

# طراحی هیدرولیکی هوشمند تونل‌های رسوب‌گیر رودخانه‌ای

مسعود رفیعی<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- دانشیار مهندسی عمران آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

E-mail: Ghods@modares.ac.ir<sup>\*</sup>

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۹/۵]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۹/۱۱]

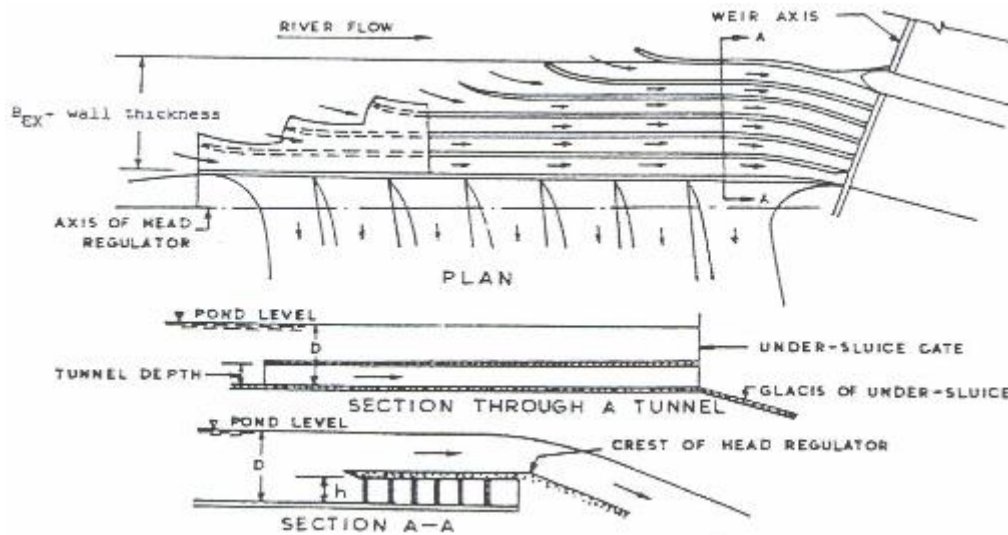
**چکیده-** در طراحی تونل‌های رسوب‌گیر بیشتر هدف، دستیابی به طرحی است که علاوه بر رعایت کامل محدودیت‌ها و ملاحظات طراحی، بتواند با کمینه دبی عبوری از رسوب‌گیر، بیشترین رسوب را با کمینه گرفتگی، از تونل عبور دهد. در این پژوهش با استفاده از دیدگاه منطق فازی، اهمیت، وزن معیارها و شاخص‌های سنجش طرح در انتخاب طرح بهینه تونل‌های رسوب‌گیر لحاظ شد. همچنین با استفاده از یک روش جستجوی هوشمند و دارای قابلیت عبور از مینیمم‌های محلی احتمالی، فضای حل مساله مورد جستجو قرار گرفت. سپس تونل‌های رسوب‌گیر طراحی شده با روش جدید، با طرح‌های موجود و همچنین با نتایج حاصل از به کارگیری روش جستجوی مستقیم (Direct search) که از جمله ابزارهای نرم‌افزار MATLAB است مقایسه شد. طراحی‌های به دست آمده با روش طراحی ارائه شده، وضعیت بهتری را در مقایسه با طراحی‌های موجود نشان می‌دهند.

**واژگان کلیدی-** طراحی هیدرولیکی، تونل رسوب‌گیر، الگوریتم ژنتیکی، منطق فازی

## مقدمه:

آبگیری از رودخانه‌ها یکی از قدیمی‌ترین فعالیت‌های بشر در زمینه مهندسی هیدرولیک بوده است. مشکل اساسی در این زمینه ناشی از وجود مقادیر قابل توجه رسوبات در جریان است. به همین دلیل چگونگی جلوگیری از ورود رسوبات به آبگیر، مشکل همیشگی طراحان این نوع سازه‌ها بوده است. به طور کلی از پدیده رسوب به عنوان یک عامل مشکل‌زا نام برده می‌شود. به طور خلاصه مشکلات ناشی از رسوبگذاری مواد رسوبی در رودخانه‌ها را می‌توان در موارد زیر دانست:

- کاهش ظرفیت انتقال رودخانه‌ها
- شریانی و منحرف شدن جریان
- خسارت به توربین‌ها، پره‌ها، پمپ‌ها، پایه‌های پل، پوشش کانال‌ها و...
- کاستن از ظرفیت ذخیره مخزن سدها و ...
- در طراحی و احداث یک آبگیر طراحان تلاش می‌کنند با به کارگیری روش‌هایی از میزان رسوبات ورودی به کانال آبگیر و در نتیجه از آثار نامطلوب رسوبات همراه با جریان کم کنند. انواع سازه‌های رسوب‌گیر را بر اساس محل قرار-گیری آنها می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:



شکل ۱. تیپ کلی طرح تونل‌های رسوب‌گیر

رسوب بیش از حد به آب برداشته شده به وسیله کانال، تعبیه می‌شوند. در این وضعیت آب حاوی رسوب بیشتر، که در نزدیکی بستر جریان دارد، داخل تونل‌های تعبیه شده جریان می‌یابد؛ آب کم‌رسوب نیز که در لایه‌های بالاتر جریان دارد، اجازه می‌یابد تا وارد کانال آبگیر شود. شکل ۱، نمونه‌ای از یک تیپ طراحی این رسوبگیرها را نمایش می‌دهد [۱]. تونل‌هایی که هدایت رسوبات را به عهده دارند، معمولاً موازی با راستای تنظیم‌کننده کانال آبگیر<sup>۶</sup> طراحی می‌شوند. این تونل‌ها طول و عرض‌های متفاوتی دارند، همگی به دریچه‌های رسوبشویی زیر بند انحرافی ختم می‌شوند [۲].

### مروری بر مطالعات گذشته

بر مبنای این اصل که لایه‌های پایینی جریان که حاوی رسوب بیشتری است را می‌توان از لایه‌های بالاتر جدا کرده و سپس خارج کرد، الدسن<sup>۷</sup> در سال ۱۹۲۲ ایده ساخت تونل‌های رسوبگیر را مطرح کرد و اولین تونل رسوبگیر به

۱- سازه‌های بازدارنده<sup>۱</sup>: این سازه‌ها در دهانه آبگیر و قسمت ورودی آن، در داخل رودخانه احداث می‌شوند که سازه‌های حذف‌کننده رسوبات<sup>۲</sup> نیز نامیده می‌شوند. از جمله سازه‌های نام برده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سازه‌های جداکننده لایه فوقانی کم‌رسوب و تحتانی پر-رسوب در جریان

- سازه‌های منحرف‌کننده جریان پرسوب در جلوی آبگیر.

۲- سازه‌های علاج بخش<sup>۳</sup>: این سازه بعد از آبگیری از رودخانه و داخل کانال آبگیر قرار می‌گیرند که به سازه‌های خارج‌کننده رسوبات<sup>۴</sup> معروف است. از جمله سازه‌های نام برده می‌توان موارد زیر اشاره کرد:

- حوضچه‌های ترسیب طولی

- حوضچه‌های رسوبگیر گردابی

- رسوبگیر لوله‌ای گردابی

تونل‌های رسوبگیر که در دسته اول و در ردیف سازه‌های جداکننده لایه فوقانی و تحتانی جریان قرار می‌گیرند، بیشتر در پیشانی<sup>۵</sup> یک کانال آبگیر و به منظور ممانعت از ورود

1. Preventive
2. Sediment excluders
3. Curative
4. Sediment ejectors
5. Headwork

6. Head regulator  
7. Eldson

در منابع و مراجعی که به آنها اشاره شد درباره اهمیت و ارجحیت نسبی معیارهای سنجش طرح، سخنی به میان نیامده است و اشاره نشده است که چگونه می‌توان این معیارها و وزن آنها را به منظور انتخاب طرح برتر وارد محاسبات کرد. همچنین در روش پیشنهادی گارده، که به وسیله کوتیاری برای رسوب غیریکنواخت مورد اصلاح قرار گرفت، به دلیل طولانی بودن مراحل محاسبات و مراجعه مکرر به جداول و نمودارها در فرایند طراحی، طراح معمولاً طرح‌های معدودی را مورد آزمون و بررسی قرار می‌دهد و در پایان با توجه به معیارهای گفته شده برای طراحی (راندمان رسوبگیری، گرفتگی در تونل و دبی عبوری از رسوبگیر) با یک قضاوت مهندسی، طرح برتر را از میان گزینه‌های موجود انتخاب می‌کند.

در پژوهش حاضر، براساس توصیه‌های طراحی و روش اصلاح شده گارده، ضمن ارائه یک تابع هدف برای طراحی سازه یاد شده، ارجحیت نسبی و وزن معیارها و شاخص‌های سنجش طرح نیز در محاسبات و فرایند انتخاب طراحی برتر لحاظ شده است. همچنین از میان طراحی‌های متنوع و متفاوتی که می‌توان برای این سازه کنترل رسوب در نظر گرفت، طراحی به طریقی انجام شد که از نظر تمامی معیارهای سنجش، ضوابط، محدودیت‌ها و قیدهای طراحی، بهترین شرایط حاصل شود.

روش اصلاح شده گارده، به عنوان روش پیشنهادی برای طراحی یک تونل رسوبگیر، مبنای طراحی‌ها و محاسبات در پژوهش حاضر بوده است. بنابراین ابتدا به ارائه خلاصه‌ای از این روش گام به گام پرداخته می‌شود.

### مراحل طراحی تونل رسوبگیر

کوتیاری و همکاران در سال ۱۹۹۹ بر اساس روشی که پیشتر گارده در سال ۱۹۷۶ پیشنهاد داده بود، مراحل زیر را برای طراحی تونل‌های رسوبگیر در وضعیت رسوب غیر یکنواخت ارائه کردند [۲]:

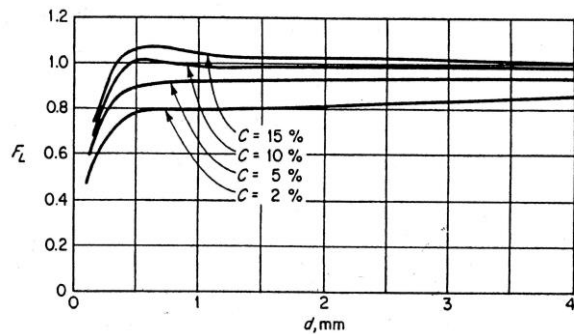
وسيله نیکلسون<sup>۸</sup> در محل بند انحرافی خانکی در کشور هند ساخته شد [۳].

در سال ۱۹۷۶ گارده<sup>۹</sup> و پانده<sup>۱۰</sup> برخی از مفاهیم انتقال رسوب یکنواخت را برای ارائه یک روش و شیوه طراحی برای تونل‌های رسوبگیر به کار گرفتند و روشی مبتنی بر سعی و خطا شامل ۱۸ مرحله گام به گام را برای طراحی یک تونل رسوبگیر ارائه کردند [۱]. در این روش، طراح ابتدا یک طرح اولیه (مطابق توصیه‌های طراحی) برای سازه رسوبگیر در نظر می‌گیرد و سپس معیارهای سنجش طرح را بررسی می‌کند به این معنی که پارامترهایی مانند راندمان رسوبگیری و گرفتگی پدید آمده در تونل را محاسبه کرده و وضعیت ملاحظات و قیدهای طراحی را در این وضعیت بررسی می‌کند. آنگاه طراح با اصلاح پارامترهای طراحی در طرح اولیه، شامل دبی رسوبگیر، عرض و ارتفاع تونل، انتخاب‌های مختلف را برای بهبود وضعیت طراحی بررسی می‌کند. سرانجام از بین طرح‌هایی که محدودیت‌ها و قیود طراحی را رعایت کرده‌اند، طرحی که با کمینه دبی عبوری از تونل، بهترین راندمان و کمترین گرفتگی را داشته باشد انتخاب می‌شود.

در سال ۱۹۷۷ گارده و رنگاراجو<sup>۱۱</sup> علاوه بر معرفی بیشتر سازه رسوبگیر یاد شده، ملاحظات و توصیه‌هایی را بر مبنای تجربه سازه‌های ساخته شده از این نوع، ارائه کردند [۳].

مفاهیم ارائه شده به وسیله گارده و پانده در سال ۱۹۷۶، قابل باز شدن به مصالح غیریکنواخت است. این باز شدن در سال ۱۹۹۹ به وسیله کوتیاری<sup>۱۲</sup>، پانده و گاهلوت<sup>۱۳</sup>، با به کارگیری روش ساماگا و همکاران<sup>۱۴</sup> [۴ و ۵] در محاسبه بار رسوب کف و معلق در وضعیت رسوب غیریکنواخت انجام شد [۲].

8. Nicolson
9. R. J. Garde
10. P. K. Pande
11. Rangaraju
12. U. C. Kothiyari
13. A. G. Gahlot
14. Samaga et al.



شکل ۲ تغییرات  $F_L$  با غلظت و قطر ذره رسوب

۸- عرض رسوبگیر را از رابطه (۳) به دست آورید. این عرض به اضافه ضخامت دیواره‌های میانی، برابر عرض یک، دو یا چند دریچه زیر بند انحرافی باید باشد.

$$B_{Ex} = \frac{Q_{Ex}}{U_{Ex} h} \quad (3)$$

۹- عرضی از رودخانه که از آن جریان به سمت دهانه تونل منحرف می‌شود را از رابطه (۴) به دست آورید:

$$B_{RE} = \frac{(Q_D + Q_{Ex}) B_R}{Q_R} \quad (4)$$

در این رابطه  $Q_D$  دبی کانال آبگیر،  $Q_R$  دبی رودخانه و  $B_R$  عرض رودخانه در محل بند انحرافی است.

۱۰- بار بستر را که از عرض  $B_{RE}$  وارد تونل می‌شود، با به کارگیری روش ساماگا (۱۹۸۶) محاسبه کنید.

۱۱- بار معلق که وارد تونل می‌شود را با انتگرال‌گیری حاصل ضرب سرعت جریان<sup>۲۲</sup> در غلظت رسوبات معلق<sup>۲۳</sup> از ارتفاع  $2d$ ، ( $d$ ، قطر ذره رسوب) تا ارتفاع  $h$ ، (ارتفاع تونل) به دست آورید. همچنین بار معلق که از بالای تونل وارد کانال خواهد شد را با انتگرال‌گیری از تراز سقف تونل تا تراز سطح آب محاسبه کنید. روابط مناسب برای محاسبه توزیع غلظت و غلظت مینا را به کار بگیرید.

۱- دبی رودخانه را در تراز طراحی بند انحرافی انتخاب کنید.

۲- برای این دبی، تنش برشی را از رابطه  $\tau_0 = \gamma R S$  محاسبه کنید. در این رابطه  $R$  شعاع هیدرولیکی و  $S$  شیب هیدرولیکی است.

۳- اندازه بزرگ‌ترین ذره مصالح کف<sup>۱۵</sup> که در تنش برشی یاد شده به حرکت در خواهد آمد را با استفاده از منحنی شیلدز به دست آورید.

۴- مقداری منطقی (بین ۱ تا ۲ متر) برای ارتفاع تونل<sup>۱۶</sup> و مقداری حدود بیست درصد دبی کانال آبگیر<sup>۱۷</sup> را برای دبی جریان عبوری از رسوبگیر<sup>۱۸</sup> در نظر بگیرید.

۵- سرعت آستانه حرکت<sup>۱۹</sup> را برای قطر مصالح  $d_{max}$  که در گام سوم به دست آمد، از رابطه (۱) محاسبه کنید.

$$U_c = 1.6 \left( \frac{R_{Ex}}{d_{max}} \right)^{\frac{1}{8}} \sqrt{(G_s - 1) g d_{max}} \quad (1)$$

در این رابطه  $G_s$ ، چگالی نسبی ذرات،  $g$  شتاب گرانش و  $R_{Ex}$  شعاع هیدرولیکی مقطع تونل رسوبگیر است.

۶- سرعت حد رسوبگذاری<sup>۲۰</sup> را برای اندازه ذره  $d_{max}$  از رابطه (۲) به دست آورید:

$$\frac{U_L}{\sqrt{2 g D (G_s - 1)}} = F_L \quad (2)$$

در این رابطه  $D$  قطر مقطع دایره‌ای است که در مقطع غیر-دایره‌ای، با  $4R_{Ex}$  جایگزین می‌شود. تغییرات پارامتر  $F_L$  در مقابل قطر دانه‌های رسوب و غلظت رسوب موجود در جریان، در شکل ۲ نشان داده شده‌است [۶].

۷- سرعت جریان درون رسوبگیر<sup>۲۱</sup> را بزرگتر از سرعت آستانه حرکت و کمی کوچکتر از سرعت حد رسوبگذاری انتخاب کنید.

- 15.  $d_{max}$
- 16.  $h$
- 17.  $Q_d$
- 18.  $Q_{Ex}$
- 19.  $U_C$
- 20.  $U_L$

- 21.  $U_{EX}$
- 22.  $U(y)$
- 23.  $C(y)$

(حدود ۳۵٪) کمتر باشد [۱]. همچنین CT، محاسبه شده باید از غلظت رسوب ورودی به تونل بیشتر باشد یعنی  $C_{Ex} < C_T$  باشد. هر کدام از شرایط فوق که آماده نشود، باید گام‌های ۴ تا ۱۳ را تکرار کرد. در پایان، بهترین ترکیب برای دبی، عرض و ارتفاع تونل را به طریقی انتخاب کنید که کمینه گرفتگی، کمینه دبی عبوری از تونل و بهترین وضعیت انتقال رسوب هم از حیث راندمان (نسبت میزان رسوبات ورودی به تونل به کل میزان رسوبات منحرف شده به سمت تونل و کانال) و هم رعایت قیود حاصل شود.

۱۴- پس از تعیین نهایی مقادیر دبی، عرض و ارتفاع تونل، نوبت طراحی تونل‌های میانی است. نزدیکترین تونل میانی به تنظیم‌کننده آبگیر با فاصله کمی از بالادست تنظیم‌کننده آغاز شده و تا دریچه زیر بند انحرافی ادامه می‌یابد. سایر تونل‌های میانی طول کمتری دارند به گونه‌ای که با تغییر خطی (حدود یک به یک) طولشان نسبت به ما قبل خود کاهش پیدا می‌کند.

۱۵- طول تونل‌ها به طریقی تعیین می‌شود که افت هد در همه تونل‌ها با هم مساوی باشد. افت هد شامل افت اصطکاک، افت ناشی از تغییر سطح مقطع و افت در ورودی و خروجی تونل خواهد بود [۲].

در روش طراحی بالا، ابتدا یک طرح اولیه برای تونل رسوبگیر در محدوده توصیه‌های طراحی انتخاب می‌شود. سپس بار رسوب ورودی به تونل محاسبه می‌شود. آنگاه مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های راندمان رسوبگیری، گرفتگی در تونل و دبی عبوری از تونل، میزان مقبولیت و ارزشمندی طرح انتخابی اولیه را نشان خواهد داد. پس از آن طراح با انجام تغییراتی روی متغیرهای طراحی (دبی، عرض و ارتفاع رسوبگیر) سعی در بهبود وضعیت معیارهای طراحی خواهد کرد. بنابراین در این روش طراحی برای انتخاب یک طرح مناسب، از طرفی با گزینه‌های مختلف و از طرف دیگر با شاخص‌ها و معیارهای چندگانه روبه‌رو هستیم. همچنین به دلیل طولانی بودن محاسبات، فرآیند

۱۲- برای مقادیر معلوم دبی، ارتفاع و عرض رسوبگیر، گرفتگی تونل را از رابطه زیر محاسبه کنید:

$$\frac{h - D_{FEX}}{h} = \text{درصد گرفتگی} \quad (5)$$

مقدار  $D_{FEX}$  که بیانگر ارتفاع جریان آب فاقد رسوب در تونل<sup>۲۴</sup> است را از معادله (۶) به دست آورید:

$$\frac{Q_{Ex}^2 \left( 1 + \frac{D_{FEX}}{B_{Ex}} \right)}{g D_{FEX}^3 B_{Ex}^2} = 4 F_L^2 (Gs - 1) \quad (6)$$

۱۳- بیشینه غلظت رسوب قابل حمل برای تونل را از رابطه (۷) به دست آورید.

$$Re \sqrt{f} = \left( \frac{I}{d/4R_{Ex}} \right)^{S_1} C_T^{1/3} \quad (7)$$

در اینجا:

Re: رینولدز جریان درون تونل

f: ضریب داری و ایزباخ

$C_T$ : غلظت بدون بعد

REX: شعاع هیدرولیکی مقطع تونل

$$S_1 = \frac{1}{0.89 d^{1/3}} \quad (8)$$

در رابطه (۸) پارامتر  $I$  تابعی از قطر ذرات رسوب است که از جدول ۱ به دست می‌آید.

جدول ۱ تغییرات مقدار  $I$  با قطر ذره رسوب

$d$ (mm)	۰/۱	۰/۲	۰/۶	۰/۹	۱/۵	۲/۵
$I$	۰/۶۵ ۰	۰/۴۲	۹/۰	۵۰	۴۶۰	۵۵۰

در اینجا لازم است که برخی کنترل‌ها صورت پذیرد. از جمله باید گرفتگی محاسبه شده، از یک مقدار منطقی

مینیمم‌های محلی احتمالی، به جای روش‌های کلاسیک به سراغ یک روش بهینه‌یابی مستقیم و نوین برویم.

### اطلاعات مورد استفاده

بررسی‌ها در این پژوهش با استفاده از اطلاعات مربوط به سه کانال موجود در کشور هند انجام شده است. داده‌های این سه کانال در مقایسه با هم، شامل مقادیر متفاوتی برای دبی رودخانه، دبی کانال آبیگر، مصالح بستر، عرض و عمق رودخانه است. اطلاعات یاد شده از سه پروژه زیر برگرفته از مقاله کوتیاری، پانده و گاهلوت است [۳]:

- بند انحرافی و کانال گانگا<sup>۲۵</sup> پایینی نارورا<sup>۲۶</sup> در ایالت یو پی<sup>۲۷</sup>

- بند انحرافی و کانال بند ساردا<sup>۲۸</sup> در بانباسا<sup>۲۹</sup> در ایالت یو پی

- کانال اصلی ایسترن کاسی<sup>۳۰</sup> در محل بند انحرافی هانومانانگار<sup>۳۱</sup> در ایالت بیهار<sup>۳۲</sup>

نتایج مربوط به طراحی تونل رسوبگیر در هر کدام از این سه پروژه با نتایج روش‌های به کار رفته در این پژوهش مقایسه شده است.

### استفاده از الگوریتم ژنتیکی در دستیابی به طراحی بهینه

در این پژوهش با هدف رسیدن به طراحی بهینه برای تونل‌های رسوبگیر از روش نوین و هوشمند جستجوی ژنتیکی استفاده شده است. [۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱].

برای استفاده از الگوریتم ژنتیکی در حل این مساله، ابتدا باید تابع هدف، فضای حل و قیدهای مساله تعیین شود. دقت در رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که مساله حاضر دارای سه متغیر مستقل و اصلی است که به ترتیب  $Q_{EX}$ ، (دبی

طراحی به دفعات محدودی تکرار می‌شود و از میان طرح‌های حاصل، یک طرح که ضمن رعایت قیدهای طراحی، بهترین وضعیت را بر اساس سه معیار ۱- راندمان بالا، ۲- گرفتگی کم و ۳- دبی کمینه برای رسوبگیر، داشته باشد به عنوان طرح برگزیده انتخاب می‌شود.

### طراحی بهینه

یکی از روش‌هایی که در مسائل بهینه‌یابی با چند تابع هدف به کار می‌رود، تبدیل توابع هدف چندگانه به یک تابع هدف یگانه مانند رابطه (۹) است [۷].

$$\phi = W_1 f_1 + W_2 f_2 + \dots + W_n f_n \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $W_1$  تا  $W_n$  معرف وزن توابع هدف و  $f_1$  تا  $f_n$  معرف توابع هدف چندگانه مساله است.

با توجه به توضیحات یاد شده، اکنون با چشم‌پوشی از ارجحیت نسبی معیارها، می‌توان رابطه (۱۰) را به عنوان تابع هدف در انتخاب بهترین تونل رسوبگیر معرفی کرد:

$$\phi = \text{دبی رسوبگیر} (\%) - \text{گرفتگی} (\%) - \text{راندمان} (\%) \quad (10)$$

$$\Rightarrow \phi = \left( \frac{Q_{Br} + Q_{St}}{Q_{Br} + Q_{St} + Q_{SC}} \right) - \left( \frac{h - D_{FEX}}{h} \right) - \left( \frac{Q_{EX}}{Q_D} \right)$$

در رابطه فوق:

$Q_{Br}$  : بار بستر ورودی به تونل

$Q_{St}$  : بار معلق ورودی به تونل

$Q_{SC}$  : بار معلق ورودی به کانال آبیگر

آشکار است که در طراحی بهینه تونل رسوبگیر، هدف به بیشینه رساندن  $\phi$  است. دقت در رابطه (۱۰) و توجه به این مطلب که تغییر در هر کدام از سه متغیر اصلی طراحی باعث تغییرات غیرخطی در  $\phi$  می‌شود و همچنین فضای ناپیوسته تغییرات متغیر  $B_{EX}$  (مطابق توصیه‌های طراحی)، سبب شد تا برای دستیابی به وضعیت بهینه این تابع، با هدف عبور از

25. Lower Ganga
26. Narora
27. U. P.
28. Sarda
29. Banbasa
30. Eastern Kosi
31. Hanomanagar
32. Bihar

در طراحی تونل‌های رسوبگیر قیده‌های مساله که برای هر گزینه (در طول برنامه) باید کنترل شوند، به شرح زیر است [۱ و ۲]:

۱- سرعت درون رسوبگیر باید بین سرعت آستانه حرکت و سرعت حد رسوبگذاری باشد:

$$U_c < U_{Ex} < U_L \quad (12)$$

۲- سرعت در رسوبگیر کوچکتر از بیشینه سرعت قابل تامین به وسیله‌ی هد جریان آب روی تونل انتخاب شود:

$$U_{Ex} < U_{Emax} \quad (13)$$

۳- مطابق توصیه‌های طراحی، گرفتگی درون تونل کمتر از ۳۵٪ باشد:

$$Blockage \leq \% 35 \quad (14)$$

۴- غلظت رسوب درون رسوبگیر، کمتر از غلظت رسوب قابل حمل به وسیله‌ی تونل باشد:

$$C_{Ex} < C_T \quad (15)$$

از هر کدام از قیود فوق که تخلفی صورت پذیرد، به نسبت میزان تخلف، جریمه‌ای برای تابع برازندگی در نظر گرفته می‌شود. باتوجه به اینکه در ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB بهینه‌یابی به صورت Minimization صورت می‌گیرد، تابع برازندگی را در پایان برنامه پیش‌ساخته در محیط MATLAB به صورت رابطه (۱۶) می‌نویسیم:

$$f(x) = \left(\frac{Q_{Ex}}{Q_D}\right) \times 100 + \left(\frac{h - D_{FE}}{h}\right) \times 100 - \left(\frac{Q_{Br} + Q_{St}}{Q_{Br} + Q_{St} + Q_{SC}}\right) \times 100 + \alpha + \beta + \gamma + \delta \quad (16)$$

در رابطه بالا:

$\alpha$  : جریمه تخلف از قید ۱

$\beta$  : جریمه تخلف از قید ۲

$\gamma$  : جریمه تخلف از قید ۳

$\delta$  : جریمه تخلف از قید ۴

رسوبگیر)،  $h$ ، (ارتفاع تونل) و  $B_{Ex}$ ، (عرض خالص تونل) است که مطابق توصیه‌های طراحی و قیده‌های مساله و همچنین نتایج طراحی‌های موجود و انجام شده، بازه تغییرات آن‌ها انتخاب شدند. با این توضیح و طبق توصیه‌های ارائه شده، کمینه دبی رسوبگیر برابر ده درصد دبی کانال آبگیر و بیشینه آن، با توجه به تجربه طراحی‌های موجود (به عنوان نمونه در بند ساردا)، برابر شصت درصد دبی کانال آبگیر انتخاب شد. بنابراین:

$$0.1 Q_D \leq Q_{Ex} \leq 0.6 Q_D \quad (11)$$

دامنه تغییرات ارتفاع تونل مطابق توصیه‌های طراحی، بین ۱ تا ۲ متر انتخاب شد. یعنی:

$$1 m \leq h \leq 2 m$$

عرض رسوبگیر  $B_{Ex}$ ، طبق توصیه‌های طراحی باید به گونه‌ای انتخاب شود که پس از اضافه شدن ضخامت دیواره‌های میانی به آن، عرض یک، دو یا چند دریچه رسوب‌شویی زیر بند به دست آید [۲]. بنابراین بازه تغییرات این متغیر، ناپیوسته بوده و با انتخاب دو پارامتر  $n$  و  $m$  تعیین می‌شود که  $n$ ، تعداد دریچه‌های رسوب‌شویی بند انحرافی که عرض تونل شامل آن‌ها شده و  $m$ ، اختلاف عرض خالص تونل با عرض  $n$ ، دریچه است.

برای استفاده از روش جستجوی ژنتیکی در محیط نرم‌افزار MATLAB، نخست باید یک برنامه پیش‌ساخته آماده شود تا از خروجی آن به عنوان مقدار تابع برازندگی استفاده شود. در این پژوهش برنامه به گونه‌ای تنظیم شد که پس از محاسبه بار کف و معلق ورودی به تونل، مقدار گرفتگی و راندمان رسوبگیر، میزان تخلف از قیده‌های طراحی و در آخر مقدار تابع برازندگی را محاسبه کند.

33.  $n \in N$

34.  $m \in R$

35. M. file

چند گزینه رقیب و چند معیار تصمیم‌گیری روبرو شویم. اساس این روش بر مقایسه‌های زوجی استوار است و معیارهای گفته شده نیز می‌تواند کمی یا کیفی باشند. تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتب تصمیم، تصمیم‌گیری را آغاز می‌کند. درخت سلسله مراتب تصمیم، معیارهای ارزیابی کننده و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد. سپس دسته‌ای از مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود. این مقایسه‌ها وزن هر یک از گزینه‌های رقیب را در راستای معیارهای تصمیم‌گیری مشخص می‌کند. در آخر منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسه‌های زوجی را با همدیگر تلفیق می‌سازد تا تصمیم بهینه به دست آید [۱۵].

بر حسب این‌که از نظریه‌ی فازی در چه مرحله‌ای از تحلیل سلسله مراتبی استفاده شود، روش‌های مختلفی تحت عنوان تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. روشی که در این پژوهش استفاده شده، روش کونگ و بای<sup>۳۸</sup> است. اساس روش کونگ و بای که در سال ۲۰۰۱ میلادی ارائه شده، بر پایه امتیازدهی با اعداد فازی مثلثی مانند شکل ۳ استوار است. الگوریتم این روش به صورت زیر است [۱۶]:

**گام اول:** تشکیل نمودار سلسله مراتب مسأله مانند حالت قطعی

**گام دوم:** تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی بر اساس اعداد فازی مثلثی

به این منظور اعداد ارجحیت‌ها از تبدیل متغیرهای زبانی به صورت اعداد مثلثی فازی ثابت بر اساس شکل ۳ حاصل می‌شوند. بدین ترتیب ماتریس مقایسه‌های زوجی هر رده که در آن تصمیم‌گیرنده، ارجحیت‌ها را با اعداد فازی مشخص کرده، تشکیل می‌شود. فرم کلی تابع عضویت عدد

سه جمله اول در رابطه (۱۶)، بیانگر معیارهای ارزشمندی طراحی هستند و هر سه با ضریب ۱ یعنی با وزن‌های مساوی در رابطه یاد شده وارد شد. این در حالی است که این سه معیار، اهمیت یکسان ندارند. بنابراین اعمال وزن متناسب برای هر کدام، لازم به نظر می‌رسد. گرچه تاکنون در مباحث ارائه شده پیرامون تونل‌های رسوب‌گیر، ایده صریح و روشنی برای مقدار این وزن‌ها ارائه نشده است، اما در مورد اینکه معیار راندمان مهم‌تر از معیار گرفتگی و به همین ترتیب معیار گرفتگی مهم‌تر از معیار دبی ورودی به تونل است، اتفاق نظر خوبی در میان بیشتر کارشناسان آشنا با طراحی این سازه کنترل رسوب وجود دارد. اما این اهمیت و ارجحیت را چگونه می‌توان به اعدادی قابل استفاده در طراحی تبدیل کرد؟ راه حل پیشنهادی در پژوهش حاضر (با توجه به ویژگی‌های مسأله) استفاده از مفاهیم فازی و به ویژه روش AHP<sup>۳۶</sup> فازی است.

## رویکرد فازی و کاربرد آن در طراحی بهینه تونل رسوبگیر

به طور کلی سیستم‌های فازی را می‌توان به خوبی برای مدل‌سازی دو نوع اصلی عدم قطعیت در پدیده‌های موجود در جهان به کار برد. نوع اول عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری در شناخت پیچیدگی‌های یک پدیده است و نوع دوم عدم قطعیت مربوط به عدم صراحت و عدم شفافیت مربوط به یک پدیده با ویژگی خاص است. به این معنی که، یک پدیده ممکن است غیر صریح و وابسته به قضاوت افراد باشد [۱۲، ۱۳ و ۱۴].

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از معروف‌ترین فنون در تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره است. این روش که نخستین بار به وسیله‌ی توماس ساعتی<sup>۳۷</sup> ابداع شد، هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در تصمیم‌گیری با



۲- یک عدد قطعی برای برش خاص هر درایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

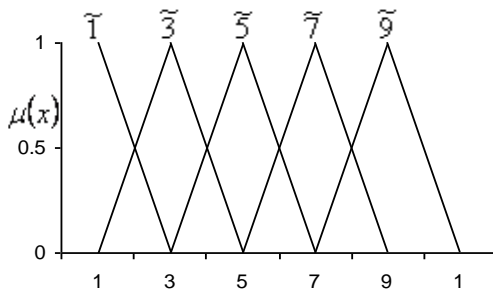
$$\tilde{a}_{ij}^{\alpha} = \mu a_{iju}^{\alpha} + (1 - \mu) a_{ijl}^{\alpha}, \quad \forall \mu \in [0,1] \quad (23)$$

۳- تشکیل ماتریس اعداد قطعی برای برش فوق مطابق رابطه (۲۴):

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{21}^{\alpha} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{a}_{1n}^{\alpha} \\ \tilde{a}_{21}^{\alpha} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{a}_{2n}^{\alpha} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{a}_{n1}^{\alpha} & \tilde{a}_{n2}^{\alpha} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

۴- محاسبه مقدار ویژه ماتریس قطعی و تعیین بردار وزن-ها مانند حالت قطعی

گام چهارم: ترکیب اوزان قطعی و محاسبه اوزان نهایی گزینه‌ها در مرحله پایانی AHP



شکل ۳ اعداد فازی مثلثی

مطابق روش پیشنهادی کونگ و بای و پس از گرفتن نظر کارشناسان، با توجه به اعداد فازی شکل (۳) ماتریس مقایسه زوجی معیارها برای پارامترهای راندمان  $Ran$ ، گرفتگی  $B$ ، و دبی رسوبگیر  $Q_{EX}$ ، به صورت رابطه (۲۵) انتخاب و تنظیم شد:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} Ran & B & Q_{EX} \end{matrix} \\ \begin{matrix} Ran \\ B \\ Q_{EX} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & \tilde{5} & \tilde{7} \\ \tilde{5}^{-1} & 1 & \tilde{4} \\ \tilde{7}^{-1} & \tilde{4}^{-1} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (25)$$

سپس مطابق روش کونگ و به شرح زیر، وزن معیارها از ماتریس فوق محاسبه شد:

فازی مثلثی  $M = (a,b,c)$  در این روش در رابطه (۱۷) نشان داده شده‌است.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه فوق  $a$ ،  $b$  و  $c$ ، اعدادی حقیقی، ثابت و نامساوی است. عملگرهای بین اعداد فازی:  $\tilde{M}_\alpha = [m_L^\alpha, m_R^\alpha]$  و  $\tilde{N}_\alpha = [n_L^\alpha, n_R^\alpha]$  نیز با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{M} \oplus \tilde{N} = [m_L^\alpha + n_L^\alpha, m_R^\alpha + n_R^\alpha] \quad (18)$$

$$\tilde{M} \ominus \tilde{N} = [m_L^\alpha - n_L^\alpha, m_R^\alpha - n_R^\alpha] \quad (19)$$

$$\tilde{M} \otimes \tilde{N} = [m_L^\alpha n_L^\alpha, m_R^\alpha n_R^\alpha] \quad (20)$$

$$\tilde{M} \div \tilde{N} = [m_L^\alpha / n_R^\alpha, m_R^\alpha / n_L^\alpha] \quad (21)$$

که  $\alpha \in [0,1]$  و  $m_L, m_R, n_L, n_R$  اعدادی حقیقی و مثبت است. علاوه بر این، برش  $\alpha$  برای عدد فازی  $M$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\forall \alpha \in [0,1] \\ \tilde{M}_\alpha = [a^\alpha, c^\alpha] \\ = [(b-a)\alpha + a, -(c-b)\alpha + c] \quad (22)$$

گام سوم: استخراج بردار وزن‌ها برای هر یک از ماتریس‌های مرحله‌ی قبل.

این روش به دنبال یافتن بردار اوزان از ماتریس‌های فازی مرحله‌ی قبل با تعمیم روش بردار ویژه<sup>۳۹</sup> در روش AHP قطعی است. مراحل محاسبه اوزان هر ماتریس به شرح زیر است:

۱- برای هر درایه برشی خاص از عدد فازی تعیین می‌شود.

وزن‌ها از روش **AHP** فازی، تابع برازندگی مساله تونل رسوبگیر از رابطه (۱۶) به صورت رابطه (۲۷) اصلاح می‌شود:

$$f(x) = w_1 \left( \frac{Q_{Ex}}{Q_D} \right) \times 100 + w_2 \left( \frac{h - D_{FEx}}{h} \right) \times 100 - w_3 \left( \frac{Q_{Br} + Q_{St}}{Q_{Br} + Q_{St} + Q_{Sc}} \right) \times 100 + \alpha + \beta + \gamma + \delta \quad (27)$$

در رابطه فوق:

وزن معیار دبی ورودی به تونل :  $w_1 = 0.0741$

وزن معیار گرفتگی کمینه :  $w_2 = 0.2067$

وزن معیار راندمان بیشینه :  $w_3 = 0.7192$

### طراحی بهینه در مقایسه با طرح‌های موجود

با استفاده از تابع هدف به دست آمده در رابطه (۲۷)، سه پروژه بند انحرافی و کانال آبگیر در کشور هند (که قبلاً به آنها اشاره شد) انتخاب شد. شکل ۴ منحنی دانه‌بندی مصالح کف رودخانه در این سه پروژه را نشان می‌دهد که از اطلاعات این نمودار برای محاسبه پارامترهای لازم در محاسبه بار کف و معلق (از روش ساماگا) استفاده شده است. نتایج وضع موجود و طراحی بهینه به روش جستجوی ژنتیکی در جدول ۲ ارائه شده است. در پروژه نارورا، طرح موجود در حال حاضر دارای گرفتگی حدود ۳۶ درصد است که کمی بیش از بیشینه مورد نظر در توصیه‌های طراحی (۳۵ درصد) است.

جدول ۲ نتایج وضع موجود و بهینه طراحی برای سه تونل

تونل رسوبگیر نارورا		نام پروژه
۴۲۵۰	m <sup>3</sup> /s	دبی رودخانه
۲۴۱	m <sup>3</sup> /s	دبی کانال
۱۵/۵	m	عرض دریچه تخلیه رسوب
طرح	طرح	مشخصات تونل طراحی شده:
موجود	بهینه	
۶۰/۹۶	۱۰۰/۶۵	دبی رسوبگیر
۱/۰۰	۱/۴۸	ارتفاع تونل
۱۵/۲۴	۱۱/۵۰	عرض خالص رسوبگیر
۳۶/۳۸	۸/۵۲	گرفتگی در تونل
۸۷/۵۵	۸۷/۴۳	راندمان رسوبگیر

$$\tilde{5}_\alpha = [3 + 2\alpha, 7 - 2\alpha] = [4, 6]$$

$$\tilde{7}_\alpha = [5 + 2\alpha, 9 - 2\alpha] = [6, 8]$$

$$\tilde{4}_\alpha = [2 + 2\alpha, 6 - 2\alpha] = [3, 5]$$

$$\tilde{5}_\alpha^{-1} = \left[ \frac{1}{7 - 2\alpha}, \frac{1}{3 + 2\alpha} \right] = \left[ \frac{1}{6}, \frac{1}{4} \right]$$

$$\tilde{7}_\alpha^{-1} = \left[ \frac{1}{9 - 2\alpha}, \frac{1}{5 + 2\alpha} \right] = \left[ \frac{1}{8}, \frac{1}{6} \right]$$

$$\tilde{4}_\alpha^{-1} = \left[ \frac{1}{6 - 2\alpha}, \frac{1}{2 + 2\alpha} \right] = \left[ \frac{1}{5}, \frac{1}{3} \right]$$

روابط بالا طبق روش کونگ، با فرض  $\alpha = 0.5$  به دست آمده است. همچنین با فرض  $\mu = 0.5$  داریم:

$$a_{ij}^\alpha = \mu a_{ij}^\alpha_U + (1 - \mu) a_{ij}^\alpha_L \quad (26)$$

در نتیجه درایه‌های ماتریس  $\tilde{A}$  در رابطه (۲۴) را می‌توان به دست آورد:

$$a_{23}^{0.5} = 4, a_{21}^{0.5} = 0.2083, a_{13}^{0.5} = 7, a_{12}^{0.5} = 5$$

$$a_{32}^{0.5} = 0.2667, a_{31}^{0.5} = 0.1458$$

و در نتیجه:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 0.2083 & 1 & 4 \\ 0.1458 & 0.2667 & 1 \end{bmatrix}$$

مقادیر ویژه ماتریس بالا به شرح زیر است:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 3.1587 \\ \lambda_2 = -0.0793 + 0.6050 i \\ \lambda_3 = -0.793 - 0.6050 i \end{cases}$$

بنابراین:

$$\lambda_{\max} = \lambda_1 = 3.1587$$

و بردار ویژه مربوط به این مقدار ویژه:

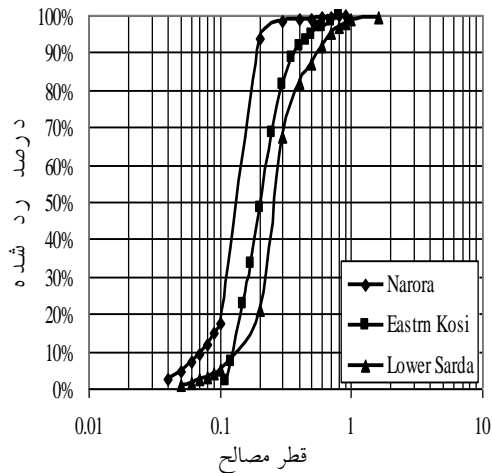
$$V = \begin{bmatrix} 0.9564 \\ 0.2749 \\ 0.0986 \end{bmatrix}$$

با نرمال‌سازی بردار فوق، بردار وزن‌ها به دست می‌آید:

$$Weights = (0.7192, 0.2067, 0.0741)$$

این وزن‌ها به ترتیب از چپ به راست مربوط به معیار راندمان، گرفتگی و دبی رسوبگیر است. پس از محاسبه

در فرایند بهینه‌یابی در پروژه نارورا جستجو با نقاطی از جمعیت اولیه ۴۰ از فضای حل آغاز شده‌است که مقدار تابع هدف در آن‌ها نزدیک به نقطه بهینه نهایی است. به عبارت دیگر مشخصات طراحی‌های موجود در اولین نسل جستجو به گونه‌ای است که تخلفی از قیدهای طراحی (روابط (۱۲) تا (۱۵)) در آن‌ها دیده نمی‌شود.



شکل ۴ منحنی دانه‌بندی مصالح بستر در محل سه پروژه

بر روی پارامترهای مختلف به کار گرفته‌شده در روش جستجوی ژنتیکی سعی و خطاهای مکرری انجام شد و هرچند که برای اطلاعات ورودی مختلف در صورت نیاز در پارامترهای مورد استفاده تغییرات لازم اعمال شد اما در بیشتر موارد وضعیت نشان‌داده شده در جدول زیر برای پارامترهای یاد شده استفاده شده است. در پژوهش حاضر پس از چند مرحله سعی و خطا مشخص شد که تعیین ۳۰۰ نسل برای جستجو مناسب به نظر می‌رسد. در مراحل سعی و خطا دیده شد که در بیشتر موارد پس از گذشت حدود ۲۵۰ نسل از شروع جستجو، به دلیل عدم بهبود بیشتر در مقدار تابع برازش الگوریتم جستجو را متوقف می‌کند.

نام پروژه		تونل رسوبگیر بند ساردا	
دبی رودخانه	$m^3/s$	۴۲۵۰/۰۰	
عمق	m	۴/۳۳	
عرض دریچه تخلیه رسوب	m	۱۵/۵۰	
مشخصات تونل طراحی شده:	طرح	طرح	
		بهینه	موجود [۳]
دبی رسوبگیر	$m^3/s$	۷۸/۵۰	۱۸۱/۲۳
ارتفاع تونل	m	۱/۰۰	۱/۳
عرض خالص رسوبگیر	m	۱۸/۳۶	۳۹/۸۳
گرفتگی در تونل	%	۲۶/۵۵	۴۷/۰۹
راندمان رسوبگیر	%	۹۸/۶۶	۹۶/۴۷

نام پروژه		تونل رسوبگیر ایسترن کاسی	
دبی رودخانه	$m^3/s$	۱۱۳۲۰	
دبی کانال	$m^3/s$	۲۸۳	
عرض دریچه تخلیه رسوب	m	۱۶/۰۰	
مشخصات تونل طراحی شده:	طرح	طرح	
		بهینه	موجود [۳]
دبی رسوبگیر	$m^3/s$	۸۵/۸۰	۱۶۸/۰۰
ارتفاع تونل	m	۱/۰۰	۱/۲۰
عرض خالص رسوبگیر	m	۱۶/۰۸	۳۵/۰۰
گرفتگی در تونل	%	۲۸/۱۶	۴۰/۵۴
راندمان رسوبگیر	%	۹۹/۷۸	۸۸/۵۲

مقدار تابع هدف در این وضعیت (با چشم‌پوشی از جریمه تخلف از قید  $Blockage < 35\%$ ) که از رابطه (۲۷) به دست می‌آید، برابر با  $۵۳/۵۷۲۲-$  است. اما الگوریتم جستجوی ژنتیکی پس از طی ۲۳۳ نسل از شروع فرایند جستجو، هرچند در دستیابی به راندمان بالا در رسوبگیری (در مقایسه با طرح فعلی) توفیق چندانی نداشت اما با رسیدن به طرحی با گرفتگی اندک، توانست مقدار تابع هدف را تا  $۵۸/۰۱۴۴-$  بهبود بخشیده و طرحی با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ را به عنوان بهترین طراحی معرفی می‌کند.

مقایسه نتایج به دست آمده با طرح‌های موجود حاوی نکات قابل تاملی است که به آنها اشاره می‌کنیم:

۱- اصولاً تونل‌های رسوب‌گیر، راندمان بالایی در حذف رسوبات از جریان رودخانه دارند و طرح‌های بهینه به دست آمده هرچند در مقایسه با طرح‌های قبلی راندمان بیشتری دارند اما مزیت اصلی آنها در شاخصه راندمان نمی‌تواند باشد و نمی‌توان گفت که نقطه بهینه طراحی، راندمان به مراتب بیشتری نسبت به طرح‌های غیر بهینه خواهد داشت. در وضعیت بهینه طراحی شده، معیار گرفتگی کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به طرح موجود دارد که آن را می‌توان مهم‌ترین حسن طراحی بهینه نسبت به طرح موجود دانست.

۲- بهینه‌یابی و جستجوی انجام شده در پژوهش حاضر، در محدوده توصیه‌های طراحی انجام شده است. بنابراین چون طرح‌های موجود نیز در همین محدوده قرار دارند، آشکار است که نمی‌توان انتظار داشت که شاخص‌ها و معیارهای سنجش در نقطه بهینه به دست آمده با وضعیت موجود فاصله زیادی داشته باشد. از طرف دیگر در بعضی از موارد اگر واری محدود توصیه‌های طراحی نیز مورد جستجو و بررسی قرارگیرد، شاید به وضعیت مطلوب‌تری بتوان دست یافت. به عنوان نمونه متغیر ارتفاع تونل که توصیه‌های طراحی مقادیر بین ۱ تا ۲ متر را برای آن در نظر می‌گیرند، نقش به‌سزایی در راندمان رسوب‌گیر دارد و تاثیر آن بر سرعت درون رسوب‌گیر نیز بر معیار گرفتگی تونل اثرگذار است. شاید مقادیر کوچکتر از ۱ متر یا بزرگتر از ۲ متر وضعیت مطلوب‌تری را برای راندمان و گرفتگی تونل ایجاد کند اما این برخلاف ملاحظات و توصیه‌های طراحی است و می‌تواند مسائل و مشکلاتی را در بخش‌های اجرایی، بهره‌برداری و همچنین نگهداری تونل ایجاد نماید. به‌رحال در محدوده تعریف شده برای متغیرهای مساله نمی‌توان انتظار داشت که همواره راندمان نزدیک به ۱۰۰ یا گرفتگی نزدیک به صفر را بتوان در نقطه بهینه به دست آمده مشاهده کرد.

تعداد نسل‌های بدون بهبودی در مقدار تابع برازش نیز ۱۰۰ نسل در نظر گرفته شد ( $\text{Stall Generation}=100$ ). به همین روش تعداد نفرات در هر نسل نیز ۲۰ نفر در نظر گرفته شد. در این انتخاب وجود تنوع (*diversity*) و زمان لازم برای محاسبات در هر نسل مد نظر بوده است. همچنین در هر تکرار ۲ نفر به عنوان ممتاز از جمعیت حاضر به جمعیت بعدی به صورت مستقیم منتقل می‌شوند. چهار نفر از والدین (*Parents*) نیز از طریق عملگر *Mutation*، فرزندان را به نسل بعدی می‌فرستند. سایر فرزندان نسل بعد از طریق عملگر *Crossover* از والدین (*Parents*) به دست می‌آید.

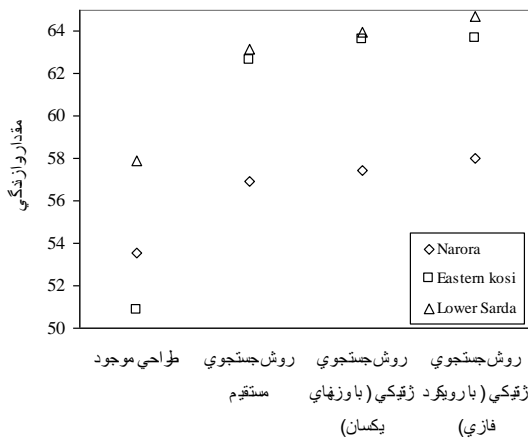
با توجه به جدول ۲، در پروژه بند ساردا و در وضعیت طراحی حال حاضر این پروژه با وجود راندمان رسوب‌گیری بالا، گرفتگی درون تونل حدود ۴۷٪ گزارش شده است. مقدار تابع هدف در این وضعیت که از رابطه ۲۷ به دست می‌آید، برابر با ۵۷/۹۲۸۶- است. اما الگوریتم جستجوی ژنتیکی پس از طی ۱۹۸ نسل از شروع فرایند جستجو، ضمن دستیابی به طرحی با راندمان بالا و گرفتگی قابل قبول مطابق توصیه‌های طراحی، مقدار تابع هدف را نیز تا ۶۴/۷۲۱- بهبود بخشیده است.

در جدول ۲ همچنین، وضعیت طراحی فعلی و بهینه در پروژه ایسترن کاسی، ارائه شده است. در وضعیت حال حاضر، نسبت دبی رسوب‌گیر به دبی کانال آبگیر نزدیک به ۶۰٪ و میزان گرفتگی درون تونل حدود ۴۰ درصد است. این وضعیت با توجه به شاخص‌های سنجش طرح و قیده‌های طراحی که پیشتر به آن‌ها اشاره شد، اصولاً وضعیت مطلوبی نیست. اما الگوریتم جستجوی ژنتیکی پس از گذشت ۲۳۸ نسل از شروع فرایند جستجو، ضمن دستیابی به طرحی که کلیه قیده‌ها و ضوابط طراحی را ارضاء می‌کند، مقدار تابع هدف (رابطه ۲۷) را نیز تا ۶۳/۶۲۸- بهبود بخشیده است.

جستجوی ژنتیکی همگرا شد که نشان دهنده وجود مینیمم-های محلی نزدیک به نقاط بهینه است. در هر سه پروژه مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که طرح حاصل از جستجو با روش مستقیم مانند نقطه شروع آن، نتوانسته است به اندازه طرح حاصل از جستجوی ژنتیکی تابع هدف مساله طراحی را بهبود بخشد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار برازندگی در روش جستجوی ژنتیکی با رویکرد فازی از مقدار برازندگی روش‌های دیگر بیشتر است.

در شکل ۵، مقدار تابع هدف به ازای طرح‌های مختلف به دست آمده (شامل طراحی موجود، طراحی ناشی از روش جستجوی ژنتیکی و طرح حاصل از روش جستجوی مستقیم) برای هر سه پروژه، با هم مقایسه شده است.

مقدار تابع هدف در این شکل نشان‌دهنده امتیاز هر کدام از این طرح‌ها بر اساس تابع ارائه شده در رابطه (۲۷) است. البته شایان ذکر است که برای آنکه بتوان طرح‌های جدید را با طراحی‌های فعلی از دیدگاه بهبود شاخص‌ها مقایسه کرد، در برآورد امتیاز طرح‌های فعلی، از جریمه تخلف از قیدهای طراحی چشم‌پوشی شده است.



شکل ۵ مقایسه امتیاز طراحی‌های به دست آمده از روش‌های مختلف در پروژه نارورا

۳- طراحی‌های حال حاضر در پروژه‌های بند ساردا و ایسترن کاسی با وجود اینکه راندمان بالا و قابل ملاحظه‌ای دارند اما درصد گرفتگی در هر دو مورد بیش از ۳۵ درصد است. بنابراین این طرح‌ها به دلیل تخلف از یکی از قیدهای طراحی، در محدوده جواب‌های قابل قبول و فضای حل ما در پژوهش حاضر قرار نمی‌گیرند و نتایج آنها را بر اساس مقدار تابع هدف تنها زمانی توانستیم با نتایج طرح‌های به دست آمده از روش جستجوی ژنتیکی روی یک نمودار مقایسه کنیم که از جریمه‌ای که طبق رابطه (۲۷) بابت تخلف از قیدهای طراحی به آنها تعلق می‌گیرد چشم‌پوشی شد.

### مقایسه نتایج جستجوی ژنتیکی با نتایج روش جستجوی مستقیم<sup>۴۱</sup>

به منظور مقایسه توانمندی‌ها و نتایج به دست آمده از روش جستجوی ژنتیکی با یک روش جستجوی دیگر در این مساله خاص، طرحی که در پروژه نارورا به عنوان طرح برگزیده از سعی و خطاهای دستی به دست آمده است (طرح موجود) به عنوان نقطه شروع جستجو به ابزار Direct search در نرم افزار MATLAB ارائه شد. در توضیح چگونگی عملکرد این روش به این توضیح بسنده می‌کنیم که در این روش، جستجو در فضای حل از یک نقطه آغاز شده و سپس نقاط اطراف نقطه اولیه با شعاع مشخصی<sup>۴۲</sup> ارزیابی می‌شود. هر جا که در مقدار تابع هدف بهبودی حاصل شود، نقطه مرکزی به آن نقطه منتقل می‌شود و شعاع جستجو<sup>۴۳</sup> افزایش پیدا می‌کند. در صورت بهتر نشدن در تابع هدف، جستجو پیرامون همان نقطه این بار با شعاع کمتری تکرار می‌شود.

نتایج جستجو به روش مستقیم در فضای حل هر سه پروژه به نقاطی غیر از نقاط بهینه به دست آمده از روش

41. Direct Search

42. Initial Mesh Size

43. Mesh Size

## نتیجه‌گیری

۱- طراحی بهینه تونل رسوب‌گیر با استفاده از روش پیشنهادی کوتیاری و پانده، یک فرایند تصمیم‌گیری چند-معیاره است. با دقت در تابع هدف طراحی و توجه به این مطلب که تغییر در هر کدام از سه متغیر اصلی طراحی (دبی عبوری، عرض و ارتفاع تونل) سبب تغییرات غیر خطی در تابع هدف می‌شود و همچنین با توجه به فضای ناپیوسته تغییرات متغیر عرض تونل (مطابق توصیه‌های طراحی)، برای دستیابی به وضعیت بهینه در طراحی تونل‌های رسوب‌گیر، با هدف عبور از مینیمم‌های محلی احتمالی، به جای روش‌های کلاسیک به سراغ یک روش بهینه‌یابی مستقیم و نوین رفتیم و با استفاده از این روش جستجوی هوشمند (الگوریتم ژنتیکی) که قدرت عبور از مینیمم‌های محلی احتمالی را نیز داراست، به جستجو در فضای حل مساله پرداختیم. سپس در مقایسه نتایج به دست آمده با طراحی‌های موجود از قبل نشان دادیم که طرح‌های بهینه به دست آمده وضعیت مطلوب‌تری را نسبت به طراحی‌های حال حاضر نشان می‌دهند.

۲- در این پژوهش با استفاده از دیدگاه و منطق فازی تلاش شد تا اهمیت و وزن معیارها و شاخص‌های سنجش طرح نیز در انتخاب طرح بهینه لحاظ شود. این کار با استفاده از روش AHP فازی امکانپذیر شد. با عنایت به اینکه تعیین اهمیت معیارهای سنجش طرح با استفاده از نظرات کارشناسان انجام گرفته‌است، طرحی که با اعمال این وزن‌ها در تابع هدف (و پس از جستجوی ژنتیکی در فضای حل مساله) به عنوان طراحی بهینه انتخاب گردید، از دیدگاه کارشناسی منطقی و قابل توجیه ارزیابی می‌شود.

۳- روش جستجوی ژنتیکی و روش جستجوی مستقیم نقاط متفاوتی را به عنوان نقطه بهینه طراحی معرفی می‌کنند. تابع هدف طراحی در نقطه حاصل از روش جستجوی ژنتیکی نسبت به نقطه به دست آمده از روش جستجوی مستقیم وضعیت بهتری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر

روش جستجوی مستقیم نتوانسته طراحی را به اندازه طراحی به دست آمده از روش جستجوی ژنتیکی به وضعیت بهینه نزدیک کند. این مطلب از طرفی توانمندی روش جستجوی ژنتیکی را در نزدیک شدن به نقطه بهینه واقعی نشان می‌دهد و از طرف دیگر، احتمال وجود نقاط مینیمم محلی را در فضای حل مساله تقویت می‌کند.

۴- یک نکته شایان توجه که از بررسی طرح‌های موجود و طرح‌های به دست آمده از روش‌های به کار گرفته شده در این پژوهش مشاهده شد، این است که تونل‌های رسوب‌گیر راندمان بالایی در حذف رسوبات از جریان دارند. این مطلب را حتی در مراحل سعی و خطایی که روی طرح‌های موجود انجام شده‌است می‌توان دید [۱ و ۲]. اما این طرح‌ها بیشتر دارای گرفتگی زیادی است. همچنین به دلیل ابعاد بزرگ مقطع تونل و دبی زیادی که از آنها عبور می‌کند، تخلیه مقادیر بزرگتری از حجم آب پشت بند را سبب می‌شوند.

بنابراین نقطه قوت طرح‌های بهینه به دست آمده نسبت به طرح‌های موجود را علاوه بر افزایش راندمان، می‌توان کاهش گرفتگی تونل‌ها و استفاده از کمترین دبی لازم برای رسیدن به این راندمان بالا و گرفتگی کم، برشمرد. این مطلب در مجموع سبب بهبودی مقدار تابع هدف طراحی در طرح‌های جدید به دست آمده شده است.

۵- طراحی‌های به دست آمده از روش جستجوی ژنتیکی، در حالی نسبت به طرح‌های موجود وضعیت مطلوب‌تری را نشان می‌دهد که تعداد نقاطی که به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیکی در فضای حل مساله مورد ارزیابی قرار گرفته، نسبت به کل نقاط فضای حل (با یک شعاع جستجوی منطقی و متوسط) بسیار کمتر است. این مطلب علاوه بر اینکه ما را برای دست یافتن به نقطه بهینه از جستجوی کل فضای حل بی‌نیاز می‌کند، سبب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود.

## منابع و مأخذ

- genetic algorithm coupled with artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 35, 2008, pp 1415-1421.
- [11] A. Altunkaynak, Sediment load prediction by genetic algorithms. *Journal of Advances in Engineering Software*, 40, 2009, pp 928-934.
- [۱۲] کوره‌پزان دزفولی امین، اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب، تهران، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴، ص ۱-۳.
- [۱۳] معتمد وزیری، ب.، احمدی، ح.، مهدوی، م.، شریفی، ف. و جواهری، ن. بررسی امکان مدل‌سازی بار معلق رودخانه با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز زنجانرود)، نشریه مرتع و آبخیز داری، مجله منابع طبیعی ایران، ۱۳۸۸، دوره ۶۲، شماره ۲، ص ۲۸۳-۲۹۸.
- [۱۴] نبی زاده، م.، مساعدی، ا.، حسام، م.، دهقانی، ا.، مفتاح، م. و ذاکری، نیا، م. پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از سیستم استنتاج فازی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.
- [۱۵] قدسی پور حسن، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، تهران، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹، ص ۲۵-۲.
- [16] C. K. Kwong and H. Bai, *A fuzzy AHP approach to determination in importance weights of customer requirements in quality function development*, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13, 2002, pp 367- 377
- [1] R. J. Garde, P. K. Pande, *Use of sediment transport concepts in design of tunnel-type sediment excluders*, Commission on Irrig. And Drain. (ICID), 1976, pp 101- 109
- [2] U.C.Kothyari, P.K.Pande and A.K.Gahlot, *Design for tunnel-type sediment excluders*, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 1994, pp 36- 47
- [3] R. J. Garde, K. G. Ranga Raju, *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems (second edition)*, New Delhi, Wiley Eastern Limited, 1985, pp 488- 491
- [4] B. R. Samaga, K. G. Ranga Raju, and R. J. Garde, *Concentration distribution of sediment mixtures in open channel flow*, *Journal of hydraulic research*, 23(5), 1985, pp 467- 481
- [5] B. R. Samaga, K. G. Ranga Raju and R. J. Garde, *Bed load transport of sediment mixtures*, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(11), 1986, pp 1009- 1017
- [6] W. H. Graf, *Hydraulics of sediment transport*, McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y., 1971, pp 436- 440
- [7] S. Rajasekaran, G. A. Vijayalakshmi Pai, *Neural networks, Fuzzy logic and Genetic algorithm; synthesis and applications*, Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., 2004.
- [8] A. A. Dehghani, M. Ghodsian, G. A. Montazer, and F. NasiriSaleh, *Cross-Section Optimization of Concrete Gravity Dams By Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network*, *Modares Journal*. No2, 2006, pp 23-33.
- [9] G. Tayfur and T. Moramarco, *Predicting hourly-based flow discharge hydrographs from level data using genetic algorithms*. *Journal of Hydrology*, 352, 2008, pp 77- 93.
- [10] M. Nasser, K. Asghari and M.J. Abedini, *Optimized scenario for rainfall forecasting using*

