

تحلیل عدم قطعیت تراز سطح آب رودخانه سیستان و بررسی قابلیت اعتماد سیستم کنترل سیل

لیلا افتخاریان¹، احمد ابریشم چی^{2*}، مسعود تجریشی³

1- کارشناس سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسین مشاور بندآب

2- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

3- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

* تهران، صندوق پستی 11365 - 9517

abrisham@sharif.edu

چکیده - طراحی، تحلیل و بهره‌برداری از سیستم‌های کنترل سیل با مقداری از عدم قطعیت همراه است، از این رو، مدیریت مؤثر سیل، به تحلیل عدم قطعیت‌ها نیاز دارد. یکی از بخش‌های اصلی مطالعات مدیریت سیل، تحلیل جریان و محاسبه تراز سطح آب رودخانه در دبی‌های مختلف سیل است. در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، عدم قطعیت تراز سطح آب رودخانه سیستان تحلیل شده است. بدین منظور، عدم قطعیت‌های بارگذاری (سیل طراحی) و مقاومت (ظرفیت هیدرولیکی رودخانه) تحلیل و با استفاده از نتایج آنها، تحلیل قابلیت اعتماد سیستم کنترل سیل انجام شده است. عدم قطعیت ظرفیت هیدرولیکی به روش تحلیل مرتبه اول و عدم قطعیت هیدرولوژیکی با توجه به عدم قطعیت آماره‌ها توزیع نمونه‌گیری آنها، تحلیل شده است. برای تحلیل قابلیت اعتماد سیستم رودخانه از روش انتگرالگیری مستقیم استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت صرف نظر کردن از عدم قطعیت‌های هیدرولیکی، تراز سطح آب در رودخانه به میزان قابل ملاحظه‌ای دست پایین برآورد شده و به افزایش ریسک سیستم کنترل سیل منجر می‌شود.

کلید واژگان: رودخانه سیستان، تحلیل عدم قطعیت، تحلیل قابلیت اعتماد، تراز سطح آب، سیل بند.

1- مقدمه

ناتوانی در تعیین دقیق پارامترهای مدل است. عدم قطعیت داده‌ها، ناشی از خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگنی و پرت بودن داده‌ها، خطاهای مربوط به جمع‌آوری و ثبت داده‌ها و کمبود داده‌های مورد نیاز و بالاخره، عدم قطعیت‌های عملکردی مربوط به ساخت، تعمیر و نگهداری و به طور کلی مربوط به عوامل انسانی می‌شود. تعیین تراز سطح آب در رودخانه، برای برنامه‌ریزی، طراحی و تحلیل پروژه‌های کنترل سیل و ساماندهی رودخانه ضروری است. محاسبه تراز سطح آب، به مدل محاسبه جریان متغیر تدریجی و خصوصیات هندسی و

طراحی، تحلیل و بهره‌برداری از سیستم‌های آبی با عدم قطعیت همراه است. منابع مختلف عدم قطعیت عبارتند از: عدم قطعیت‌های طبیعی (ذاتی)، عدم قطعیت‌های مربوط به مدل و پارامترها و داده‌های آن و عدم قطعیت‌های عملکردی. عدم قطعیت‌های طبیعی، عدم قطعیت‌های مربوط به فرایندهای طبیعی تصادفی مانند بارش و جریان رودخانه است. عدم قطعیت مدل ناشی از ساده‌سازیها و ناتوانی مدل در توصیف و توضیح دقیق سیستم واقعی است. عدم قطعیت پارامترها ناشی از

از آنها عبارت‌اند از: تابع چگالی احتمال¹ که کاملترین نحوه توصیف عدم قطعیت محسوب می‌شود، بازه اطمینان متغیر برای احتمال مشخص و گشتاورهای آماری [1]. یکی از مناسبترین روشهای کمی‌سازی عدم قطعیت متغیرهای تصادفی، استفاده از گشتاورهای آماری مانند واریانس، انحراف معیار و ضرایب تغییرات است.

در طراحی و تحلیل در مهندسی منابع آب، اصولاً تصمیم‌گیریها بستگی زیادی به پاسخ سیستم در شرایط طراحی دارد. در صورت غیرقطعی بودن برخی اجزای سیستم آبی، پاسخ سیستم را نمی‌توان دارای اطمینان کافی و دقیق ارزیابی کرد. هدف اصلی از تحلیل عدم قطعیت، تعیین عدم قطعیت پاسخ سیستم (نتایج مدل) به صورت تابعی از عدم قطعیت‌های مدل و پارامترهای تأثیرگذار در سیستم است.

روشهای مختلفی برای تحلیل عدم قطعیت مسائل مهندسی منابع آب وجود دارد که هر یک از آنها از دیدگاه پیچیدگی ریاضی و نیز داده‌های مورد نیاز در سطح مشخصی متفاوتی قرار دارند. در تقسیم‌بندی کلی، اینها به دو دسته تحلیلی و تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب روش تحلیل، به طبیعت مساله مورد مطالعه از نظر مقدار اطلاعات موجود، محدودیت منابع، پیچیدگی مدل و نوع آن و دقت مطلوب برای نتایج مدل بستگی دارد.

با روشهای تحلیلی می‌توان اطلاعات کاملی درباره فرایند تصادفی (تابع چگالی احتمال دقیق یا گشتاورهای آماری) را به صورت تابعی از متغیرهای تصادفی دخیل در سیستم به دست آورد. در عمل، استفاده از بسیاری از روشهای تحلیلی با محدودیت روبه‌رو است؛ زیرا به روابط تابعی ساده و نیز استقلال پارامترهای مدل نیاز است که در مسائل واقعی کمتر وجود دارد. بسیاری از مدلها یا شیوه‌های طراحی که در مهندسی منابع آب به کار می‌روند، غیرخطی و پیچیده‌اند به طوری که به

هیدرولیکی رودخانه به عنوان پارامترهای مدل و دبی طراحی سیل به عنوان پارامتر ورودی مدل، نیاز دارد. از آنجا که ساختار مدل و پارامترهای آن و نیز دبی طراحی سیل، عدم قطعیت‌هایی دارند، نتایج مدل رانمی‌توان قطعی تلقی کرد. در واقع به جای یک مقدار قطعی، بهتر است با تعریف تراز سطح آب به عنوان متغیری تصادفی، حدود اطمینان آن را مشخص کنیم.

عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در ایجاد عدم قطعیت در محاسبات تراز سطح آب در رودخانه، دخالت دارند. عدم قطعیت هیدرولوژیکی شامل عدم قطعیت ذاتی، عدم قطعیت نوع توزیع احتمال و عدم قطعیت پارامترهای توزیع است. عدم قطعیت هیدرولیکی شامل عدم قطعیت‌های مدل، روش محاسباتی، پارامترها و داده‌های مدل است.

در روشهای متداول و سنتی طراحی سازه‌های هیدرولیکی برپایه ریسک - که در آنها از نرم افزارهای هیدرولیکی مانند HEC-RAS برای محاسبه تراز و پروفیل سطح آب رودخانه استفاده می‌شود - فقط عدم قطعیت مربوط به تصادفی بودن ذاتی پدیده‌های هیدرولوژیکی در نظر گرفته می‌شود و به عدم قطعیت نتایج این مدلها - که معلول عدم قطعیت‌های مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است - کمتر توجه می‌شود. این موجب می‌شود که نتایج مدل با واقعیت فاصله زیادی داشته باشد. در حقیقت برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در طراحی، از ضرایب اطمینان استفاده می‌شود. ضرایب اطمینان بر اساس تجربیات و قضاوت مهندسی تعیین می‌شوند؛ لکن نمی‌توانند ایمنی و عملکرد مطلوب سیستم را با قابلیت اعتماد مطلوب تأمین کنند. همچنین در بسیاری از موارد نمی‌تواند اطلاعاتی درباره نحوه تأثیر متغیرها و پارامترهای مختلف سیستم بر عملکرد سیستم ارائه کنند.

برای توصیف و کمی‌سازی عدم قطعیت متغیرهای تصادفی از مشخصه‌های مختلفی استفاده می‌شود که برخی

1. Probability Density Function (pdf)

از تحقیقات انجام شده در زمینه تحلیل عدم قطعیت تراز سیل در رودخانه و ظرفیت سازه‌های کنترل سیل، به تحقیقات Lee و Mays، Oegema و Mc Bean، Cesare، Singh و Melching، Mays و Tung، و Johnson می‌توان اشاره کرد [8-13].

در این مقاله، با توجه به عدم قطعیت پارامترهای مدل محاسبه جریان متغیر تدریجی و عدم قطعیت پارامترهای تابع توزیع احتمال سیل، عدم قطعیت و بازه اطمینان تراز سطح آب تحلیل شده است. به بیان دیگر، دو منبع عدم قطعیت یعنی عدم قطعیت دبی سیل طراحی (عدم قطعیت هیدرولوژیکی) و عدم قطعیت ظرفیت رودخانه (عدم قطعیت هیدرولوژیکی) بررسی شده است. به عنوان مطالعه موردی، عدم قطعیت تراز سطح آب در مقطع بحرانی رودخانه سیستان تحلیل و تأثیر آن بر طراحی سیل‌بند اطراف رودخانه بررسی شده است. همچنین نتایج حاصل با حالتی که فقط عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود مقایسه شده است.

2- عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی (سیل طراحی)

جریان سیل به طور ذاتی و طبیعی، فرایندی تصادفی و غیرقطعی است. از این رو برای برآورد آن از تئوری احتمال استفاده می‌شود. یکی از چالش‌ها در مطالعات هیدرولوژیکی، برآورد دبی سیل با دوره بازگشت مشخصی است که خارج از دامنه وقایع اندازه‌گیری شده -در نمونه نسبتاً کوچک فرایندهای هیدرولوژیکی- قرار می‌گیرد. در تحلیل فراوانی سیل، با برآزش یک توزیع احتمال مناسب بر داده‌های نمونه، پارامترهای توزیع و سپس دبی سیل با دوره بازگشت مورد نظر برآورد می‌شود. دبی سیل برآورد شده، آماره‌ای است که از یک نمونه به دست می‌آید و به دو دلیل، متغیری تصادفی است؛ اول اینکه، نوع توزیع احتمال انتخاب شده قطعی نیست. هیدرولوژیست‌ها از چند نوع توزیع احتمال مرسوم

دست آوردن توزیع احتمال خروجی (نتایج) مدل به صورت تحلیلی غیرممکن است.

به عنوان یک گزینه عملی، روش‌هایی مناسب و رایج‌اند که تقریبی از ویژگی‌های آماری خروجی (نتایج) غیرقطعی مدل را به دست می‌آورند. از میان روش‌های تقریبی می‌توان به روش گشتاور دوم مرتبه اول حول میانگین (MFOSM)¹، روش برآورد نقاط احتمالی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو اشاره کرد.

Burges در سال 1979 به بررسی تأثیر توأم عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی پرداخت [2]. او از روش تحلیل مرتبه اول عدم قطعیت برای برآورد پهنای اراضی سیلگیر اطراف رودخانه استفاده کرد. Tung و Mays در سال 1980 یک رابطه قابلیت اعتماد ارائه کردند که در آن عدم قطعیت‌های توأم هیدرولوژیکی و هیدرولوژیکی در نظر گرفته شده بود. آنها با استفاده از تحلیل مرتبه اول خطا بر روی رابطه مانینگ، قابلیت اعتماد کالورت مستطیلی را به صورت احتمال اینکه مقاومت یا ظرفیت کالورت بیشتر از بارگذاری (دبی سیلاب) شود، تحلیل کردند [3]. Mays و Tung در سال 1981 دو مدل استاتیکی و دینامیکی برای طراحی سیل بند ارائه دادند [4]. McBean و همکاران در سال 1984 با تحلیل قابلیت اعتماد به روش MFOSM، انحراف معیار عرض سیلابدشت را برآورد کردند [5]. در سال 1986 نتایج تحقیقات گسترده‌ای در زمینه دقت پروفیل‌های سطح آب توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا² (HEC) منتشر شد [6]. خلاصه‌ای از نتایج این تحقیقات در مقاله‌ای توسط Davis و Burnham در سال 1990 به چاپ رسید [7]. در این تحقیقات، عدم قطعیت‌های مربوط به هندسه مقطع و خصوصیات هیدرولوژیکی مقطع مانند ضریب زبری مانینگ با شبیه‌سازی مونت کارلو برآورد شد.

1. Mean First-Order Second-Moment

2. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers

استفاده می‌کنند، لیکن این توزیعها را به عنوان بهترین توزیع در تمامی موارد نمی‌توان توصیه کرد؛ زیرا بستگی به خصوصیات هیدرولوژیکی مورد مطالعات دارد. شایان ذکر است که آزمونهای خوبی برازش نیز نمی‌توانند کمک چندانی برای انتخاب بهترین توزیع نمایند در تحلیل فراوانی سیل، معمولاً برون‌یابی داده‌های موجود باید انجام گیرد. با آنکه بسیاری از توزیعها شکل یکسانی در حول مرکز توزیع دارند، لیکن دنباله‌های متفاوتی در اطراف دارند. لذا آزمون خوبی برازش لازم است، اما کافی نیست. اگر آزمون خوبی برازش تنها معیار مورد نیاز بود، معادلات چندجمله‌ای درجه بالا، برازش بهتری بر داده‌ها - در مقایسه با هر توزیع احتمال دلخواهی - داشتند!

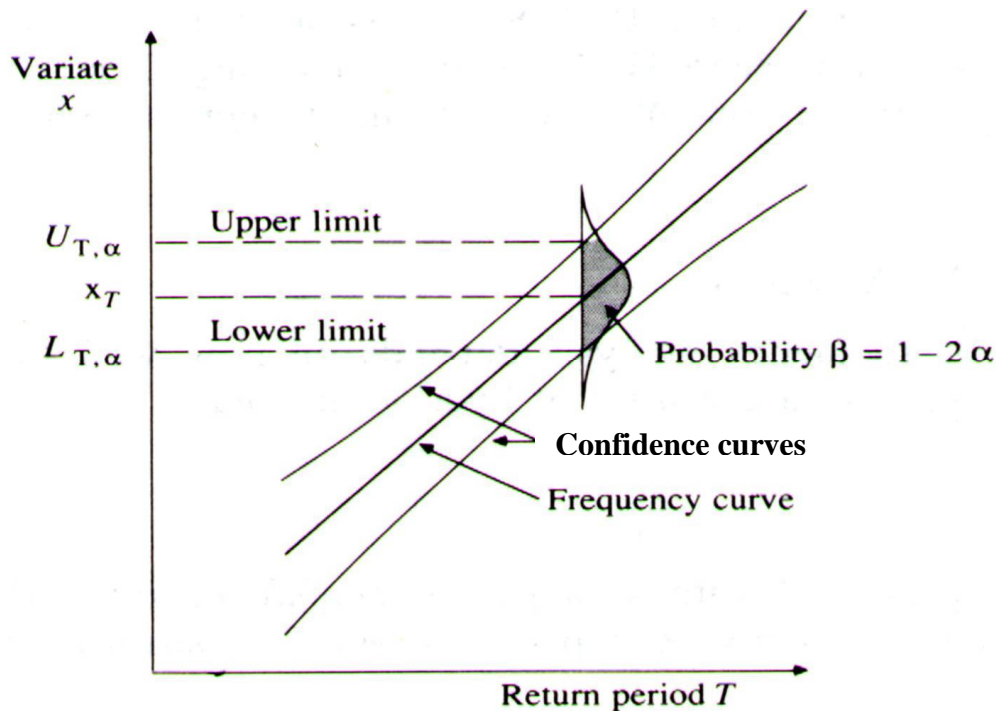
در حالی که تابع چندجمله‌ای، هیچگونه توجیه هیدرولوژیکی ندارد.

منبع دیگر عدم قطعیت در برآورد سیل، عدم قطعیت پارامترهای توزیع احتمال مورد نظر است. با توجه به اینکه داده‌های موجود، صرفاً نمونه‌ای از یک فرایند

هیدرولوژیکی است، پارامترهای تابع توزیع احتمال - که از نمونه برآورد می‌شود - غیرقطعی است و درجه عدم قطعیت بستگی به اندازه نمونه دارد. خطای استاندارد، معیاری از عدم قطعیت در برآورد دبی سیل با تحلیل فراوانی است. در واقع مقداری که برای پیشامد T ساله برآورد می‌شود، مقداری قطعی نیست، بلکه میانگین توزیع است که اغلب نرمال در نظر گرفته می‌شود و خطای استاندارد، انحراف معیار این توزیع است (شکل 1). اگر توزیع احتمال پیشامد T ساله معلوم باشد، آنگاه حدود اطمینان پیشامد T ساله را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$X_T \pm t \cdot SD_T \quad (1)$$

که در آن t انحراف نرمال استاندارد متناظر با سطح اطمینان مفروض و SD_T ، انحراف معیار توزیع احتمال پیشامد T ساله است. با افزایش اندازه نمونه، SD_T کاهش می‌یابد.



شکل 1 توزیع نمونه‌گیری پیشامد با دوره بازگشت T

3- عدم قطعیت‌های هیدرولیکی

برای تعیین ظرفیت هیدرولیکی رودخانه معمولاً از رابطه مانینگ استفاده می‌شود که شامل پارامترهای غیرقطعی ضریب مانینگ و خصوصیات هندسی رودخانه است. ضریب مانینگ با استفاده از روابط تجربی، جدولها، مقایسه با عکسها و تجربه افراد خبره برآورد می‌شود. با توجه به روش تعیین ضریب مانینگ که غالباً تخمینی و بر مبنای قضاوت مهندسی است، مقدار برآورد شده آن قطعی نیست. تحقیقات نشان داده که عدم قطعیت ضریب مانینگ تأثیر زیادی بر عدم قطعیت ظرفیت هیدرولیکی آبراهه دارد. برای تعیین عدم قطعیت ضریب مانینگ، روش مشخص و استاندارد شده‌ای وجود ندارد. پژوهشگران مقادیر مختلفی را برای این عدم قطعیت فرض کرده و بیشتر آنان به مبنای این فرضیات اشاره‌ای نکرده‌اند. تحقیقات وسیعی در مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC) در سال 1986 در قالب مطالعه‌ای آماری برای تعیین ضریب مانینگ و عدم قطعیت آن انجام شد [7.6]. رابطه‌ای که از این تحقیقات برای انحراف معیار ضریب مانینگ، S_n ، به دست آمده چنین است:

$$S_n = n \sqrt{(e^{(0.582+0.10 \ln(n))^2} - 1)} \quad (2)$$

خصوصیات هندسی مورد استفاده برای محاسبه ظرفیت هیدرولیکی مقطعی از رودخانه شامل A (سطح مقطع جریان) و p (محیط خیس شده) است. عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای A و p ناشی از خطاهای نقشه برداری بوده و به دقت روشها و تجهیزات به کار رفته بستگی دارد. به منظور تعیین عدم قطعیت این دو پارامتر، روش به کار گرفته شده توسط McBean و Oegema و روشی مناسب و کاربردی است [9]. از آنجا که مقادیر A و p، به اندازه‌گیرها در دو جهت عمقی و عرضی (z,y) بستگی دارند، درجه عدم قطعیت این دو پارامتر برحسب عدم قطعیت اندازه‌ها در این دو امتداد بیان شده و عبارت‌اند از:

$$A = f(y, z) \quad \text{و} \quad p = f(z) \quad (3)$$

$$(4) \Omega_A = \sqrt{\Omega_y^2 + \Omega_z^2} \quad \text{و} \quad \Omega_p \cong \Omega_z$$

$$\Omega = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (5)$$

که در آن \bar{X} ، σ و Ω به ترتیب میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات کمیت غیرقطعی (تصادفی) است. مقدار Ω_y و Ω_z ، به روش نقشه‌برداری و دقت تجهیزات و نقشه بردار بستگی دارد. عدم قطعیت شیب اصطکاکی S_f را می‌توان بر حسب عدم قطعیت اندازه‌ها در امتدادهای طولی و عمقی (x,y) چنین بیان کرد:

$$S_f = f(x, y) \quad (6)$$

$$(7) \Omega_{S_f} = \sqrt{(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)}$$

3-1- تحلیل عدم قطعیت رابطه مانینگ به

روش گشتاور دوم مرتبه اول حول

میانگین (MFOSM)

این روش به تابع چگالی احتمال پارامترهای غیرقطعی مدل نیاز ندارد و همین ویژگی موجب سادگی روش شده است. در این روش، عدم قطعیت نتایج مدل برحسب خصوصیات آماری پارامترهای غیر قطعی مدل برآورد می‌شود و ایده اصلی، تقریب زدن یک مدل - شامل پارامترهای تصادفی و غیر قطعی - به کمک بسط تیلور است. فرض کنید W، متغیر هیدرولیکی یا هیدرولوژیکی طراحی است که به N پارامتر تصادفی x_1, x_2, \dots, x_N وابسته است به طوری که:

$$W = g(X) = g(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (8)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^t$$

X بردار ستونی N بعدی از پارامترهای غیرقطعی مدل یعنی x_1, x_2, \dots, x_N و شاخص t ترانهاده ماتریس ستونی است. بسط تیلور مرتبه اول تابع $g(X)$ حول نقطه $X = x_0$ چنین است:

$$W \cong g(x_0) + s_0(X - x_0) \quad (9)$$

که در آن S_0 بردار ستونی ضرایب حساسیت است و هریک از آرایه‌های آن از رابطه $\frac{\partial W}{\partial x_i}$ با قرار دادن

هیدرولیکی مقطع) را مشخص می‌کند [9].

4- محاسبه قابلیت اعتماد از طریق تحلیل

بار - مقاومت

قابلیت اعتماد¹ سیستم عبارت است از احتمال آنکه مقاومت² بیشتر از بار³ باشد و ریسک⁴ عبارت است از احتمال آنکه بار از مقاومت بیشتر شود. از آنجا که بار و مقاومت، متغیرهای تصادفی محسوب می‌شوند، تعیین توزیع احتمال آنها برای تحلیل قابلیت اعتماد لازم است. در سیستم‌های کنترل سیل، منظور از بارگذاری، دبی سیل با دوره بازگشت طراحی و منظور از مقاومت، ظرفیت هیدرولیکی سیستم رودخانه برای عبور جریان است.

قابلیت اعتماد، α ، احتمال ایمن بودن یا عدم شکست است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = P(L \leq R) \quad (15)$$

که در آن L و R به ترتیب بار و مقاومت است. روشهای مختلفی برای محاسبه قابلیت اعتماد سیستم به روش تحلیل بار - مقاومت وجود دارد که از آن میان به روشهای انتگرالگیری مستقیم، استفاده از حاشیه ایمنی و ضریب ایمنی، و گشتاور دوم مرتبه اول می‌توان اشاره کرد [16]. از آنجا که روش مورد استفاده در این مقاله، روش انتگرالگیری مستقیم است، در اینجا به اختصار به شرح آن پرداخته می‌شود.

5- روش انتگرالگیری مستقیم⁵

با توجه به رابطه (15)، قابلیت اعتماد را می‌توان بر حسب

تابع چگالی احتمال توأم⁶ بار و مقاومت حساب کرد

$$\alpha = \int_{r_1}^{r_2} \int_{l_1}^{l_2} f_{L,R}(l,r) dl dr \quad (16)$$

$X = x_0$ در آن به دست می‌آید. میانگین و واریانس متغیر W با تقریب مرتبه اول حول میانگین و با فرض مستقل بودن کمیتها از یکدیگر از روابط (10) به دست می‌آیند [1]:

$$\bar{W} \cong g(x_0) \quad (10)$$

$$Var(W) \cong \sum_{i=1}^N s_i^2 \sigma_i^2 = s^t D$$

که در آن σ^2 و D به ترتیب واریانس و ماتریس قطری واریانس متغیرهای تصادفی است.

مقطع عرضی رودخانه معمولاً به صورت مقطع مرکب است و با توجه به متفاوت بودن مقدار ضریب مانینگ در کانال اصلی و سیلابدشت، رابطه مانینگ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q = \left[\sum_{i=1}^3 k_i \right] S_f^{1/2} \quad (11)$$

k_i ثابت انتقال زیر مقطع i است و چنین تعریف می‌شود:

$$k_i = \frac{A_i^{5/3}}{n_i p_i^{2/3}} \quad (12)$$

که در آن A_i ، p_i و n_i به ترتیب سطح جریان، محیط خیس شده و ضریب مانینگ زیر مقطع i است. بدین ترتیب رابطه ظرفیت هیدرولیکی مقطع رودخانه تابعی از پارامترهای زیر است:

$$Q = f(S_f, A_i, n_i, p_i) \quad (13)$$

براساس رابطه (10) و پس از ساده سازی مورد نیاز، ضریب تغییرات ظرفیت هیدرولیکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(14)$$

$$\Omega_Q^2 = \frac{1}{4} \Omega_{S_f}^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{k_i}{k_t} \right)^2 \left[\frac{25}{9} \Omega_{A_i}^2 + \Omega_{n_i}^2 + \frac{4}{9} \Omega_{p_i}^2 \right]$$

k_t ، ضریب انتقال کل است.

از رابطه (14) با معلوم بودن کلیه اجزاء، ضریب تغییرات ظرفیت هیدرولیکی و در واقع عدم قطعیت آن قابل محاسبه است. این رابطه، ارتباط بین عدم قطعیت پارامترهای ورودی و عدم قطعیت خروجی مدل (ظرفیت

1. Reliability
2. Resistance
3. Load
4. Risk
5. Direct Integration Method
6. Joint Probability Density Function

$$1 - \frac{\alpha}{2} = \int_0^{Q_u} f_L(l) dl \quad (22)$$

اکنون مسأله برای حالتی که عدم قطعیت‌های مقاومت نیز منظور شوند، تعمیم داده می‌شود. در این حالت داریم:

$$\frac{\alpha}{2} = \int_0^{\infty} \int_{Q_l}^{\infty} f_{R,L}(r,l) dr dl \quad (23)$$

و

$$1 - \frac{\alpha}{2} = \int_0^{\infty} \int_{Q_u}^{\infty} f_{R,L}(r,l) dr dl \quad (24)$$

از آنجا که بار و مقاومت مستقل از یکدیگرند، می‌توان نوشت:

$$f_{R,L}(r,l) = f_R(r) \cdot f_L(l) \quad (25)$$

بدین ترتیب روابط (23) و (24) به صورت زیر ساده می‌شوند [9]:

$$\frac{\alpha}{2} = \int_0^{\infty} f_L(l) \int_l^{\infty} f_R(r) dr dl \quad (l = Q_l) \quad (26)$$

$$1 - \frac{\alpha}{2} = \int_0^{\infty} f_L(l) \int_l^{\infty} f_R(r) dr dl \quad (l = Q_u) \quad (27)$$

هدف از تحلیل قابلیت اعتماد دبی سیل T ساله، تعیین مقادیر Q_u و Q_l با در نظر گرفتن توم عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است. با استفاده از مقادیر محاسبه شده Q_u و Q_l ، تراز سطح آب متناظر با این دبی‌ها را از مدل هیدرولیکی HEC-RAS می‌توان محاسبه کرد. بدین ترتیب، بازه اطمینان برای تراز سطح آب به دست می‌آید. با توجه به قابلیت اعتماد مورد نظر، پارامترهای Q_u و تراز سطح آب متناظر آن، مبنای طراحی و تعیین ارتفاع سیل‌بندها قرار می‌گیرند.

6- مطالعه موردی

رودخانه هیرمند که از ارتفاعات افغانستان سرچشمه می‌گیرد، پس از طی مسیری در حدود هزار کیلومتر در افغانستان در نقطه مرزی موسوم به دوشاخه هیرمند واقع در 36 کیلومتری جنوب شرقی زابل، به دو شاخه سیستان و پریان مشترک تقسیم می‌شود (شکل 2). بعد از نقطه

که در آن $f_{L,R}(l,r)$ ، (r_1, r_2) و (l_1, l_2) به ترتیب تابع چگالی احتمال توأم بار و مقاومت، حد بالا و پایین مقاومت و حد بالا و پایین بار است. در صورت مستقل بودن بار و مقاومت، روابط بالا به صورت زیر ساده می‌شوند [16]

$$\alpha = \int_{r_1}^{r_2} F_L(r) f_R(r) dr = E_R[F_L(R)] \quad (17)$$

یا

$$\alpha = \int_{l_1}^{l_2} [1 - F_R(l)] f_L(l) dl = 1 - E_L[F_R(l)] \quad (18)$$

در روابط بالا، F_R و F_L به ترتیب تابع توزیع تجمعی¹ بار و مقاومت و E امید ریاضی است.

در این مقاله برای رسیدن به روشی مناسب برای در نظر گرفتن توأم عدم قطعیت‌های بار و مقاومت و تداخل آنها، ابتدا فرض می‌شود که عدم قطعیت‌های مقاومت (یعنی عدم قطعیت هیدرولیکی) صفر باشند. در این صورت، دبی‌های حد بالا و پایین بازه اطمینان، فقط تابعی از مقدار دبی طراحی و عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی بوده و از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$Q_u = Q_T + k \cdot SD_T \quad (19)$$

$$Q_l = Q_T - k \cdot SD_T \quad (20)$$

در روابط بالا، Q_u و Q_l به ترتیب حد بالا و پایین بازه اطمینان دبی سیل T ساله Q_T و ضریب فراوانی² است که مقدار آن به قابلیت اعتماد مورد نظر بستگی دارد. در استفاده از روابط (17) و (18)، توزیع نمونه‌گیری³ آماره سیل T ساله نرمال در نظر گرفته شده است. روابط (19) و (20) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\frac{\alpha}{2} = \int_0^{Q_l} f_L(l) dl \quad (21)$$

و

1. Cumulative Distribution Function
2. Frequency Factor
3. Sampling Distribution

در طول مسیر رودخانه سیستان، سازه‌های مهمی مانند سیل‌بند، فیدر کانال و آبگیر آن، سد کهک، سیل بر زهک-نیاتک، سد کهک، کانال هدریس، سد سیستان، پل جاده زابل - زاهدان و کانالهای متعدد آبیاری وجود دارد.

یکی از اجزای مهم سیستم کنترل سیل دشت سیستان، سیل‌بندهای اطراف رودخانه است. مبنای طراحی سیل‌بندها، حفاظت دشت سیستان در مقابل سیل 100 ساله بوده است. نتایج تحلیلهای جریان دائمی و غیردائمی رودخانه سیستان نشان داده که در وضعیت موجود، این سیستم فقط ظرفیت عبور جریان 600 مترمکعب بر ثانیه را دارد و این بدان معنا است که رودخانه ظرفیت عبور دبی طراحی سیستم هیدرولیکی را ندارد و نیاز به طراحی سیستمی با ظرفیت بیشتر وجود دارد [18].

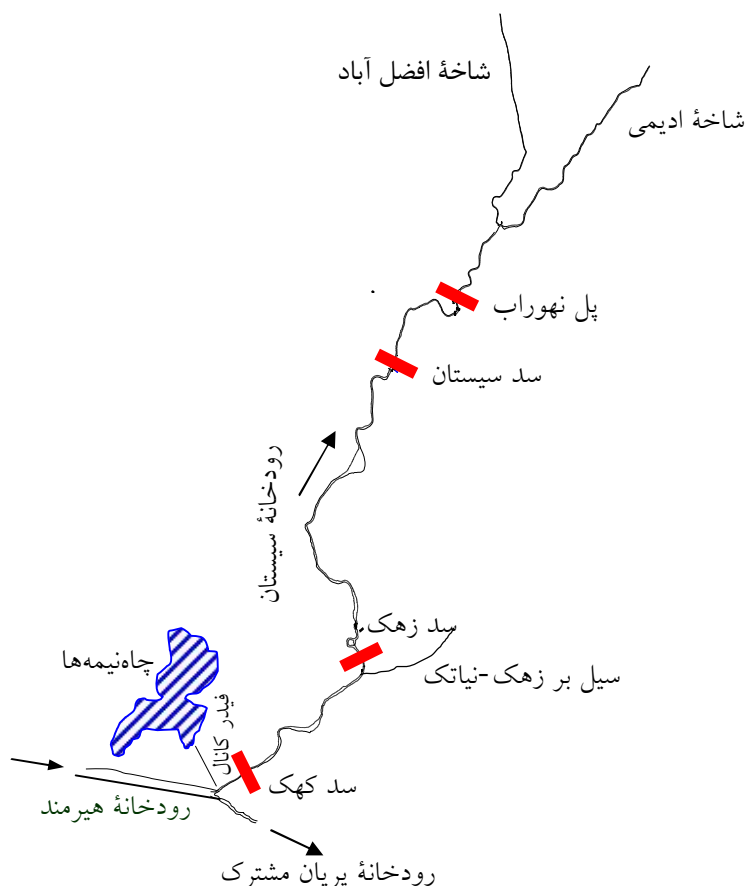
در این مقاله، افزایش ارتفاع سیل‌بندها به عنوان روش اصلاح سیستم و افزایش ظرفیت هیدرولیکی رودخانه در نظر گرفته شده و تراز سطح آب مانند دبی سیل 100 ساله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای قابلیت اعتمادهای مختلف برآورد شده است. مفهوم قابلیت اعتماد سیستم، احتمال بیشتر بودن ظرفیت هیدرولیکی سیستم نسبت به دبی طراحی سیل است. با اضافه کردن آثار امواج ناشی از باد و نیز ارتفاع آزاد، به ترازهای به دست آمده با قابلیت اعتماد مطلوب، ارتفاع مورد نیاز برای سیل‌بندها برآورد می‌شود.

بازه مورد مطالعه، حد فاصل سدهای کهک و زهک بر روی رودخانه های سیستان است، به طول 13/8 کیلومتر، از کیلومتر 2+100 تا کیلومتر 15+900 (شکل 2). با توجه به هدف پروژه کنترل سیل رودخانه سیستان، مقطع انتخاب شده در این بازه مقطعی است که حداقل ظرفیت هیدرولیکی را داشته و اولین مقطعی است که روگذری در آن اتفاق می‌افتد و در واقع تعیین کننده ظرفیت هیدرولیکی سیستم است (مقطع بحرانی).

تقسیم، رودخانه سیستان به خاک ایران وارد شده و پس از طی مسافتی در حدود 60 کیلومتر در جهت غرب و آبیاری کردن زمینهای دشت زابل، به هامون هیرمند می‌ریزد [17، 18].

رودخانه سیستان به عنوان شاخه‌ای از رودخانه هیرمند، داری ویژگیهای مشابهی با رودخانه هیرمند از نظر خشکسالی‌ها و سیلابهاست. در طول تاریخ، دشت سیستان علاوه بر کم آبی‌ها و خشکسالی‌ها، سیل‌های بزرگی را نیز تجربه کرده و از آنها بشدت آسیب دیده است. از این رو، مقابله با سیل همواره یکی از دغدغه های مردم این منطقه بوده است. احداث سیل‌بندهای خاکی در سیستان که قدمتی در حد خود سیستان دارند، یکی از اقدامات ساکنان منطقه در مقابله با سیل است سیل‌بندها که در اصطلاح محلی به آنها " گوره " گفته می‌شود، به منظور محدود کردن رودخانه سیستان در مسیر اصلی آن و جلوگیری از هجوم سیل به زمینهای اطراف رودخانه و حفاظت از دشت سیستان در برابر سیل‌های مخرب احداث شده است [17، 18]. سیلاب، زمینهای دشت سیستان را به دو صورت به زیر آب می‌برد: 1) با غرقاب کردن زمینهای حاشیه مسیر رودخانه، موجب فروریختن سیل‌بندهای اطراف رودخانه و سرازیر شدن سیل به دشت می‌شود و 2) با بالا آمدن سطح آب در هامونها و بویژه همراه شدن این وضعیت با امواج پدانه ناشی از بادهای شدید منطقه و در نتیجه فروریختن سیل بندهای حاشیه هامونها، سیل به دشت سیستان سرازیر می‌شود.

در طول 50 سال گذشته، تعدادی واقعه سیل در دشت سیستان روی داده که مهمترین آنها در سالهای 1336، 1361 و 1370 بوده است. این سیلها به ترتیب در حدود 23000، 7500 و 8000 هکتار از زمینهای دشت سیستان را به زیر آب برده است.



شکل 2 پلان رودخانه سیستان

نقشه‌بردار، عدم قطعیت پارامترهای هندسی مقطع یعنی S_f ، A و P از روابط (4) و (7) محاسبه شده و در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 ضریب تغییرات پارامترها ظرفیت هیدرولیکی

ضریب تغییرات	پارامتر
0/0121	شیب اصطکاکی، S_f
0/0083	سطح جریان، A ، مقطع سیلگیر چپ رودخانه
0/0121	سطح جریان، A ، کانال اصلی رودخانه
0/0049	سطح جریان، A ، مقطع سیلگیر راست رودخانه
0/0007	محیط خیس شده، P
0/2910	ضریب مانینگ، n ، سطح سیلگیر چپ رودخانه
0/2255	ضریب مانینگ، n ، کانال اصلی رودخانه
0/2910	ضریب مانینگ، n ، سطح سیلگیر راست رودخانه

این مقطع در کیلومتر 10+400 رودخانه قرار دارد و مشخصات آن در شکل 2 نشان داده شده است.

ضریب زبری مانینگ بازه مطالعاتی برای کانال اصلی رودخانه و سطوح سیل گیر به ترتیب برابر 0/035 و 0/040 برآورد شده است. برای محاسبه انحراف معیار پارامتر n ، از رابطه (2) استفاده شده است.

برای محاسبه عدم قطعیت‌های هندسی، مقدار خطای اندازه‌گیری از شرکت نقشه‌بردار استعمال شد. باتوجه به تجهیزات استفاده شده و دقت اعمال شده در برداشتها، خطا بسیار کم است. به طوری که در مقایسه با خطای روشهای دیگر تعیین هندسه رودخانه مانند استفاده از عکسهای هوایی و نقشه‌های توپوگرافی، قابل صرفنظر کردن است. با وجود این، با استفاده از مقدار عدم قطعیت اندازه‌ها در سه جهت x ، y و z اعلام شده توسط شرکت

7- الگوریتم حل مسأله

حل مسأله شامل سه بخش است.

7-1- توزیع احتمال بارگذاری (سیل)

توزیع احتمال بارگذاری (توزیع نمونه گیری آماره سیل 100 ساله)، برطبق توصیه بیشتر مراجع، توزیع نرمال در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن پارامترهای این توزیع، یعنی دبی سیل 100 ساله و خطای استاندارد (انحراف معیار) آن از سه توزیع آماری متفاوت یعنی توزیع گامبل، لوگ نرمال و لوگ پیرسون نوع سه که بر سری 47 ساله ماکزیمم دبی سالانه رودخانه سیستان برآزش داده شده، استفاده شده است. نتایج این تحلیل آماری - احتمالی در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 پارامترهای توزیع نمونه گیری بارگذاری

(سیل 100 ساله)

سیل طرح (100 ساله)	توزیع گامبل	توزیع لوگ نرمال	توزیع لوگ پیرسون
میانگین، مترمکعب Q_T بر ثانیه	1542	1792	1498
انحراف معیار، مترمکعب SD_T بر ثانیه	192	450	500

دبی سیل رودخانه سیستان در بازه مطالعاتی تحت تأثیر سدهای کهک و زهک قرار دارد. اثر سد زهک در مدل منظور شده است. تأثیر سد کهک به این ترتیب است که در جریانهای سیلابی، پس زدگی آب پشت این سد ممکن است به محل دو شاخه (محل تقسیم آب هیرمند به رودخانه های پریان مشترک و سیستان) برسد و بر میزان آب ورودی به رودخانه سیستان تأثیر بگذارد. فرض شده که این کنترل نسبت به دبی سیل 100 ساله تغییر نمی کند.

7-2- توزیع مقاومت (ظرفیت هیدرولیکی

سیستم)

برای مقاومت، دو توزیع نرمال و لوگ نرمال در نظر گرفته شده است. نحوه تعیین پارامترهای این توزیع چنین است که با داشتن مقدار میانگین، انحراف معیار با استفاده از روش تحلیل عدم قطعیت (MFOSM) محاسبه می شود. در واقع انحراف معیار مقاومت، تابعی از میانگین آن و نیز میانگین و انحراف معیار پارامترهای غیرقطعی دخیل در آن - هندسه رودخانه و ضریب زبری مانینگ - (رابطه 14). در باره نحوه تعیین مقدار میانگین ظرفیت (مقاومت) در بخش بعد توضیح داده می شود.

7-3- حل کردن رابطه قابلیت اعتماد

در روابط 26 و 27، f_L تابع چگالی احتمال پدیده هیدرولوژیکی (سیل T ساله) و f_R تابع چگالی احتمال ظرفیت هیدرولیکی رودخانه است. عبارت سمت راست هر یک از روابط مزبور، احتمال وقوع توأم یک پدیده هیدرولوژیکی مشخص (مثلاً سیل T ساله) و ظرفیت هیدرولیکی رودخانه قادر به عبور آن است. حل کردن رابطه قابلیت اعتماد، در حقیقت عبارت است از به دست آوردن Q_U و Q_L به طوری که در روابط (26) و (27) صدق کنند. Q_L ، دبی جریان رودخانه است که تراز سیل T ساله در رودخانه با احتمال $1-\alpha/2$ درصد از تراز سطح آب نظیر آن تجاوز می کند. Q_U ، دبی جریان رودخانه است که $\alpha/2$ درصد احتمال دارد تراز سیل T ساله از تراز نظیر Q_U تجاوز کند. برای تعیین Q_L یا Q_U ، چهار پارامتر Q_T ، SD_T ، α و عدم قطعیت هیدرولیکی (واریانس ظرفیت هیدرولیکی رودخانه) در دبی Q_L یا Q_U باید معلوم باشند.

(27) را باید به روشی تکراری حل کرد. از این رو، حل روابط مزبور، با در دست داشتن مقدار Q_T و SD_T ، اختیار کردن مقدار مشخصی (مقدار مورد نظر) برای α و ظرفیت هیدرولیکی رودخانه و سپس محاسبه واریانس ظرفیت هیدرولیکی (از رابطه 14) شروع می شود.

از آنجا که عدم قطعیت هیدرولیکی در یک دبی قبل از

تابعی از عدم قطعیت پارامترهای آن است (رابطه 14). نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت‌های هندسی (S_f, P, A) در مجموع 2 درصد و عدم قطعیت ضریب زبری مانینگ، 98 درصد از عدم قطعیت کل ظرفیت هیدرولیکی را تشکیل می‌دهند. در این صورت، عدم قطعیت هندسی قابل صرف‌نظر کردن است؛ در حالی که ضریب مانینگ پارامتر مهم در ایجاد عدم قطعیت ظرفیت هیدرولیکی رودخانه است.

8-2- تأثیر توزیع احتمال بار (دبی سیل) و مقاومت (ظرفیت هیدرولیکی) بر حدود اطمینان تراز سطح آب سیل 100 ساله

حدود 95 درصد مطمئن تراز سطح آب رودخانه نظیر سیل 100 ساله در مقطع بحرانی برای انواع توزیع‌های احتمال بار و مقاومت محاسبه شده و در جدول 3 و شکل‌های 4 و 5 ارائه شده است. تراز سطح آب در حالتی که عدم قطعیت هیدرولوژیکی و هیدرولیکی وجود نداشته باشد و نیز در حالتی که فقط عدم قطعیت هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود، در جدول و شکل‌های مزبور ارائه شده است.

تعیین دبی قابل محاسبه نیست (رابطه 14)، روابط (26) و مقدار Q_U و Q_L با توجه به مقدار α و ظرفیت هیدرولیکی رودخانه و واریانس آن از توزیع احتمال انتخاب شده و ظرفیت هیدرولیکی محاسبه می‌شود. این برآوردهای اولیه Q_U و Q_L در روابط (26) و (27) قرار داده شده و α محاسبه می‌شود. α محاسبه شده با α مورد نظر مقایسه می‌شود. اگر دو مقدار برابر باشند، نتیجه گرفته می‌شود که ظرفیت هیدرولیکی انتخاب شده مقدار صحیحی است؛ در غیر این صورت باید مقدار دیگری برای ظرفیت هیدرولیکی انتخاب شود و مراحل محاسباتی قبل آنقدر تکرار شود تا اختلاف بین α برآورد شده از روابط (26) و (27) با مقدار مورد نظر ناچیز شود. بدین ترتیب، مقدار صحیح Q_U و Q_L به دست می‌آید. شکل 3، روند حل مسأله را نشان می‌دهد. در این مقاله انتگرالگیری عددی روابط (26) و (27) با نرم افزار Mathematica انجام شده است.

8- نتایج و بحث

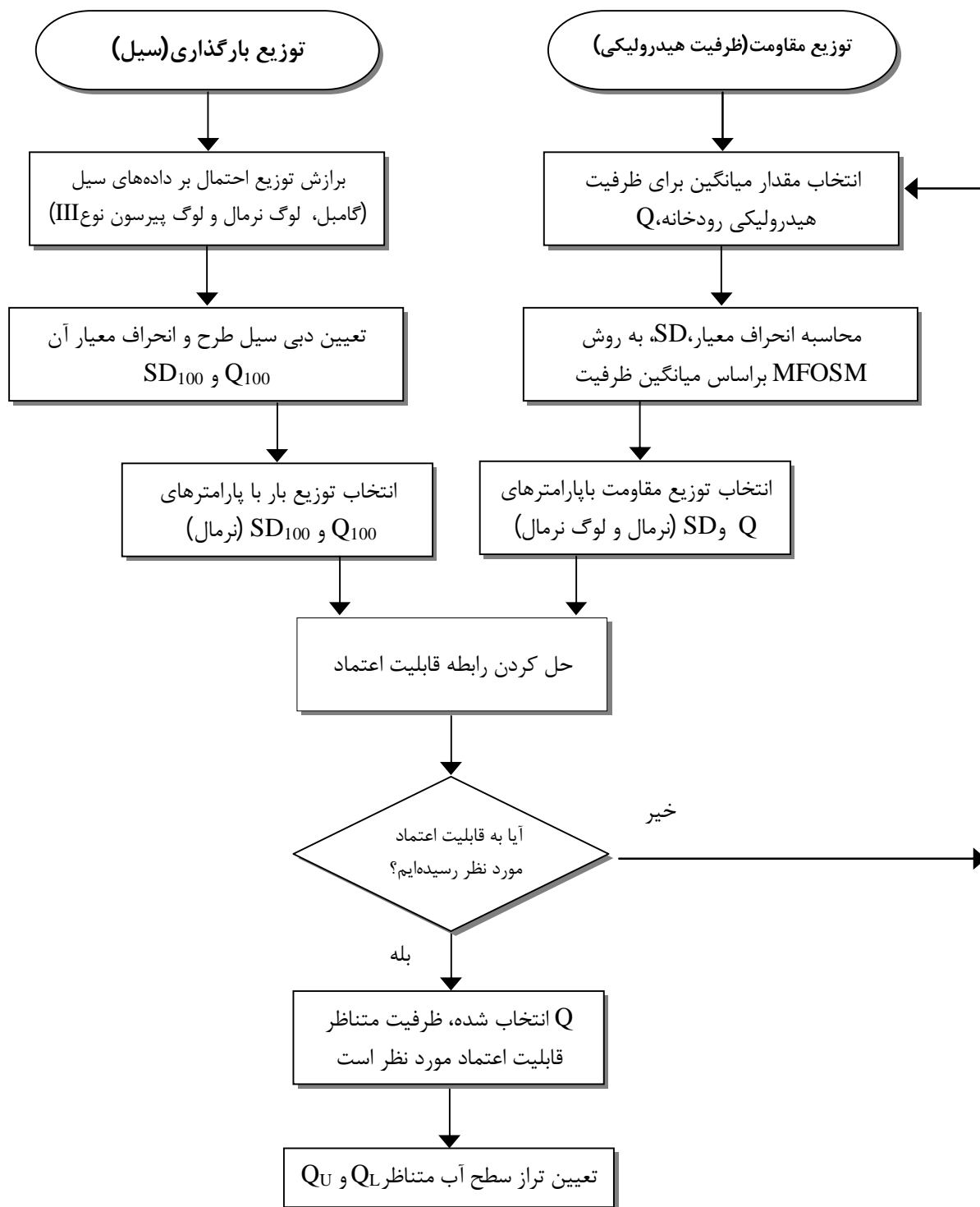
8-1- سهم عدم قطعیت‌های هیدرولیکی در عدم قطعیت ظرفیت هیدرولیکی رودخانه

باتوجه به اینکه عدم قطعیت ظرفیت سیستم رودخانه

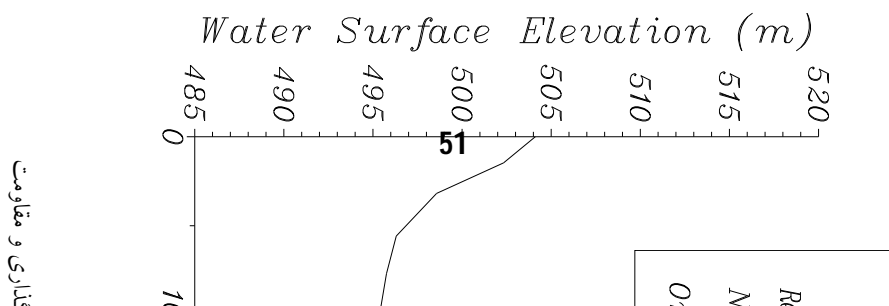
جدول 3 بازه 95 درصد مطمئن تراز سطح آب در مقطع بحرانی در حالات مختلف توزیع احتمال بارگذاری و مقاومت

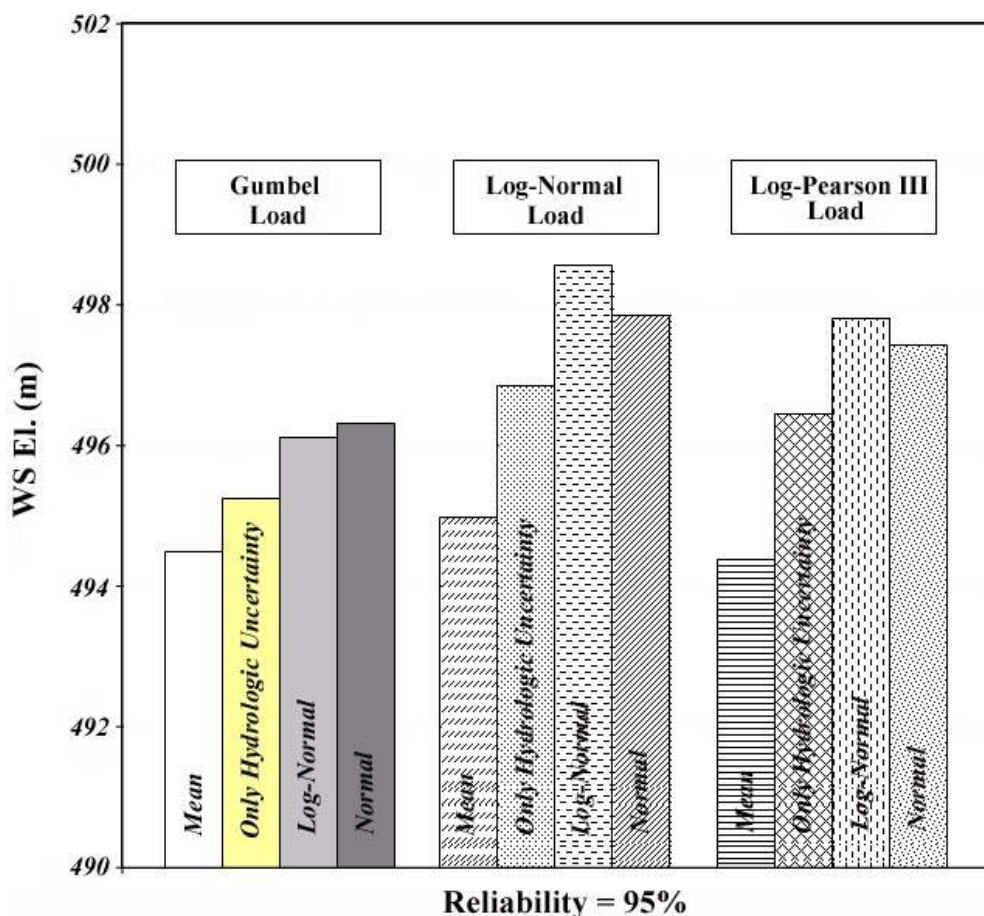
توزیع احتمال بار	عدم قطعیت هیدرولوژیکی و هیدرولیکی	فقط عدم قطعیت هیدرولوژیکی	توزیع احتمال مقاومت	
			لوگ نرمال	نرمال
	تراز سطح آب، متر	تراز سطح آب، متر	تراز سطح آب، متر	تراز سطح آب، متر
گامبل	حد بالا	495/25	496/1	496/3
		494/48		
	حد پایین	493/68	493/36	493/42
لوگ نرمال	حد بالا	496/84	498/55	497/84
		494/98		
	حد پایین	493/13	492/98	492/99
لوگ	حد بالا	496/43	497/8	497/41

پرسون 3		494/39			
	حد پایین		492/21	492/16	492/16



شکل 3 روند نمای حل مسأله



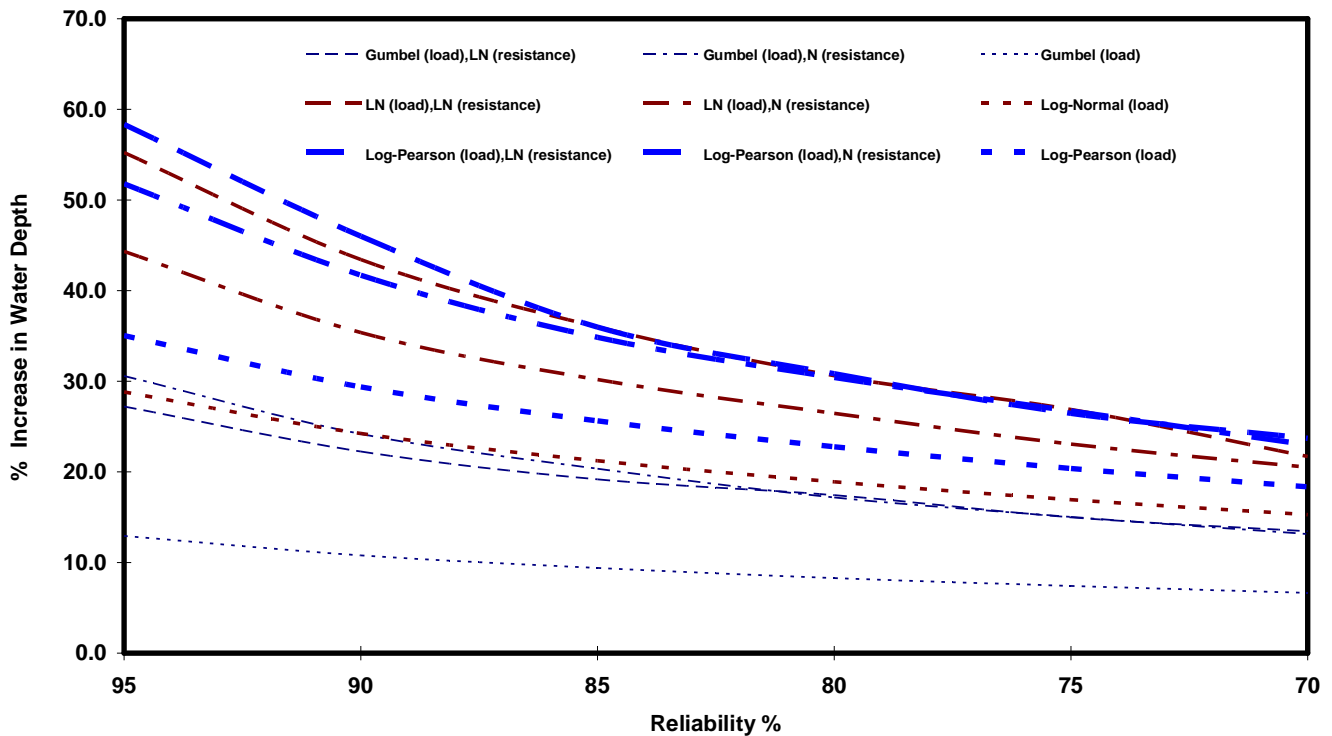


شکل 5 حد بالای تراز سطح آب سیل 100 ساله در مقطع بحرانی با قابلیت اعتماد 95 درصد با توزیعهای مختلف بارگذاری و مقاومت

به منظور استفاده راحت تر از نتایج در طراحی سیل بند، پارامتری به نام درصد افزایش عمق آب تعریف شده است. در واقع پس از تعیین عمق آب براساس روشهای طراحی قطعی - که فقط با استفاده از مقادیر میانگین دبی طرح (Q_{100}) انجام می شود - برای قابلیت اعتماد مورد نظر می توان با اعمال درصدی افزایش، عمق آب را به دست آورد که در این عمق، عدم قطعیت ها نیز ملحوظ شده باشند. این مقادیر افزایش برای عدم قطعیت های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی به صورت توأم و نیز عدم قطعیت های هیدرولوژیکی به تنهایی محاسبه شده و نتایج در شکل 6 ارائه شده است که میزان درصد افزایش عمق آب نسبت به میانگین را برای هر یک از حالات مختلف نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد که بیشترین تراز سطح آب با قابلیت اعتماد 95 درصد در بین کلیه حالت های توزیع بارگذاری و مقاومت، مربوط به بارگذاری لوگ نرمال و توزیع مقاومت لوگ نرمال است. در صورتی که بارگذاری، توزیع گامبل داشته باشد، توزیع نرمال مقاومت، بیشترین تراز را به وجود می آورد. برای دو توزیع دیگر بارگذاری، توزیع لوگ نرمال مقاومت بیشترین تراز را ایجاد می کند. باتوجه به عدم قطعیت نوع توزیع بارگذاری و مقاومت، انتخاب بیشترین تراز سطح آب با قابلیت اعتماد 95 درصد در بین کلیه حالت های توزیع بارگذاری و مقاومت برای طرح افزایش ارتفاع سیل بند، طراحی محافظه کارانه خواهد بود.

3- تعیین ضریب افزایش عمق آب به منظور ملحوظ کردن عدم قطعیت ها



شکل 6 ضریب افزایش عمق جریان در مقطع بحرانی به ازای مقادیر مختلف قابلیت اعتماد

از عدم قطعیت‌های هیدرولیکی و فقط در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی موجب ایجاد برآورد دست پایین تری برای طرح و افزایش ریسک سیستم کنترل سیل (سیل بند) می‌شود. در قابلیت اعتمادهای بالا، تأثیر عدم قطعیت‌های مدل قابل توجه است. نتایج مطالعات در مقطع بحرانی رودخانه سیستان نشان می‌دهد که در صورت وقوع سیل 100 ساله، ریسک روگذری سیل بند بیش از 50 درصد است. برای کاهش ریسک، افزایش ارتفاع سیل بند بر اساس نتایج این مقاله، مناسب خواهد بود.

10- قدردانی

از همکاران مرکز تحقیقات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف بویژه سرکار خانم مهندس خاکباز، آقای مهندس ترابی، آقای امیرحسین تجریشی و سرکار خانم خیرآبادی که در تمامی مراحل این مطالعه ما را یاری دادند تشکر می‌شود.

ملاحظه می‌شود که برای هر یک از توزیعهای بارگذاری (سیل) مقدار افزایش عمق - وقتی عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود - نسبت به وقتی که هر دو نوع عدم قطعیت در نظر گرفته شود، کمتر است.

9- نتیجه گیری

تراز سطح آب و پروفیل سطح آب رودخانه، مقداری قطعی نیست و در واقع متغیری تصادفی است. در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در قالب پارامترها و مدلها، این متغیر تصادفی به صورت احتمالی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، تراز سطح آب و پروفیل سطح آب رودخانه محاسبه شده توسط نرم افزارهای هیدرولیکی نمی‌تواند مبنای طراحی سیستم کنترل سیل (سیل بند) قرار گیرد زیرا ریسک آن زیاد است. نتایج بررسیها همچنین نشان می‌دهد که صرف نظر کردن

11- منابع

- [10] Cesare, M.A., "First-Order Analysis of Open-Channel Flow", J. of Hydr. Eng., ASCE, 117(2), pp 242-247, 1991.
- [11] Singh, S., and C. S. Melching, "Importance of Hydraulic Model Uncertainty in Flood Stage Estimation", Hydraulic Engineering'93, Edited by Shen, Su and Wen, 1993
- [12] Mays, L.W., and Y.K. Tung, "Hydrosystems Engineering and Management", McGraw-Hill, New York, N.Y., 1992.
- [13] Johnson, P.A., Uncertainty of Hydraulic "Parameters, J. of Hydr. Eng., ASCE, 122(2), pp 112-114, 1996.
- [14] Abrishamchi, A., A. Afshar, and R. Kerachian, "Spillway Capacity Optimization Under Hydrologic Uncertainties and Flood Routing" , Iranian Journal of Science and Technology, 272(A1), pp 111-121, 2003.
- [15] Barkhordari, J., A. Afshar, and M.A. Marino, "River Diversion Optimization under Hydraulic and Hydrologic Uncertainties", J. of Water Resources Planning and Management, ASCE, 120(1), pp 36-47, 1994.
- [16] Mays, L.W., and Yeou-Koung Tung "Hydrosystems Engineering and Management", McGraw-Hill, 1992.
- [17] صالحی، افشین، "تعیین ارتفاع سیل بند با در نظر گرفتن تغییرات کف بستر رودخانه"، دانشگاه صنعتی شریف، آبان 1378.
- [18] "طرح هیدرودینامیک رودخانه سیستان"، گزارش فنی (ج): مدل هیدرودینامیک رودخانه سیستان، دفتر مطالعات آب و محیط زیست شریف EWRC، مرداد 1380.
- [1] Tung, Y.K., "Uncertainty Analysis in Water Resources Engineering", Proceeding of the 7th IAHR International Symposium, Stochastic Hydraulics'96 [13] Johnson, P.A., Uncertainty of Hydraulic "Parameters, J. of Hydr. Eng., ASCE, 122(2), pp 112-114, 1996.
- [2] Burges, S. J., "Analysis of Uncertainty in Flood Plain Mapping", Water Resour. Bull., 15(1), pp 227-243, 1979.
- [3] Analysis for Hydraulic Design", J. of Hydr. Eng., ASCE, 106(5), pp 893-913, 1980.
- [4] Tung, Y. K., and L. W. Mays, "Risk Models for Flood Levee Design", Water Resour. Res., 17(4), pp 833-841, 1981.
- [5] McBean, E., J. Penel, and K. L. Sin, "Uncertainty Analysis of a Delineated Flood Plain", Can. J. Eng., 11, pp 387-395, 1984.
- [6] Hydrologic Engineering Center (HEC), "Accuracy of Computed Water Surface Profiles". Research Document 26, U.S. Army Corps of Engineering, Davis, CA., 1986.
- [7] Burnham, M.W. and D.W. Davis, "Effects of Data Errors on Computed Steady-Flow Profiles", J. of Hydr. Eng., ASCE, 116(7), pp 914-929, 1990.
- [8] Lee, H.L., and L.W. Mays, "Hydraulic Uncertainty in Flood Levee Capacity", J. of Hydr. Eng., ASCE, 112(10), pp 928-934, 1986.
- [9] Oegema, B.W., and E.A. McBean, "Uncertainty in Flood Plain Mapping". Application of Frequency and Risk in Water Resources, V.P. Singh, ed., D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, The Netherlands, pp 293-303, 1987.