است)

*) است. گام سوم میزان سازگاری است که روشی برای ارزیابی حل‌های برنامه داده‌شده یک مسئله خاص را تشخیص می‌دهد. برگ‌ها و توابع مؤلفه‌هایی از برنامه‌هایی هستند که اتصال‌ها در درخت‌های بیان ژن را تولید می‌کنند. انتخاب برگ‌ها، توابع و تابع سازگاری، فضای جست‌وجوی GEP را تثبیت می‌کند. گام چهارم انتخاب پارامترهای خاص برای کنترل اجراست. پارامترهای کنترل شامل اندازه جمعیت، سرعت همگرایی و غیره است. مدل تهیه‌شده تولید ترکیب خطی/غیرخطی وزن‌دار از

بهینه‌سازی روابط ضریب درگ با رویکرد POMGGP

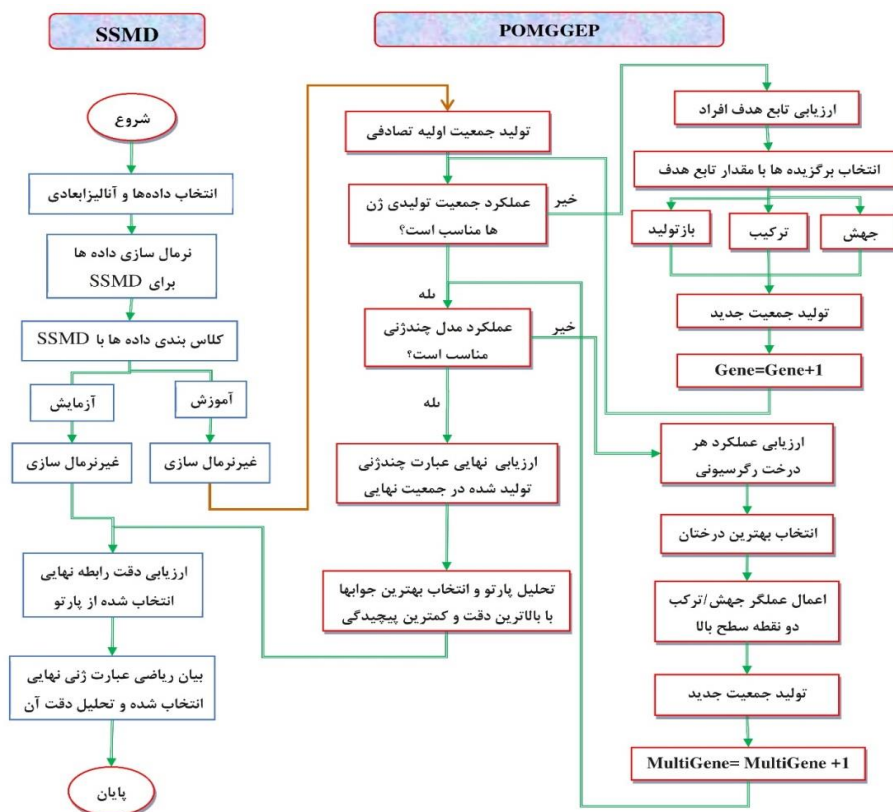
در تحقیق حاضر برای استخراج رابطه بهینه ضریب درگ در جریان عبوری از روی پوشش گیاهی، از برنامه‌ریزی ژنتیکی چندژنی مبتنی بر بهینه‌سازی پارتو استفاده شده است. در گام نخست تشخیص مجموعه‌های انتهایی (گره) برای استفاده در بیان تک‌ژنی و فردی است. انواع اصلی مجموعه‌های انتهایی شامل متغیرهای غیروابسته مسئله، متغیرهای حالت سیستم و توابع بدون شناسه هستند. گام دوم، تعیین مجموعه توابع و عملگرهای هندسی (+، -، /،

روابطی برای تخمین ضریب درگ می‌کند. بنابراین، طی نسل‌های مختلف مجموعه روابط مختلفی برای ضریب درگ تولید می‌شود و در نهایت، گزینش بهترین پاسخ از بین مجموعه جواب‌های برتر در نسل نهایی با روش پارتو انجام می‌شود.

در روش گزینش پارتو روابط تولیدشده مختلف از نظر دو هدف بیشترین دقت و کمترین درجه پیچیدگی مقایسه شده و رابطه‌ای که بهترین شرایط را داشته باشد، انتخاب می‌شود. از بین مجموعه معادلات تولیدشده بهترین معادله براساس جبهه پارتو بیانگر درجه پیچیدگی و دقت معادله انتخاب شده است. برای ارزیابی کمی نتایج مدل بهینه پارتو از ضریب تعیین (R^2)، مجذور مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای نسبی (MPE)^۲ استفاده شده است:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (22)$$

زیربرنامه‌هایی می‌کند که وزن‌های هریک از این زیربرنامه‌ها در عبارت نهایی به طور و توسط کمترین مربعات خطا تعیین می‌شوند. مدل تهیه‌شده از الگوی انتخاب مسابقه و تحلیل پارتو استفاده می‌کند. تابع هدف در حداقل‌سازی خطای میانگین مربعات خطا (RMSE) است و فلوجارت تحقیق حاضر در شکل ۲ آمده است. در قسمت مدل GEP تابع هدف، حداقل‌سازی خطا RMSE است و متغیرهای تصمیم شامل تعداد ژن‌ها، تعداد گره‌ها، ساختار هر ژن، پارامترهای ورودی مؤثر، وزن پارامترهای ورودی در هر عبارت ژنی، نوع توابع و عملگرهای ریاضی هر عبارت ژنی، وزن هر عبارت ژنی در مدل نهایی است. بنابراین، قیدهای مسئله عبارت‌اند از: انتخاب از بین سه متغیر ورودی (ψ, R_{ep}, λ)، حداکثر عمق درخت ۵، حداکثر تعداد مؤلفه‌های ژنی ۵، مجموعه توابع ریاضی، مجموعه عملگرهای (+, -, /, *). و مدل از بین این متغیرهای تصمیم با رعایت محدودیت و قیود یادشده اقدام به توسعه



شکل ۲. فلوجارت مدل‌سازی تحقیق حاضر و فرایند استخراج رابطه بهینه ضریب درگ

1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Percent Error

تغییرات متوسط RMSE در نسل‌های مختلف فرایند آموزش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسل‌ها آموزش مدل تکامل یافته و همگرایی در نتایج فراهم می‌شود. مدل طی فرایند آموزش روابط مختلف با درجه دقت و پیچیدگی مختلفی را استخراج می‌کند و سپس، از بین روابط پیشنهادی بهترین رابطه را براساس الگوی جبهه پارتو در شکل ۴ انتخاب می‌کند.

تحلیل پارتو با دو هدف متضاد بیشترین دقت و کمترین درجه پیچیدگی انجام شده است. در نمودار جبهه پارتو، تغییرات دقت مدل ($1-R^2$) در مقابل درجه پیچیدگی رسم شده است و در حقیقت، جبهه پارتو نشان‌دهنده روابطی است که در هر درجه پیچیدگی بهترین دقت را دارند و رابطه‌ای با دقت بهتر در آن جمعیت وجود ندارد. در شکل ۴ جبهه پارتو با رنگ آبی نمایش داده شده است و موقعیت بهترین رابطه جبهه پارتو در جمعیت تکامل یافته با رنگ سبز مشخص شده است و مجموعه روابط جبهه پارتوئی تحقیق حاضر در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی معادلات چندزنی جدول ۲ نشان می‌دهد هر چند افزایش پیچیدگی معادلات دقت آنها را اندکی بهبود بخشیده است، ولی درنهایت روابطی باید در تحلیل پارتو انتخاب شوند که هم دقت مطلوب و هم درجه پیچیدگی کمتری داشته باشند. در این مطالعه آخرین نقطه در جبهه پارتو که با رنگ سبز و حاشیه قرمز با درجه پیچیدگی ۲۳ مشخص شده است، به عنوان رابطه بهینه برای تخمین ضریب درگ انتخاب شده است.

برای محاسبه مجذور مربعات خطا (RMSE) از رابطه ۲۳ استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (23)$$

همچنین، برای محاسبه متوسط خطای نسبی (MPE) از رابطه ۲۴ استفاده شده است:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \right) \times 100 \quad (24)$$

که در این روابط $O(i)$ مقدار مشاهده و $P(i)$ مقدار برآورد شده است و \bar{O} و \bar{P} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده و n تعداد داده‌های استفاده شده است.

نتایج و بحث

نتایج مدل POMGGP در استخراج روابط بهینه ضریب درگ در این مقاله برای تخمین ضریب درگ در جریان عبوری از درون پوشش گیاهی مستغرق در کانال‌های روباز ابتدا ۹۱۰ سری داده اندازه‌گیری شده گردآوری شد و سپس، طبق فلوجارت شکل ۳ با استفاده از الگوریتم SSMD دسته‌بندی داده‌ها به دو دسته آموزشی (۷۲۸ سری) و آزمایشی (۱۸۲ سری) صورت گرفت. دسته‌بندی خروجی الگوریتم SSMD با POMGGP ترکیب شد و برای استخراج روابط تخمین گیر ضریب درگ استفاده شدند. در شکل ۳-الف روند تغییرات (RMSE) Log در بهترین مدل تا رسیدن به همگرایی کامل و در شکل ۳-ب روند

جدول ۲. مجموعه روابط استخراج شده توسط تحلیل پارتو روی جمعیت به وجود آمده از مدل بیان چندزنی

Model	Model complexity	Goodness of fit (R^2)	Model ID
$C_d = 9.86 \cdot 1 + 11.3 \cdot y^2 + 108.24 Re^{-1} - 0.0048 \cdot 1 \cdot Re \cdot y + 0.94$	22	0.735	2
$C_d = 7.6 \cdot 1 - 5.0e-5 \cdot Re + 5.65 \cdot y^2 + 112.25 \cdot Re^{-1} + 1.23$	16	0.692	9
$C_d = 7.98 \cdot 1 + 5.36 \cdot y^2 + 119.3 \cdot Re^{-1} + 1.04$	11	0.688	15
$C_d = 11.4 \cdot 1 + 87.2 \cdot Re^{-1} + 1.13$	7	0.63	23
$C_d = 9.86 \cdot 1 + 11.3 \cdot y^2 + 107.82 \cdot Re^{-1} - 0.0048 \cdot 1 \cdot Re \cdot y + 0.94$	22	0.735	76

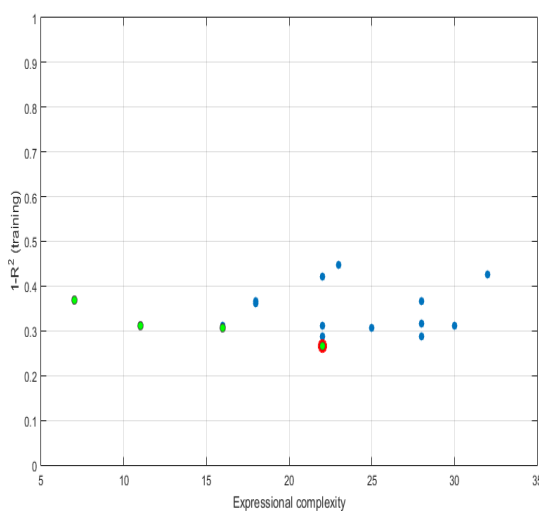
می‌شود که \bar{y} با عبارت ریاضی معادل $\frac{5.0112}{Re}$ دو بار تکرار شده است و نشان‌دهنده درجه اهمیت و وزن زیاد عدد رینولدز در تخمین ضریب درگ است و همچنین، مشابه تحقیقات قبلی و روابط محققان دیگر نشان می‌دهد بین عدد رینولدز و ضریب درگ رابطه معکوس وجود دارد و مدل بیان چندزنی به خوبی توانسته و بدون در نظر گرفتن فیزیک پدیده

رابطه انتخاب شده نهایی شامل چهار \bar{y} است و در شکل ۵ اجزای هر یک از این \bar{y} های برتر ارائه شده است. همچنین، در جدول ۳ عبارت ریاضی معادل هر مؤلفه \bar{y} ی رابطه بهینه و وزن‌های نشان‌دهنده درجه تأثیر هر یک از این \bar{y} ها همراه با تعداد گره‌ها، درجه پیچیدگی و عمق نفوذ \bar{y} مربوطه نشان داده شده است. طبق نتایج شکل ۵ و جدول ۳ مشاهده

همخوانی دارد. در نهایت، با ترکیب هریک از مؤلفه‌های ژنی در شکل ۵ و جدول ۲ رابطه نهایی و ساده‌شده برای تخمین ضریب درگ براساس پارامترهای بدون بعد آن به صورت رابطه ۲۵ به دست آمد:

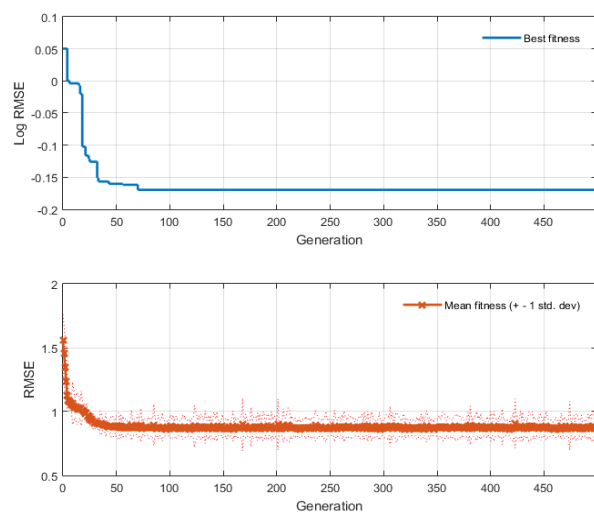
$$C_d = 7.98\lambda + 5.36\psi^2 + \frac{119.27}{R_e} + 1.04 \quad (25)$$

در شکل ۶ مقایسه بین نتایج رابطه به دست آمده از POMGGP در مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش با مقادیر واقعی ضریب درگ انجام شده است و مشاهده می‌شود که رابطه به دست آمده از مدل پارتوی برنامه‌ریزی بیان چندژنی به رغم سادگی آن، دقت مطلوبی در تخمین ضریب درگ جریان درون کانال‌های روباز حاوی پوشش گیاهی دارد. همچنین، برای تحلیل دقیق و کمی‌تر از نتایج و دقت رابطه بهینه به دست آمده از تحلیل پارتو شاخص‌های آماری مهم مرتبط با نکویی برازش این رابطه در مرحله آموزش و آزمایش محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. براساس مقادیر شاخص‌های نکویی برازش در جدول ۴، رابطه به دست آمده از تحلیل پارتوی چندژنی در مرحله آموزش دارای ضریب تعیین ۰/۷ و در مرحله آزمایش دارای ضریب تعیین ۰/۹ است. مجذور مربعات خطا در مرحله آموزش ۰/۹۱ و در مرحله آزمایش ۰/۴۱ است و همچنین، درصد خطای نسبی مدل در مرحله آموزش ۲۰ درصد و در مرحله آزمایش ۱۷ درصد است.

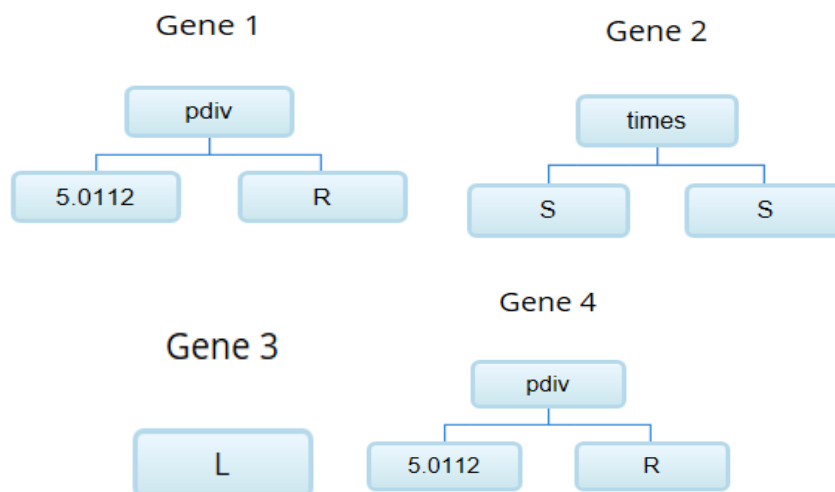


شکل ۴. نمودار جبهه پارتوی نتایج بهترین مدل‌ها نسبت به درجه پیچیدگی و دقت

یا پیش فرض اولیه، رابطه معکوس و غیرخطی عدد رینولدز با ضریب درگ را استخراج کند. از نظر فیزیکی نیز افزایش عدد رینولدز در جریان عبوری از درون و روی پوشش گیاهی در حقیقت معادل با افزایش سرعت جریان عبوری از روی پوشش گیاهی است که سبب کاهش ضخامت لایه مرزی و از بین رفتن آثار مرزها در جریان آشفته شده، مقاومت مرزهای گیاهی در مقابل جریان را کاهش می‌دهد و همچنین، سرعت زیاد جریان آب سبب انحنای پوشش گیاهی در جهت جریان و کاهش ضریب مقاومت و درگ در مقابل جریان می‌شود که عبارت ژنی به وجود آمده از POMGGP توانسته است آن را شبیه‌سازی کند. مقایسه وزن مؤلفه‌های ژنی در جدول ۲ نشان می‌دهد بیشترین وزن ۱۱/۹ مربوط به ژن‌های دربردارنده عدد رینولدز است و تأیید می‌کند که از بین سه پارامتر مؤثر بر ضریب درگ، عدد رینولدز تأثیر بیشتری بر ضریب درگ جریان دارد. در درجه اهمیت دوم وزن ۷/۹۸ مربوط به عبارت ژنی λ است که نشان‌دهنده درجه تراکم پوشش گیاهی در واحد سطح است. در درجه اهمیت سوم نیز عبارت ژنی بیانگر ضریب انسداد پوشش گیاهی ($\psi = \frac{d}{L_y}$) با درجه وزنی ۵/۳۶ قرار دارد. همچنین، عدد ثابت ۱/۰۴ که به عنوان عبارت ثابت در مدل برنامه‌ریزی بیان ژنی استخراج شده است، در حقیقت نشان می‌دهد ضریب درگ پوشش گیاهی حول این مقدار متوسط تغییر می‌کند و این مطلب با نتایج محققان دیگر که ضریب درگ را عدد ۱ فرض کرده‌اند،



شکل ۳. الف) تغییرات Log(RMSE) و RMSE در نسل‌های مختلف طی فرایند آموزش و تکامل مدل بیان چندژنی



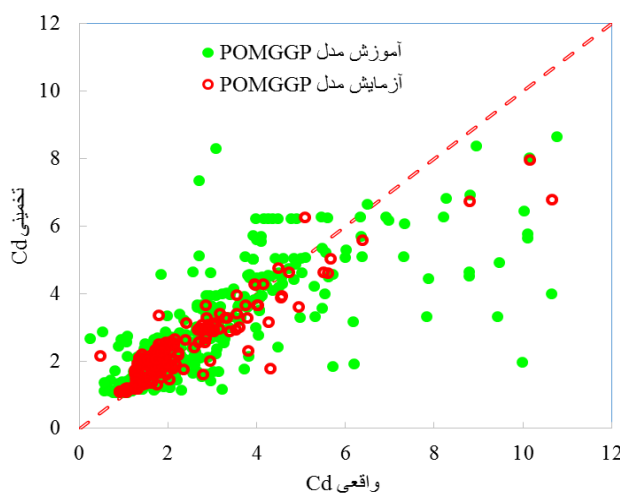
شکل ۵. مؤلفه‌های ژنی در بهترین مدل به‌وجودآمده از تحلیل پارتوی بیان چندژنی ضریب درگ (R عدد رینولدز، L تراکم پوشش گیاهی، S: ضریب انسداد پوشش گیاهی، Pdiv: عملگر تقسیم و times: عملگر ضرب است)

جدول ۳. مشخصات ژن‌های منفرد حل بهینه پارتو در تحلیل بیان چندژنی ضریب درگ

عبارت	مقدار	وزن	تعداد گره	عمق نفوذ	درجه پیچیدگی
Bias	۱/۰۴	۱/۰۴	-	-	-
ژن ۱	$۰۹/۶۳Re^{-1}$	۱۱/۸۷۹	۱	۱	۱
ژن ۲	$۰/۳۶\psi^2$	۵/۳۵۸	۵	۳	۱۱
ژن ۳	$۷/۹۸\lambda$	۷/۹۷۷	۳	۲	۵
ژن ۴	$۰۹/۶۳Re^{-1}$	۱۱/۸۷۹	۳	۲	۵

جدول ۴. نتایج شاخص‌های آماری کارایی مدل POMGGP در تخمین ضریب درگ در دسته داده‌های آموزش و آزمایش

مرحله	ضریب تعیین R^2	مجدور مربعات خطا RMSE	درصد خطای نسبی MPE (%)
آموزش	۰/۷	۰/۹۱	۲۱
آزمایش	۰/۹	۰/۴۱	۱۷



شکل ۶. مقایسه نتایج رابطه حاصله POMGGP در مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش با مقادیر واقعی ضریب درگ

۱/۶۰۸ است، در رتبه اول رابطه چنگ (۲۰۱۳) با انحراف معیار ۱/۲۵۳ و رابطه مبتنی بر POMGGP با انحراف معیار ۱/۱۱۸ در رتبه دوم قرار دارد و بعد از آن رابطه لیو و همکاران (۲۰۲۰) با انحراف معیار ۱/۰۴۱ در رتبه سوم قرار دارد. از منظر ضریب همبستگی مدل POMGGP با ضریب همبستگی ۰/۸۵ در رتبه اول و سپس، رابطه سانولد و همکاران (۲۰۱۹) با ضریب همبستگی ۰/۸ و در انتها، رتبه سوم رابطه لیو و همکاران با ضریب همبستگی ۰/۷۵ قرار دارد. همچنین، از نظر مجذور مربعات خطا RMSD نیز رابطه مبتنی بر POMGGP بیشترین دقت را دارد. همچنین، در شکل ۸ نیز عملکرد هریک از مدل‌های مختلف در تخمین ضریب درگ به صورت جداگانه با داده‌های واقعی Cd مقایسه شده است و مشاهده می‌شود اغلب این مدل‌ها در مقادیر ضریب درگ بزرگ‌تر از ۳ مقدار ضریب درگ را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده‌اند. علاوه بر دقت بیشتر مدل POMGGP در تخمین ضریب درگ مشاهده می‌شود که معادله ۲۵ را می‌توان به فرم عمومی معادله ارگان که مبتنی بر مفاهیم فیزیکی است، نوشت که در این حالت داریم (رابطه ۲۶):

$$C_d = 2 \left(\frac{\alpha_o}{R_e} + \alpha_1 \right) \quad (26)$$

که در آن ضرایب α_o و α_1 برابرند با (رابطه ۲۷):

$$\begin{aligned} \alpha_o &= 56.635, \\ \alpha_1 &= 3.99\lambda + 2.68\psi^2 + 0.52 \end{aligned} \quad (27)$$

در این رابطه مؤلفه بیانگر لزجت و مقاومت لزجی α_o ثابت است و مستقل از خصوصیات هندسی پوشش گیاهی عمل می‌کند، که این مورد در پژوهش تینو و نپ (۲۰۰۸) نیز تأیید شده است. همچنین، α_1 به صورت خطی با افزایش λ افزایش می‌یابد و این افزایش نشان می‌دهد مشارکت اینرسی جریان در ضریب درگ (اثر درگ اینرسی) با افزایش λ در مقدار مشخص عدد رینولدز افزایش می‌یابد. وابستگی مستقیم ضریب درگ به اینرسی جریان با افزایش λ در مطالعات دیگر همچون تینو و نپ (۲۰۰۸)، تینوکو و کاوان (۲۰۱۳) و سانولد و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده و تأیید شده است. همچنین، در مورد تأثیر ضریب انسداد پوشش گیاهی ($\psi = \frac{d}{L_y}$) مشاهده

مقایسه نتایج مدل POMGGP با روابط قبلی

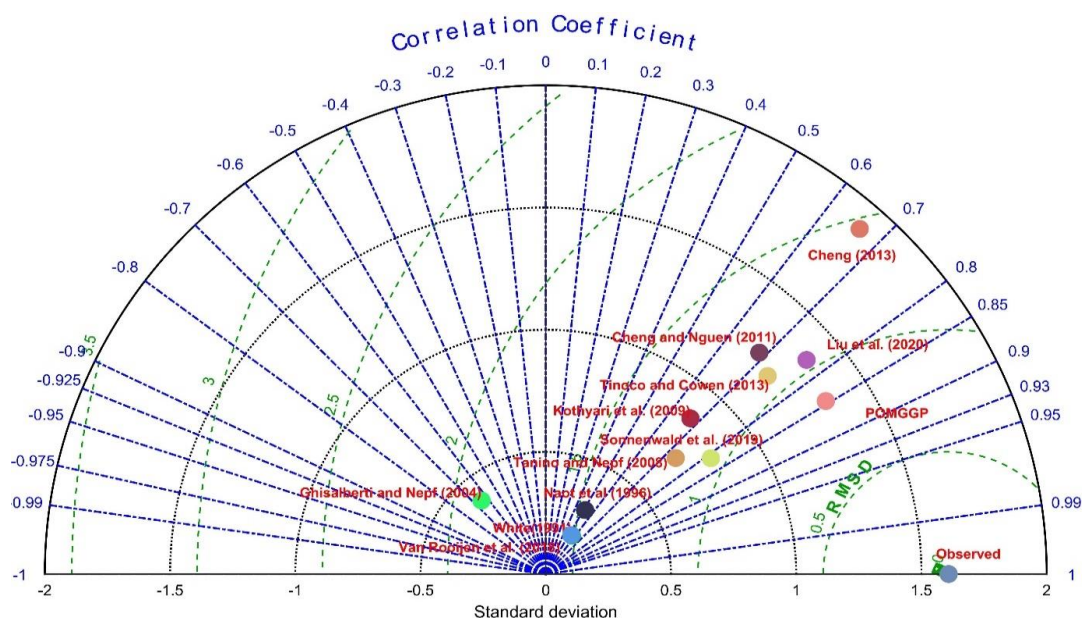
در این قسمت نتایج مدل POMGGP با نتایج روابط محققان دیگر که در قسمت مقدمه تحقیق معرفی شدند، انجام شده است. در جدول ۵ مقایسه نتایج براساس شاخص‌های آماری انجام شده است. طبق جدول ۵ مشاهده می‌شود که از نظر ضریب تعیین در رتبه اول نتایج مدل POMGGP با ضریب تعیین ۰/۷۱ قرار دارد و در مرحله بعد رابطه لیو و همکاران (۲۰۲۰) با ضریب تعیین ۰/۵۹ قرار دارد. بنابراین، مشاهده می‌شود که مدل بیان چندزنی ۲۰ درصد افزایش در ضریب تعیین نسبت به بهترین رابطه تجربی دارد. همچنین، از نظر مجذور مربعات خطا نیز مدل POMGGP مقدار ۰/۸۶ دارد و بهترین رابطه در این زمینه، مدل تینوکو و کاوان (۲۰۱۳) با مقدار ۱/۰۹ است که خطای مدل بیان چندزنی ۲۷ درصد کمتر است. همچنین، از نظر مقدار درصد خطای نسبی نیز مدل بیان چندزنی دارای خطای ۲۰ درصد است و نسبت به مدل تجربی تینوکو و کاوان (۲۰۱۳) و سانولد و همکاران (۲۰۱۹) دقت بیشتری با ۲۰ درصد کاهش خطا دارد. همچنین، در شکل ۷ مقایسه نتایج مدل‌های مختلف در دیاگرام تایلور انجام شده است. دیاگرام تایلور ارتباط هندسی و قطبی بین ضریب همبستگی، انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده و مجذور مربعات میانگین خطا (RMSD) را نشان می‌دهد [۱۵]. در این نمودار ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره، انحراف معیار محورهای افقی و قائم و RMSD به صورت دایره متوالمرکز آزمایش شعاعی نسبت به مرکز دایره و نقطه مرجع (انحراف معیار اندازه‌گیری‌ها) نمایش داده می‌شوند. در این دیاگرام هر شبیه‌سازی که به نقطه مرجع (مقادیر اندازه‌گیری) نزدیک‌ترین فاصله قطبی را داشته باشد، بیشترین دقت را دارد و از اعتبار بیشتری برخوردار است. در حقیقت، دیاگرام تایلور انحراف معیار، انحراف جذر میانگین مربعات و ضریب تبیین را در یک گراف واحد خلاصه می‌کند و امکان مقایسه گرافیکی نتایج روابط مختلف نسبت به مقادیر اندازه‌گیری در مختصات قطبی را فراهم می‌کند. در این دیاگرام زاویه آزمایش، ضریب همبستگی و فاصله شعاعی نسبت به مبدأ مشاهدات با انحراف معیار SD نشان داده می‌شود. طبق این شکل، از منظر شاخص انحراف معیار که در مقادیر واقعی عدد

درگ بزرگ‌تری می‌شود. وابستگی ضریب درگ به نسبت انسداد پوشش گیاهی در مطالعات اطمینان و همکاران (۲۰۱۷) و وان روژین و همکاران (۲۰۱۸) نیز مشاهده شده است. بنابراین، معادله مبتنی بر تحلیل پارتوی چندرئی علاوه بر اینکه دقت مطلوبی در تخمین ضریب درگ دارد و فرم ساده‌ای هم دارد، ولی مفاهیم فیزیکی حاکم بر پدیده را نیز به‌خوبی استنتاج کرده است.

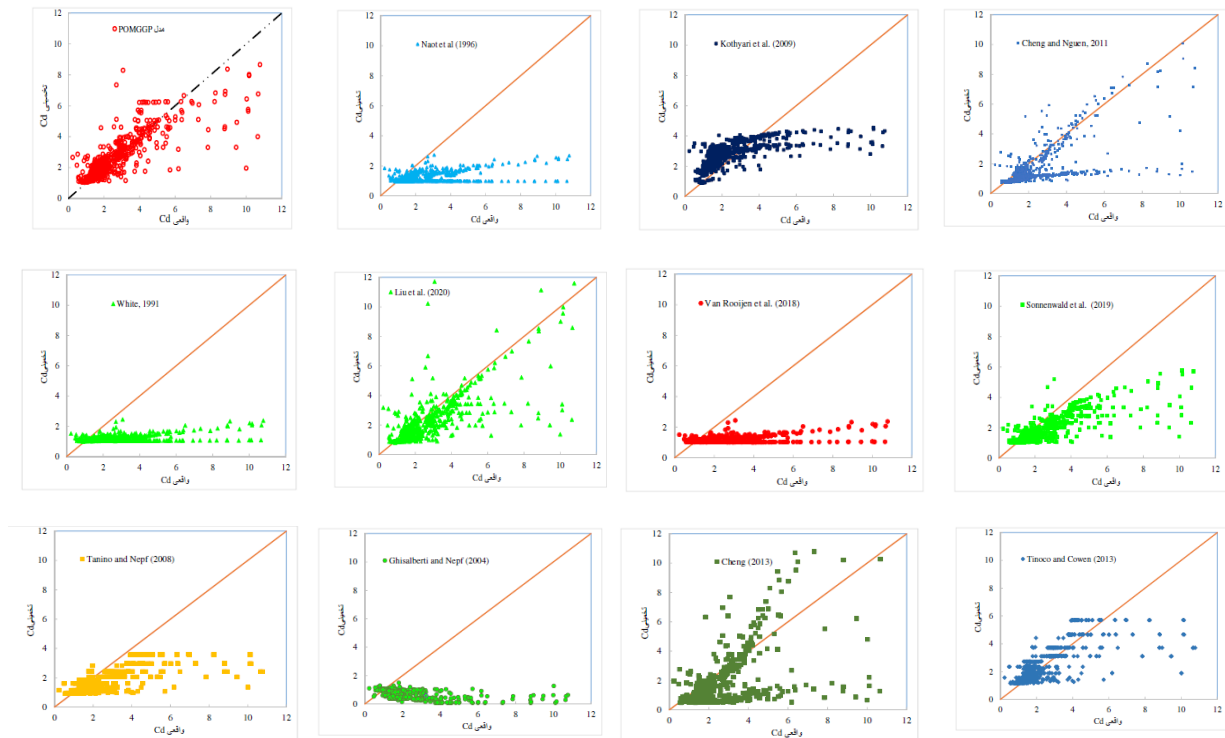
می‌شود که تأثیر این ضریب در مقاومت اینرسی درگ جریان بیشتر از درجه تراکم پوشش گیاهی است. در حقیقت، با افزایش ضریب انسداد فضای مفید برای عبور جریان از بین پوشش گیاهی کاهش می‌یابد و در این حالت لایه مرزی اطراف ساقه‌های پوشش گیاهی با یکدیگر تداخل پیدا می‌کنند [۳] و افزایش تداخل لایه‌های مرزی سبب ایجاد منطقه سکون بزرگ‌تر و در نتیجه، مقاومت

جدول ۵. مقایسه نتایج روابط مختلف تخمین ضریب درگ با نتایج مدل POMGGP

مدل	ضریب تعیین R^2	مجذور مربعات خطا RMSE	درصد خطای نسبی MPE (%)
POMGGP	۰/۷۱	۰/۸۶	۲۰
White (1991)	۰/۳۱	۱/۸۳	۳۷
Naot et al. (1996)	۰/۲۶	۱/۷۹	۳۷
Ghisalberti and Nepf (2004)	۰/۴۲	۲/۴۱	۵۴
Tanino and Nepf (2008)	۰/۵۴	۱/۳۷	۲۶
Kothyari et al. (2009)	۰/۴۵	۱/۲۶	۴۸
Cheng and Nguen (2011)	۰/۴۷	۱/۳۳	۳۳
Cheng (2013)	۰/۴۴	۱/۶۴	۴۸
Tinoco and Cowen (2013)	۰/۵۴	۱/۰۹	۲۴
Van Rooijen et al. (2018)	۰/۲۹	۱/۸۴	۳۷
Sonnenwald et al. (2019)	۰/۶۳	۱/۱۸	۲۴
Liu et al. (2020)	۰/۵۹	۱/۱۱	۲۶



شکل ۷. دیاگرام تیلور مقایسه نتایج مدل POMGGP با نتایج مدل‌های دیگر در تعیین ضریب درگ



شکل ۸. مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف تخمین ضریب درگ نسبت به مقادیر واقعی C_d

به‌وجود آمده در مقادیر بزرگ ضریب درگ که در روابط قبلی مشاهده می‌شود را برطرف می‌کند. همچنین، طبق نتایج ارتباط مستقیم بین درجه تراکم پوشش گیاهی با ضریب درگ و ارتباط معکوس عدد رینولدز با ضریب درگ و رابطه توان دوم نسبت انسداد با ضریب درگ جریان وجود دارد. به عنوان یک پیشنهاد اجرایی می‌توان از رابطه نهایی مدل POMGGP در محاسبات هیدرولیکی و اکوهیدرولوژیکی جریان در کانال‌ها و رودخانه‌های حاوی پوشش گیاهی استفاده کرد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر ضرورت دارد کارشناسان و مهندسان در مطالعات هیدرولیکی و اکوهیدرولوژیکی جریان در رودخانه‌های با پوشش گیاهی کالیبره کردن مدل‌های ریاضی در این زمینه، از روابطی برای تخمین ضریب استفاده کنند که علاوه بر در نظر گرفتن تغییرات عدد رینولدز با شرایط جریان و مشخصات پوشش گیاهی، اثر نسبت انسداد پوشش گیاهی و درجه شدت تراکم پوشش گیاهی روی مقاومت درگ جریان را در نظر بگیرند.

منابع

- [1]. Etminan V, Lowe RJ, Ghisalberti M. A new model for predicting the drag exerted by vegetation canopies. *Water Resources Research*. 2017; 53(4):3179-96.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مطالعه جریان در کانال‌ها و رودخانه‌های حاوی پوشش گیاهی، به‌خصوص در مطالعات اکوهیدرولوژی از یک طرف و از طرف دیگر، اهمیت پدیده درگ در این نوع جریان‌ها، در پژوهش حاضر از روش جدید تحلیل پارتو و برنامه‌ریزی بیان چندزنی برای استخراج روابط بهینه به منظور تخمین ضریب درگ استفاده شده است. با گردآوری مجموعه‌ای وسیع از داده‌های اندازه‌گیری ضریب درگ جریان در کانال‌های حاوی پوشش گیاهی و تحلیل ابعادی متغیرهای مؤثر بر پدیده اقدام به توسعه مدل شده است. ارزیابی دقت نتایج به‌دست‌آمده از مدل POMGGP نشان داد که این مدل با ضریب تعیین ۰/۹ و خطای ۱۷ درصد دقت مطلوبی در تخمین ضریب درگ دارد. علاوه بر این، مشاهده شد فرم صریح رابطه به‌دست‌آمده از مدل POMGGP ضمن سادگی آن به‌خوبی با مفهوم فیزیکی پدیده درگ جریان در پوشش گیاهی را انطباق دارد و با استفاده از آن تأثیر هریک از اجزای مقاومتی پوشش گیاهی در مقابل جریان قابل مشاهده است. مقایسه نتایج مدل POMGGP با نتایج روابط محققان قبلی نشان داد دقت این مدل نسبت به مطالعات قبلی بهتر است و کم‌تخمینی

- [2]. Cheng NS, Nguyen HT. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows. *Journal of hydraulic engineering*. 2011; 137(9):995-1004.
- [3]. Liu MY, Huai WX, Yangzh ZH, Zeng YH. A genetic programming-based model for drag coefficient of emergent vegetation in open channel flows. *Advances in Water Resources*. 2020; 103582.
- [4]. Li WQ, Wang D, Jiao JL, Yang KJ. Effects of vegetation density on flow velocity characteristics in open channel. *Journal of Hydrodynamics*. 2019; 31(5):1052-9.
- [5]. Cheng NS. Calculation of drag coefficient for arrays of emergent circular cylinders with pseudofluid model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013; 139(6):602-11.
- [6]. Liu D, Diplas P, Fairbanks JD, Hodges CC. An experimental study of flow through rigid vegetation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2008; 113(F4).
- [7]. Kothiyari UC, Hayashi K, Hashimoto H. Drag coefficient of unsubmerged rigid vegetation stems in open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*. 2009; 47(6):691-9.
- [8]. Tanino Y, Nepf HM. Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008; 134(1):34-41.
- [9]. Tinoco RO, Cowen EA. The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements. *Experiments in fluids*. 2013; 54(4):1509.
- [10]. Zhao K, Cheng NS, Wang X, Tan SK. Measurements of fluctuation in drag acting on rigid cylinder array in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014; 140(1):48-55.
- [11]. Liu XD, Li TS, Tang LC, Han Y, Chen J, Yang SQ. Estimation of form drag caused by rigid vegetation based on equivalent roughness. *IEEE Access*. 2019; 7:116133-44.
- [12]. Stoesser T, Kim SJ, Diplas P. Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2010; 136(12):1003-17.
- [13]. Kim SJ, Stoesser T. Closure modeling and direct simulation of vegetation drag in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research*. 2011; 47(10).
- [14]. Shi H, Liang X, Huai W, Wang Y. Predicting the bulk average velocity of open channel flow with submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrology*. 2019; 572:213-25.
- [15]. Riahi-Madvar H, Dehghani M, Seifi A, Singh VP. Pareto optimal multigene genetic programming for prediction of longitudinal dispersion coefficient. *Water Resources Management*. 2019; 33(3):905-21.
- [16]. Baptist MJ, Babovic V, Rodríguez Uthurburu J, Keijzer M, Uittenbogaard RE, Mynett A, Verwey A. On inducing equations for vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Research*. 2007; 45(4):435-50.
- [17]. Zahiri A, Shabani MA. Modeling of stage-discharge relationship in compound channels using multi-stage gene expression programming. *Iranian journal of ecohydrology*. 2017; 791-802. [Persian].
- [18]. Guven A, Gunal M. Genetic programming approach for prediction of local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2008; 134(2):241-9.
- [19]. Azamathulla HM, Zahiri A. Flow discharge prediction in compound channels using linear genetic programming. *Journal of hydrology*. 2012; 454:203-7.
- [20]. Tinoco RO, Goldstein EB, Coco G. A data-driven approach to develop physically sound predictors: Application to depth-averaged velocities on flows through submerged arrays of rigid cylinders. *Water Resources Research*. 2015; 51(2):1247-63.
- [21]. White FM, Corfield I. *Viscous fluid flow*. New York: McGraw-Hill; 2006.
- [22]. Van Rooijen A, Lowe R, Ghisalberti M, Conde-Frias M, Tan L. Predicting current-induced drag in emergent and submerged aquatic vegetation canopies. *Frontiers in Marine Science*. 2018; 5:449.
- [23]. Sonnenwald F, Stovin V, Guymer I. Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation. *Journal of Hydraulic Research*. 2019; 57(4):591-7.
- [24]. Naot D, Nezu I, Nakagawa H. Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1996; 122(11):625-33.
- [25]. Ghisalberti M, Nepf HM. The limited growth of vegetated shear layers. *Water Resources Research*. 2004; 40(7).
- [26]. Stoesser T, Kim SJ, Diplas P. Turbulent flow through idealized emergent vegetation. *Journal*

- of Hydraulic Engineering. 2010; 136(12):1003-17.
- [27]. Nikubakht E, Hamidifar H, Keshavarzi A. Effect of Floodplain Non-submerged Vegetation on Bed Variation in Meandering Compound Rivers. Iranian Journal of Ecohydrology. 2019;5(2):461-470. [Persian]
- [28]. Radmanesh F, Pourhaghi A, Solgi A. Improving the Performance of ANN Model, Using Wavelet Transform and PCA Method for Modeling and Predict Biochemical Oxygen Demand (BOD). Iranian Journal of Ecohydrology. 2017;3(4):569-585. [Persian]
- [29]. Sharifi, H., Roozbahani, A., Hashemy Shahdany, M. Development of ANN, FIS and ANFIS Models to Evaluate the Adequacy Index in Agricultural Water Distribution Systems (Case study: Rudasht Irrigation Network). Iranian Journal of Ecohydrology, 2020; 7(3): 635-646. [Persian]
- [30]. Zamanzad Ghavidel, S., Montaseri, M., Sanikhani, H. Moldeling Of Dissolved Solids By Using Hybrid Soft Computing Methods (Case Study: Nazluchay Basin). Iranian journal of Ecohydrology, 2017; 4(4): 983-996. [Persian]