

ارزیابی عدم قطعیت و ریسک حادثه سیل در سایت هسته‌ای دارخوین

هاجر ملکوتی^۱، علیرضا شکوهی^{۲*} و حسن ذوالفقارزاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، ^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران و ^۳ دانشیار گروه مهندسی معماری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵

چکیده

این پژوهش با هدف تعیین استراتژی طراحی نیروگاه هسته‌ای در مجاورت رودخانه با ارزیابی ریسک سیل به‌عنوان پیش‌شرط طراحی و برای سایت اتمی دارخوین در مجاورت رودخانه کارون در استان خوزستان به‌عنوان مطالعه موردی انجام شده است. در این پژوهش، پس از نمونه‌گیری از فضای برازش یافته بر دبی جریان و با فیلتر کردن و حذف دبی‌های سیلابی که از رودخانه به دشت سیلابی سرریز نمی‌شوند، از مدل هیدرولیکی دو بعدی HECRAS برای تعیین عمق و سرعت جریان در محدوده سایت نیروگاه استفاده به‌عمل آمد. تحلیل فراوانی عمق سیل شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل هیدرولیکی نشان داد که توزیع فراوانی عمق جریان و سیلاب مولد آن با یکدیگر متفاوت هستند. طراحی ایمن سایت نیروگاه نیازمند در نظر گرفتن عدم قطعیت عوامل بسیاری است که استفاده از روش‌های مرسوم را با مشکل مواجه می‌سازد. در این تحقیق و برای اولین بار از تکنیک روزنبلات برای ارزیابی عدم قطعیت و در نهایت، تعیین بیشینه سطح آب محتمل برای جانمایی هسته راکتور استفاده به‌عمل آمد. نتایج نشان می‌دهد که برای ایجاد عمق بیشینه محتمل با دوره بازگشت ۱۰۰ سال باید سیل با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ سال در کارون در پایین‌دست اهواز به وقوع بپیوندد. روش ارائه شده در این پژوهش، می‌تواند مبنای تولید استاندارد برای طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای در مجاورت رودخانه‌ها و حفاظت در مقابل سیل قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: دبی سیلابی، رودخانه، ریسک سیل مبنای طراحی، نیروگاه هسته‌ای، RPEM

مقدمه

در حادثه سیل به عقیده جامعه معماران بریتانیا (Climate Change toolkit, ۲۰۰۹) به پنج دسته کلی تقسیم می‌شود که نیروگاه‌های تولید نیرو در بالاترین درجه اهمیت از نظر تأمین امنیت قرار می‌گیرند، زیرا در صورت آسیب شدید بخش زیادی از محیط اطراف خود را تحت تأثیر قرار می‌دهند (RIBA, ۲۰۰۹). این مساله در مورد نیروگاه‌های هسته‌ای اهمیتی دو چندان دارد. در طراحی

سیل فراگیرترین و تکرارپذیرترین حادثه طبیعی است که تقریباً در سرتاسر جهان رخ می‌دهد و تقریباً هر ساله خساراتی را به بار می‌آورد (The international disaster database, ۲۰۱۶). روش‌های بسیاری برای مدیریت سیل وجود دارند که ریسک آن را کاهش داده و اثرات مخرب آن را به کمینه می‌رسانند (World bank, ۲۰۱۶). میزان اهمیت بناها

برای محاسبه سیل، استفاده از روش‌های برآورد احتمالی ریسک در طراحی سامانه‌های ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای، برای دستیابی به حد بالای اطمینان از عملکرد نیروگاه در زمان حادثه، توصیه می‌شود (Bensi و همکاران، ۲۰۱۵). پس از حادثه هسته‌ای فوکوشیما در سال ۲۰۱۱ که ترکیبی از زلزله، سونامی و سیل بود، نیاز به بازنگری در طراحی مقاوم در برابر سیل در نیروگاه‌های هسته‌ای الزامی شد (IAEA، ۲۰۱۲). این بازنگری باید در طراحی، ارزیابی حوادث مبنای طراحی، ارزیابی ریسک و عواقب حوادث فراتر از حادثه مبنای طراحی صورت گیرد (Golder associate، ۲۰۱۵).

در ابتدای برنامه‌ریزی و طراحی یک مجموعه هسته‌ای، می‌بایست به بررسی ریسک وقوع سیل پرداخت تا بتوان با بیشترین حد از اطمینان، از جامعه در زمان حادثه محافظت کرد (IAEA، ۲۰۱۲). در ارزیابی ریسک وقوع سیل از آنجایی که سیل به صورت ذاتی یک پدیده احتمالی است و منابع عدم قطعیت متعددی در رابطه با پیش‌بینی و برآورد سیل، نظیر اثر تغییرات آب و هوا، داده‌های ورودی و نحوه مدل‌سازی وجود دارد (Kundzewicz و همکاران، ۲۰۱۸). تعیین میزان احتمال این رخداد بدون بررسی عدم قطعیت امکان‌پذیر نیست (Alkamaar، ۲۰۱۲). معمولاً زمانی که تجهیزات یا تاسیساتی در برابر سیل طراحی می‌شود، هدف این است که از سازه در مقابل دبی بیشینه سیلاب محافظت به عمل آید و در همین ارتباط، لازم است که پس از تعیین توزیع احتمالاتی داده‌های آماری مانند دبی یا عمق آب در محدوده طرح و تعیین میزان اعتمادپذیری، مساله عدم قطعیت در طراحی نهایی سازه در نظر گرفته شود (Flavelle و Lin، ۲۰۱۹). با توجه به مطالعات صورت گرفته، به دلیل پیچیدگی مسائل هیدرولوژیکی و ماهیت مساله مورد پژوهش، انتخاب مدل ریاضی برای تحلیل سیلاب و شیوه محاسبه عدم قطعیت از داده‌های غیرقطعی ورودی از اهمیت برخوردار می‌باشد (Shrestha و همکاران، ۲۰۰۶). تجزیه و تحلیل عدم قطعیت موجب می‌شود تا با تحلیل حساسیت بتوان پارامترهایی را که بیشترین تاثیر را در نتایج خروجی دارند، تشخیص داد و دقت بیشتری در برآورد آن‌ها به

نیروگاه‌های هسته‌ای، سیل در دسته حوادث خارجی طبیعی تقسیم‌بندی می‌شود. ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای مجاور منابع آب، می‌تواند تحت تاثیر انواع سیل‌ها به چالش کشیده شود. در تبیین سطوح ایمنی هسته‌ای، مفهوم سیل مبنای طراحی به این معناست که تمام سناریوهای ممکن از حادثه در سایت نیروگاه باید به روش‌های قطعی یا احتمالاتی لحاظ شده، در طراحی مد نظر باشند. به همین دلیل، برای گرفتن مجوز طراحی در یک سایت هسته‌ای، ارزیابی خطر سیل الزامی است (IAEA، ۲۰۰۳). با بررسی اسناد و ضوابط IAEA (آژانس بین‌المللی انرژی اتمی) می‌توان گفت آژانس، نحوه محاسبات ریاضی و تحلیل داده‌های مربوط به سیل را به صورت کلی بیان کرده است، ولی در عین حال، برای هر منطقه تبیین روش‌های مشخصی برای ارزیابی خطر و سطح ریسک سیل را لازم می‌داند (IAEA، ۲۰۱۱a؛ IAEA، ۲۰۱۸). در گذشته، ارزیابی ریسک سیل نیروگاه‌های هسته‌ای بر اساس حوادثی که ثبت شده، در پنج سطح مختلف دسته‌بندی شده‌اند، بررسی می‌شد و حوادث خارج از این موارد عموماً لحاظ نمی‌شدند (Wagner و همکاران، ۱۹۸۴). در عمل از مفهوم "بیشینه حادثه ممکن" برای محاسبه رخداد مبنای طراحی که به معنای محاسبه حدود فیزیکی شدیدترین حادثه‌ای که در منطقه مورد مطالعه رخ داده بود، استفاده می‌شد (IAEA، ۲۰۱۱b). امروزه برای مثال در ایالات متحده مطابق با سند "ارزیابی سیل مبنای طراحی ویژگی‌های سایت در نیروگاه‌های هسته‌ای ایالات متحده آمریکا (۲۰۱۱)" از دو روش علمی استاندارد برای تخمین سیل‌های مبنای طراحی در طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده می‌شود: تحلیل قطعی و تحلیل احتمالاتی (USNRC، ۲۰۱۱). روش قطعی بر اساس رابطه بین داده‌های تجربی و فیزیکی تعریف می‌شود. در این روش، بدترین حالت حادثه به عنوان فرضیه برای پیش‌بینی سیل در نظر گرفته می‌شود و برای این‌که بتوان از نتیجه تحلیل اطمینان داشت، باید از سطح وسیعی از داده‌ها در دوره‌های طولانی (تا ۱۰۰۰ سال) استفاده کرد و در نهایت، در قیاس با بزرگ‌ترین سیل‌های حادث شده اعتبار آن را سنجید (IAEA، ۲۰۱۸؛ Bowels، ۲۰۱۴). در کنار روش‌های قطعی

محتمل سالانه عدم قطعیت خسارت را محاسبه کنند. Amirmoradi و همکاران (۲۰۱۹) برای ارزیابی خسارت ناشی از سیلاب‌های شهری توانستند رابطه‌ای میان عمق و خسارت تعریف کنند و به‌علت داشتن همین رابطه صریح به کمک روش $FOVE^1$ که مبتنی بر استفاده از سری تیلور در تعیین واریانس تابع مورد نظر بر اساس واریانس متغیرهای مستقل در مدل و در واقع در تابع توسعه یافته می‌باشد، عدم قطعیت مقدار خسارت بر اثر عمق را محاسبه کنند. Roudaki و Azizian (۲۰۲۰) برای ارزیابی اثر روش محاسبه نفوذ بر عملکرد مدل بارش-رواناب HEC-HMS از نرم‌افزار GLUE استفاده کردند که اساس کار آن استفاده از روش مونت‌کارلو در تلفیق با تئوری بیز می‌باشد. جستجو در ادبیات موضوع نشان می‌دهد که عدم قطعیت اهمیت خود را به مرور زمان در مطالعات مربوط به طراحی سازه‌های در معرض خطر سیل‌گرفتگی بیش از پیش نشان آشکار ساخته، در عین حال، روشن می‌سازد که عموم تکنیک‌های مورد استفاده محدود به روش‌های تقریبی بسط واریانس تابع نظیر FOVE و مونت‌کارلو است که هر کدام مزایا و معایب خود را دارا هستند. اگر یافتن رابطه‌ای صریح میان تابع و متغیر، مشکل اصلی روش‌های بسط واریانس محسوب می‌شود، تعریف تابع چگالی احتمال برای کلیه متغیرهای درگیر در پدیده و سپس، تعریف تابع چگالی احتمال برای تابع حاصل از اندرکنش متغیرها، مشکل اصلی روش‌های محاسبه عدم قطعیت مبتنی بر مونت‌کارلو می‌باشد.

هدف از این پژوهش آن است که مانند سایر کشورهای دارای صنعت هسته‌ای، روشی محاسباتی برای ارزیابی میزان خطر سیل در یک سایت هسته‌ای تعریف شود. در این راستا، دبی رودخانه کارون در مجاورت سایت هسته‌ای دارخوین با دوره بازگشت مختلف تا ۱۰۰۰۰ سال و با توجه به تابع چگالی احتمال برازش داده شده محاسبه می‌شود. با توجه به آن‌که ورود سیل به محل سایت نیازمند عبور از سیلاب‌دشت می‌باشد و لذا، از داده‌های فیلتر شده استفاده به عمل خواهد آمد، فرض بر آن است که تابع چگالی احتمال دیگری بر عمق سیل طراحی برازش

عمل آورد و از این طریق از خطای حاصل از مقادیر خروجی کاست. مطالعات زیادی برای ارزیابی عدم قطعیت انجام شده است (Blazkova و همکاران، ۲۰۰۹؛ Montanari و همکاران، ۲۰۰۹). Yen و Seits (۱۹۸۷) به مقایسه تکنیک‌های مختلف عدم قطعیت و خصوصاً دو شیوه مونت‌کارلو و روزنبلات پرداخته، به این نتیجه رسیدند که زمانی که رابطه بین خروجی-های مدل خطی است و یا اگر غیرخطی است، از واریانس کوچکی برخوردار است، روش‌های تخمین نقطه‌ای مانند روزنبلات مناسب‌تر هستند، اما برای پارامترهای غیرخطی با واریانس بزرگ روش‌هایی مانند مونت‌کارلو کارآمدترند. Sheresta و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی سه روش Markov chain Monte Carlo (MCMC)، Monte Carlo Simulation (MCS) و Latin Hypercube Simulation (LHS) پرداخته، نتایج مشاهده شده از هر سه روش را با هم مقایسه کرده‌اند. Gracia و همکاران (۲۰۱۲) نیز به بررسی اعتمادپذیری به شیوه روزنبلات و مونت‌کارلو پرداختند تا نحوه محاسبه میانگین و واریانس پارامترهای مهم و غیرقطعی سیل یعنی عمق و سرعت که نشان‌دهنده شدت سیل و مبنای ارزیابی ریسک سیل و تصمیم‌گیری هستند را با یکدیگر مقایسه کنند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، اگر توزیع داده‌ها با میزان میانگین و واریانس به‌خوبی مشخص باشند، روش‌های تخمین نقطه‌ای مانند روزنبلات می‌توانند به خوبی با تعریف تابع توزیع احتمالی میزان شدت سیل را برآورد کنند. این شیوه خصوصاً زمانی که درجه پیچیدگی مدل هیدرولیکی زیاد باشد، اما محاسبه متغیرهای پارامترهای سیل مورد نیاز است، مفید واقع می‌شود. Shokoohi و همکاران (۲۰۱۸) برای ارزیابی خسارت ناشی از سیل بر مزارع برنج به توسعه مدل خسارت وابسته به دوره رشد اقدام کردند. مدل خسارت مزبور به‌علت وابستگی به زمان وقوع سیل و نحوه گسترش سیل در سیلاب‌دشت با عدم قطعیت زیادی مواجه بود. محققین مزبور توانستند با استفاده از روش مونت‌کارلو عدم قطعیت خسارت وارده به مزارع برنج در زمان‌های مختلف را محاسبه و در نهایت، خسارت‌های محتمل سالانه را برآورد کرده، سپس، با تعیین حدود اعتماد برای میزان خسارت

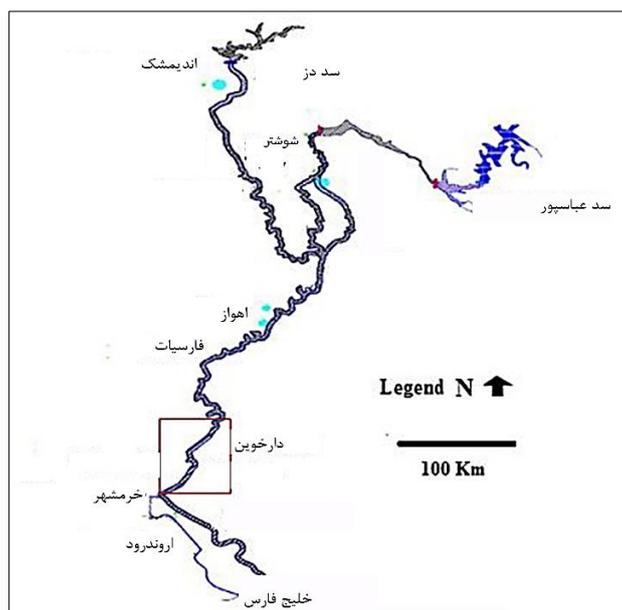
¹ First Order Variance Estimation

درجه اعتمادپذیری قابل قبول، اساس طراحی و چیدمان بناهای نیروگاه خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: رودخانه کارون بزرگ‌ترین رودخانه ایران به طول ۸۹۰ کیلومتر و با عرض متغیر ۲۵۰ تا ۹۰۰ متر از کوه زردکوه در استان چهارمحال و بختیاری سرچشمه می‌گیرد و از چهار شاخه اصلی به نام‌های خرسان، آب ونک، آب کیار و بازفت تشکیل شده است. پس از اتصال چهار شاخه اصلی، این رودخانه در جهت عمومی جنوب شرقی-شمال غربی جریان می‌یابد. رودخانه کارون پس از ورود به دشت خوزستان در شمال گتوند، به سمت جنوب جریان می‌یابد. محدوده حوزه آبخیز مورد نظر در این پژوهش، ۶۷ کیلومتر مربع است و بین اهواز و خرمشهر قرار دارد. طول رودخانه در این محدوده ۱۸۹ کیلومتر است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود (Adib و Javan, ۲۰۱۵).

خواهد یافت. این فرض، یعنی تغییر تابع چگالی احتمال متغیر وابسته به علت اولاً استفاده از داده‌های سانسور شده، ثانیاً تغییر محیط شبیه‌سازی برای اولین بار است که در مباحث مربوط به رودخانه به معرض آزمایش گذاشته می‌شود. در ادامه، برای دوره‌های بازگشت مختلف سیلاب رودخانه کارون، با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی HECRAS، توزیع سیلاب شبیه‌سازی شده، سپس، بر این اساس عمق طراحی محاسبه می‌شود. همان‌گونه که گفته شد، از آن‌جا که سیل یک پدیده ذاتاً احتمالی است، تخمین سیل طراحی بدون بررسی عدم قطعیت آن امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش، بر اساس ماهیت پیچیده مساله و برای اولین بار با استفاده از تکنیک روزنبلات، میزان عدم قطعیت عمق جریان که بناهای اصلی نیروگاه در صورت رخ دادن سیل با آن مواجه می‌شوند، مشخص می‌شود. بیشینه عمق آب محتمل در سایت نیروگاه با در نظر گرفتن عدم قطعیت و



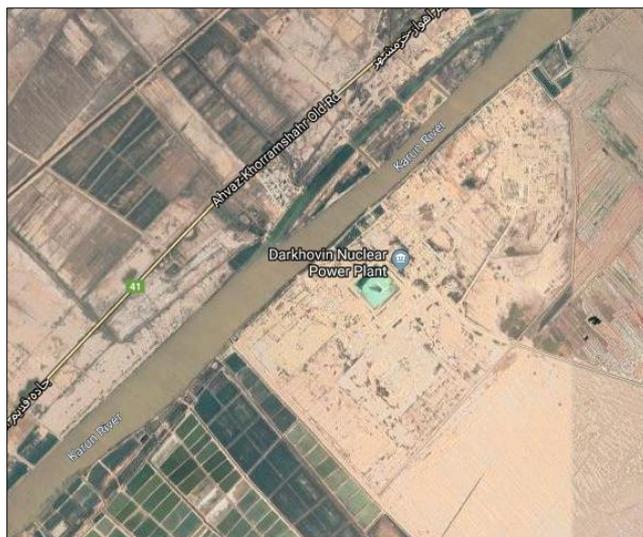
شکل ۱- رودخانه کارون و محدوده مورد مطالعه

میلادی) ملغی شد. پس از آن، در سال ۱۳۷۲ (۱۹۹۳ میلادی) ایران و چین برای طراحی و ساخت دو رآکتور کین‌شان با توان ۳۰۰ مگاوات وارد مذاکره شدند، اما این قرارداد نیز در پی فشار دولت ایالات متحده آمریکا لغو شد (IAEA, ۲۰۲۰). ایران در سال

محدوده دارخوین در سال ۱۳۵۲ (۱۹۷۳ میلادی) با هدف تاسیس چند رآکتور هسته‌ای معرفی شد و دولت وقت ایران با چند شرکت فرانسوی قراردادی برای طراحی و ساخت دو رآکتور PWR با توان ۹۵۰ مگاوات تنظیم کرد که در پی انقلاب ۱۳۵۷ (۱۹۷۹)

برای ساخت این نیروگاه صورت نگرفته است. در شکل ۲، عکس هوایی محدوده نیروگاه قابل مشاهده است (IAEA, ۲۰۰۹).

۱۳۸۷ (۲۰۰۸ میلادی) اعلام کرد که برنامه ساخت رآکتور آب سبک ۳۶۰ مگاواتی را در دارخوین آغاز کرده است و در این برنامه از تجربیات ساخت رآکتور IR40 اراک بهره برده است؛ هر چند تا کنون اقدامی



شکل ۲- موقعیت سایت هسته‌ای دارخوین

بالاترین سطوح ایمنی در برابر حوادث است (Schulenberg و Leung, ۲۰۱۶) و تعیین حدود سیل طراحی به‌عنوان یک حادثه خارجی نیز در راستای تامین این هدف قرار دارد.

موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری: اولین ایستگاه هیدرومتری واقع در بالادست سایت نیروگاه، ایستگاه هیدرومتری فارسیات است که سابقه تأسیس و آماربرداری از آن به سال آبی ۱۳۶۷-۱۳۶۶ برمی‌گردد. برای کنترل وضعیت آماری این ایستگاه از ایستگاه هیدرومتری اهواز که از سال ۱۳۴۸ دارای آمار سیل ثبت شده می‌باشد، استفاده به عمل آمده است. مشخصات این دو ایستگاه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در مجاورت دارخوین

ایستگاه	سال تأسیس	East	North
اهواز	۱۳۴۸	۲۸۰۷۰۱	۳۴۶۹۳۵۰
فارسیات	۱۳۶۷	۲۶۲۸۹۴	۳۴۵۱۵۵۲

با توجه به اهتمام ایران در پیش‌برد برنامه هسته‌ای و احداث نیروگاه‌های اتمی در آینده، شناسایی و بررسی موقعیت‌های از پیش تعیین شده و یا جدید به این چشم‌انداز کمک شایانی می‌کند. از آنجا که امروزه نسل‌های جدید این نوع نیروگاه‌ها در حال توسعه و یا احداث هستند، در این پژوهش نیز حفاظت از سایت دارخوین برای طراحی نوعی از نیروگاه‌های موسوم به نسل چهارم با عنوان^۱ SCWR مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نوع از نیروگاه‌ها در سرتاسر جهان در دست تحقیق و توسعه هستند (Wealer و همکاران، ۲۰۱۹) و تا کنون نمونه‌ای از آن‌ها ساخته نشده است. در کلیه نیروگاه‌های هسته‌ای ساختمان‌ها، سامانه‌ها و تجهیزاتی قرار دارند که عملکرد مطلوب آن‌ها نیاز به سطح ایمنی بالایی دارد. این موارد بر اساس دیدگاه دفاع عمقی^۲ (شامل پنج سطح از تامین ایمنی نیروگاه در زمان حادثه) باید در برابر نادرترین حوادث نیز حفظ شوند (IAEA, ۲۰۱۱a). یکی از اهداف اصلی طراحی و تأسیس نیروگاه‌های نسل چهارم تامین

^۱ Super-Critical Water-cooled Reactor

^۲ Defense in depth concept

آماره‌های مختلف با یکدیگر مقایسه کند، تا بتوان مناسب‌ترین گزینه را انتخاب کرد (Grari و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس دست‌یافته‌های تحقیق که در بخش‌های بعد ملاحظه می‌شود، توزیع فراوانی سیلاب در کارون و عمق شبیه‌سازی شده در سیلاب‌دشت با هم متفاوت هستند و لذا، به کمک نرم‌افزار یاد شده به‌طور مجزا برای دو متغیر یاد شده برای احتمالات مختلف مقادیر سیلاب و عمق طراحی به‌دست آمد.

مدل هیدرولیکی دو بعدی: در این پژوهش، پس از برآزش تابع چگالی احتمال، میزان دبی بیشینه سیلاب تا دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله تخمین زده شده و بر آن اساس شبیه‌سازی دو بعدی سیلاب در محدوده نیروگاه در محیط HEC-RAS انجام شد. نرم‌افزار مزبور این قابلیت را دارد که روند جریان سیل در یک محدوده، فضاهای آسیب‌پذیر و نحوه گسترش سیلاب در محدوده را نشان دهد و امروزه به‌صورت گسترده‌ای در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ongadas و همکاران، ۲۰۲۰). برای مدل‌سازی دو بعدی در محیط HEC-RAS در دسترس بودن نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه لازم است. بدین منظور، از دو نقشه ارتفاعی رودخانه کارون یکی با دقت ۱۰ متر شامل سواحل و بستر رودخانه (تهیه شده در محیط GIS و با استفاده از مقاطع عرضی و نقاط نقشه‌برداری شده از اطراف رودخانه توسط سازمان آب و برق استان خوزستان) و دیگری با دقت ۳۰ متر و تهیه شده از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت شد. نقشه DEM تولید شده برای استفاده در مدل در شکل ۳ آورده شده است.

برای واسنجی مدل هیدرولیکی HEC-RAS برای ضریب زبری مانینگ در آبراهه اصلی، از هیدروگراف جریان ثبت شده (به‌وسیله اداره آب و برق استان خوزستان) در بالادست منطقه دارخوین در سال‌های ۱۳۶۶ با دبی بیشینه ۴۴۰۴ مترمکعب بر ثانیه و ۱۳۸۵ با دبی بیشینه ۲۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه استفاده شده است. مقدار آماره نش-ساتکلیف برای هیدروگراف سال ۱۳۸۵ (شکل ۴) معادل ۰/۷۸ و برای هیدروگراف سیل ثبت شده در سال ۱۳۶۶ (شکل ۵) معادل ۰/۶۲ به‌دست آمد که قابل قبول است (Shahoei و همکاران، ۲۰۱۸). نکته مهم در

بازسازی و تطویل دوره آماری: با بررسی آمار سیلاب در دو ایستگاه هیدرومتری مشاهده شد که در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۴ در هر دو ایستگاه و در سال ۱۳۸۱ سیلاب در ایستگاه فارسیات ثبت نشده است. با توجه به طول دوره آماری موجود که عملاً ۲۵ سال است، بهتر است که از طریق روش‌های آماری اولاً کمبود داده سال ۱۳۸۱ در ایستگاه فارسیات جبران شود و در عین حال، در حدی که قوت رابطه دو ایستگاه اجازه می‌دهد، نسبت به تطویل آمار سیل ایستگاه فارسیات به کمک آمار ایستگاه اهواز اقدام کرد. به همین دلیل، به‌منظور تکمیل و تطویل داده‌ها با توجه به ضریب همبستگی و تعداد سال‌های آماری در ایستگاه‌ها، با بهره‌گیری از رابطه (۱) تعداد سال‌های آماری مجاز برای تطویل آمار محاسبه می‌شود (Mahdavi، ۲۰۱۳).

$$Ne = \frac{N}{1 + \frac{N-n}{n-2}(1-R^2)} \quad (1)$$

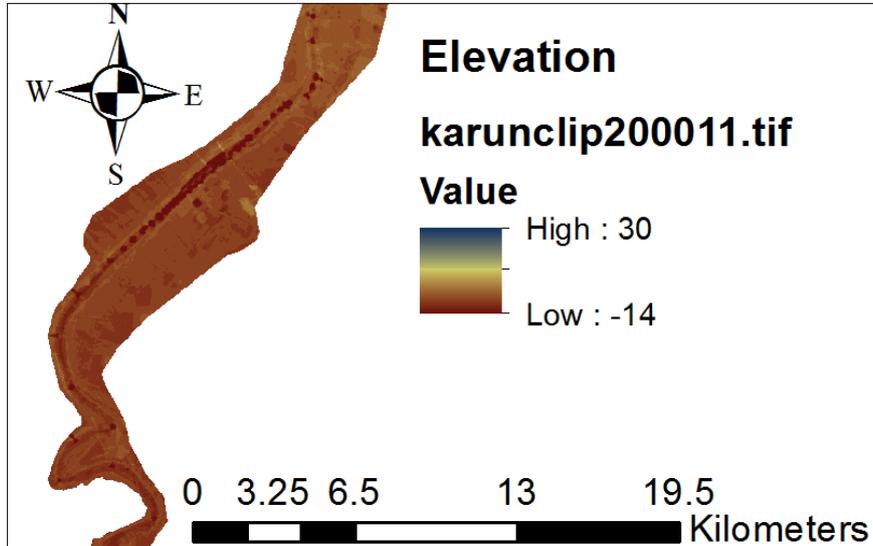
که در آن، Ne مدت مجاز برای تطویل آمار (سال)، n تعداد سال‌های آماری ثبت شده در ایستگاه مقصد (ایستگاه ناقص)، N تعداد سال‌های آماری ثبت شده در ایستگاه مبنا و R ضریب همبستگی بین ایستگاه مبنا و ایستگاه مقصد می‌باشد. برای بازسازی و تطویل دوره آماری لازم است که رابطه رگرسیونی میان سیلاب‌های تاریخی ایستگاه‌های هیدرومتری اهواز و فارسیات برقرار شود. مراحل این‌کار شامل ایجاد رابطه، محاسبه ضریب رگرسیون، تولید جدول ANOVA^۱ برای ارزیابی وضعیت آماری مدل و در نهایت، بررسی باقی‌مانده‌های مدل برای ارزیابی نیکویی برآزش مدل، در محیط Minitab صورت گرفت. برای ارزیابی نیکویی برآزش مدل و امکان تولید و شبیه‌سازی داده‌ها، روی باقی‌مانده‌های مدل آزمون ثبات واریانس، عدم وجود رابطه خود همبستگی و نرمال بودن صورت گرفت.

تعیین تابع چگالی احتمال برای سیلاب و عمق جریان: پس از کسب تعداد قابل قبول سال آماری برای تحلیل فراوانی سیل و شبیه‌سازی سیلاب‌های حدی از Hyfran استفاده شد. این نرم‌افزار برای تحلیل فراوانی طراحی شده و این قابلیت را دارد که انواع تابع چگالی احتمالی را برآزش داده و با استفاده از

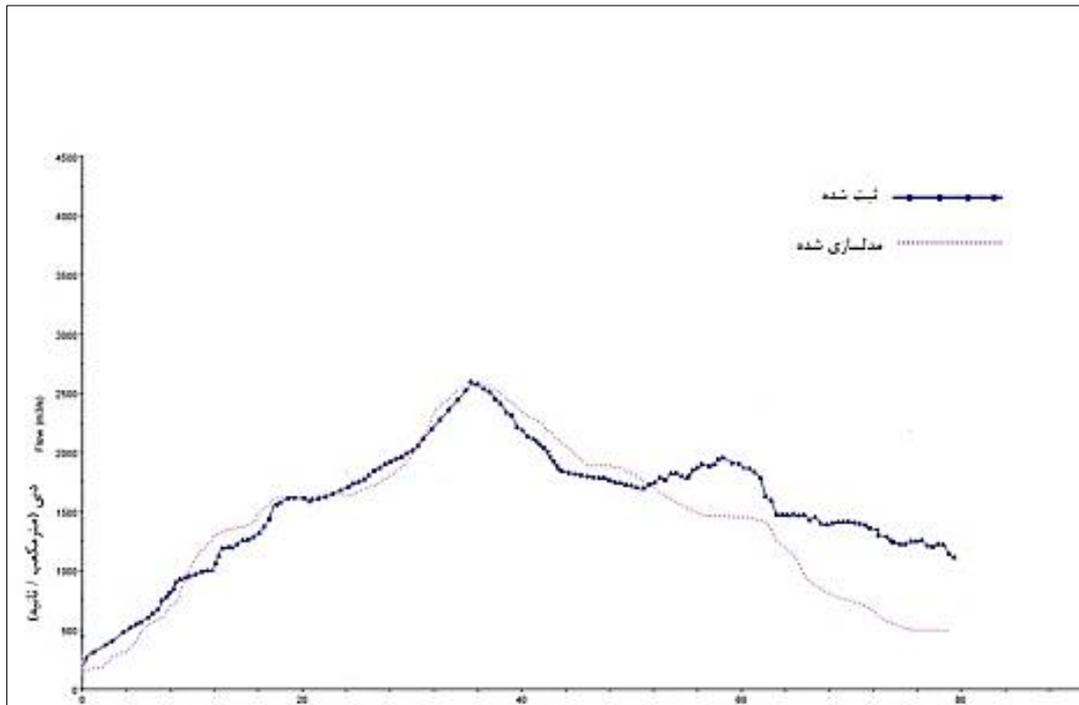
^۱ Analysis of Variance

و برای هیدروگراف سال ۱۳۸۵ برابر با ۰/۰۴۱۷ به‌دست آمد. با توجه به مقادیر مزبور، مقدار ضریب مانینگ برای آبراهه معادل ۰/۰۴۱ در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی این دو هیدروگراف شبیه‌سازی دقیق دبی بیشینه دو هیدروگراف می‌باشد. مقدار ضریب مانینگ برای شبیه‌سازی هیدروگراف سال ۱۳۶۶ برابر با ۰/۰۴



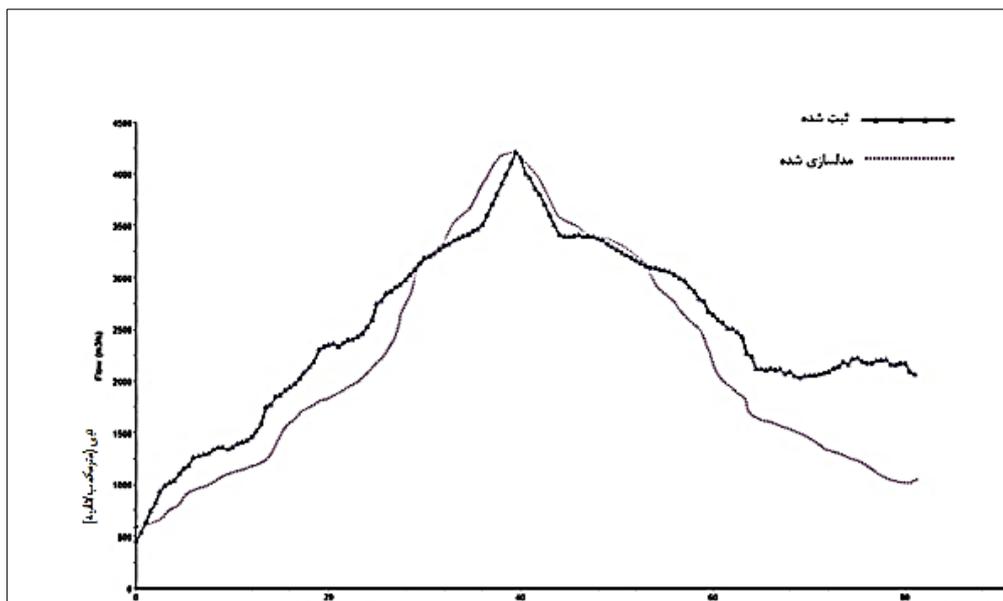
شکل ۳- نقشه ارتفاعی سواحل رودخانه کارون با دقت ۱۰ متر و تهیه شده در محیط GIS در محدوده مورد مطالعه



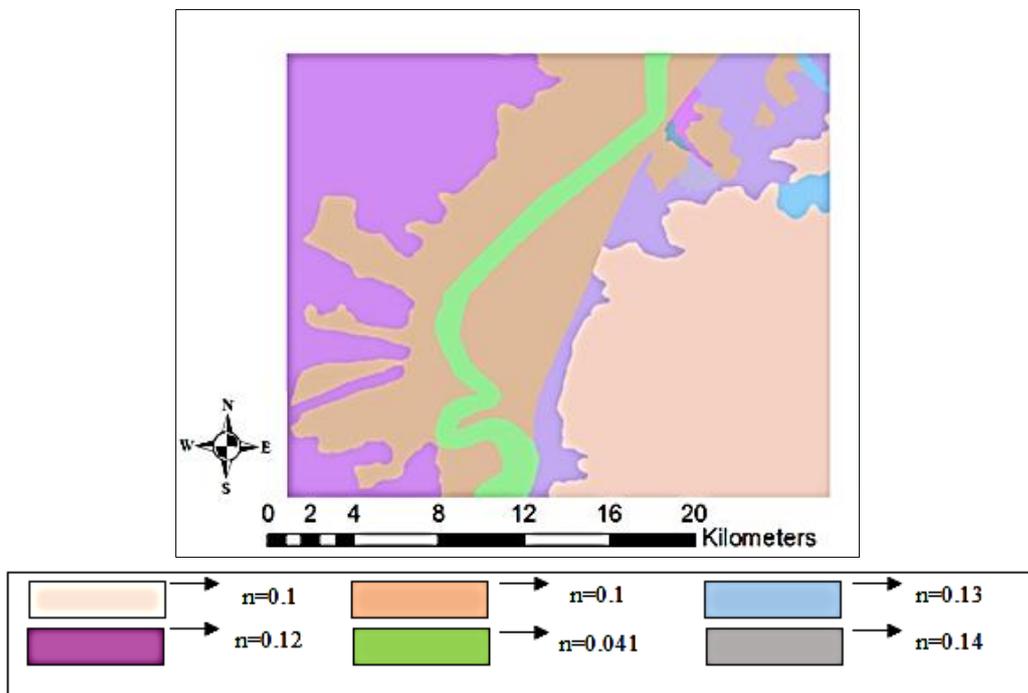
شکل ۴- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی و ثبت شده مربوط به سال ۱۳۸۵

کل راه و شهرسازی استان خوزستان) استفاده شد. نقشه تولید شده برای ضریب مانینگ مورد استفاده در دشت سیلابی در شکل ۶ آورده شده است.

برای تعیین ضریب زبری مانینگ در محدوده مورد مطالعه برای سواحل و اطراف رودخانه از نقشه کاربری اراضی (تهیه شده از معاونت شهرسازی و معماری اداره



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی و ثبت شده مربوط به سال ۱۳۶۶



شکل ۶- نقشه توزیع مکانی ضریب مانینگ در محدوده مطالعاتی

برقراری رابطه میان مقادیر واقعی و مقادیر پارامترهای توزیع در اثر تغییر متغیر استفاده شد.

$$\sigma^2_{\ln x} = \ln(1 + CV^2_x) \quad (2)$$

$$\mu_{\ln x} = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2}\sigma^2_{\ln x} \quad (3)$$

عدم قطعیت: مدل‌های ریاضی هیدرولیکی هیدرولوژیکی بر اساس تخمین مقادیر مختلف پارامترهای مدل به کمک داده‌هایی که مشاهده و گزارش شده‌اند، عمل می‌کنند. نکته حائز اهمیت در

تحلیل مخاطرات سیلاب در اطراف نیروگاه زمانی مطرح خواهد بود که جریان سیلابی از رودخانه کارون سرریز کرده و به سمت نیروگاه حرکت کند. با توجه به آن که سطح آب به دست آمده در هر سلول خود یک متغیر تصادفی می‌باشد، مجدداً با تحلیل فراوانی، سیل طراحی به سطح آب طراحی تبدیل می‌شود. با توجه به این که توزیع احتمالاتی عمق جریان در منطقه مورد مطالعه لوگ نرمال به دست آمد، از روابط زیر برای

برای محاسبه عدم قطعیت پارامتر اصلی مورد استفاده در چیدمان تاسیسات نیروگاه یعنی عمق جریان استفاده به عمل آمده است.

محاسبه عدم قطعیت به شیوه روزنبلات: شیوه روزنبلات برای نخستین بار در سال ۱۹۷۵ به عنوان تکنیکی تقریبی برای داده‌های تصادفی متقارن مطرح شد و در ۱۹۸۱ برای کاربرد در داده‌های غیرمتقارن اصلاح شد (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۳). در این شیوه، فرض بر این است که کل تابع توزیع احتمالی داده‌های تصادفی در دو نقطه x^+ و x^- با وزن (یعنی با احتمال) p^+ و p^- متمرکز شده است (شکل ۷). با مشخص بودن میانگین، انحراف استاندارد و چولگی یک مجموعه داده تصادفی، چهار مجهول x^+ و x^- و بالطبع p^+ و p^- با شرط معادله (۴) محاسبه می‌شود (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۳؛ Yu و همکاران، ۲۰۰۱).

$$p_- + p_+ = 1 \quad (4)$$

در این روش، از معادله‌های (۵) تا (۷) برای محاسبه گشتاورهای توزیع و همچنین، یافتن مجهولات یاد شده استفاده می‌شود.

$$p_+x^+ - p_-x^- = \mu_x = 0 \quad (5)$$

$$p_+x^{+2} + p_-x^{-2} = \sigma_x^2 = 1 \quad (6)$$

$$p_+x^{+3} - p_-x^{-3} = \gamma_x \quad (7)$$

که در آن‌ها، x^+ مقادیر استاندارد شده x ، μ میانگین، σ انحراف استاندارد و γ ضریب چولگی است. مقادیر x^+ در حالتی که تابع دارای چولگی باشد از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$x_+^+ = \frac{\gamma_x}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma_x}{2}\right)^2} \quad (8)$$

$$x_-^- = x_+^+ - \gamma_x \quad (9)$$

نتایج و بحث

مدل رگرسیونی اهواز-فارسیات: داده‌های مورد استفاده برای مدل رگرسیونی، مقادیر ثبت شده دو ایستگاه اهواز و فارسیات هستند. بر این اساس، معادله مورد نیاز برای بازسازی و تولید داده برای فارسیات بر مبنای ایستگاه اهواز به دست آمد.

$$Farsiat = 230.9 + 0.7574Ahwaz \quad (10)$$

این میان آن است که با توجه به محدودیت نمونه‌های ثبت شده، وجود احتمال تجاوز از مقادیر داده‌های مشاهداتی، پارامترهای مدل که مهمترین آن‌ها بر اساس داده‌های مشاهداتی واسنجی و ارزیابی شده‌اند می‌توانند بر حسب شرایط دچار تغییراتی کاملاً غیرخطی شوند. این امر سبب می‌شود که سیاست نهایی تصمیم‌گیری برای مقاوم‌سازی سازه در برابر سیل نیازمند یک روش مناسب برای محاسبه عدم قطعیت باشد (Herrero و Garrote، ۲۰۲۰؛ Favelle و Lin، ۲۰۱۹). عدم قطعیت در هر پدیده به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: عدم قطعیت مربوط به کمبود دانش^۱ و عدم قطعیت ناشی از عوامل طبیعی^۲. عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش شامل عدم قطعیت‌هایی است که به علت عدم شناخت روابط حاکم بر سامانه در مدل‌سازی رخداد مورد نظر وجود دارند و عدم قطعیت طبیعی به دلیل ذات تصادفی پارامترهای دخیل در آن پدیده است (Komatina و Branisavljevic، ۲۰۰۵).

برای محاسبه عدم قطعیت موجود در هر پدیده روش‌های متفاوتی وجود دارد که عبارتند از: روش‌های تحلیلی مانند استخراج توابع توزیعی و تکنیک‌های تبدیل انتگرالی، روش‌های تقریبی مانند روش تخمین مرتبه اول تغییرات FOVE یا FOSM^۳ و روش‌های شبیه‌سازی مانند روش مونت‌کارلو (Tung و Yen، ۲۰۰۵). یکی از روش‌هایی که شاید بتوان آن را در زمره روش‌های احتمالاتی و در عین حال تقریبی به شمار آورد، موسوم به روش‌های تخمین نقطه‌ای احتمالی هستند که در آن‌ها مساله عدم قطعیت اولاً بدون در نظر گرفتن حساسیت پارامترها محاسبه می‌شوند و ثانیاً در مقام مقایسه با روش‌های FOVE یا FOSM نیاز به تابع عملکرد سامانه وجود ندارد و از طرف دیگر، مانند روش مونت‌کارلو نیاز به تعریف چگالی همه پارامترهای دخیل در مدل ریاضی مورد استفاده ندارند. این روش‌ها به سه دسته کلی، روش تخمین نقطه‌ای روزنبلات (RPEM)^۴ روش تخمین نقطه‌ای هار و روش لی تقسیم می‌شوند (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه، از روش روزنبلات

¹ Knowledge deficiency

² Natural variability

³ First-Order Second Moment

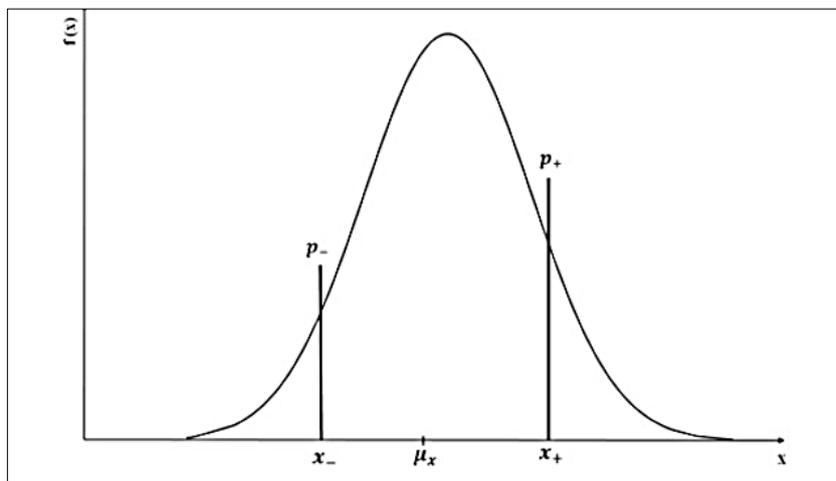
⁴ Rosenblueth's Point Estimation Method

نیست، با استخراج باقی‌مانده‌های مدل آزمون، نرمال بودن آن‌ها جداگانه آزمون شد که نتیجه کار در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار Pvalue برای باقی‌مانده‌ها بسیار بزرگ‌تر از پنج درصد بوده، لذا، فرض نرمال بودن باقی‌مانده‌ها که برای تولید داده به کمک خط رگرسیونی بسیار حائز اهمیت است، در سطح پنج درصد قابل قبول می‌باشد. شکل ۹ نیز حدود اعتماد و پیش‌بینی مدل رگرسیونی اهواز-فارسیات را نشان می‌دهد.

سیلاب‌های طراحی سایت نیروگاه اتمی دارخوین: برای تحلیل فراوانی سیل و شبیه‌سازی سیلاب‌های حدی سایت دارخوین از نرم‌افزار Hyfran استفاده به‌عمل آمد. مشخصات آماری مهم داده‌های ایستگاه فارسیات که برای این منظور استفاده شد، به قرار جدول ۳ است.

ضریب R^2 برای این مدل ۹۱/۱ درصد و ضریب همبستگی پیرسون ۰/۹۵۴ محاسبه شد. میزان ضریب همبستگی با استفاده از روش ناپارامتری اسپیرمن معادل ۰/۹۶۱ با حدود اعتماد ۰/۹۸۶ تا ۰/۸۹۳ به‌دست آمد که نشان‌دهنده وجود طبیعت غیرخطی میان دو ایستگاه ولی قابل اغماض می‌باشد. جدول ۲، جدول ANOVA مدل رگرسیونی است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار Pvalue برای مدل برازش شده صفر می‌باشد که مبین مردود بودن فرض صفر مبنی بر عدم وجود رابطه معنی‌دار میان دو ایستگاه می‌باشد. برای ارزیابی نیکویی برازش مدل و امکان تولید و شبیه‌سازی داده‌ها روی باقی‌مانده‌های مدل آزمون ثبات واریانس، عدم وجود رابطه خود همبستگی و نرمال بودن صورت گرفت. با توجه به این‌که وضعیت نرمال بودن داده‌ها چندان مشخص



شکل ۷- موقعیت x_- و x_+ و احتمال آن‌ها در شیوه روزنیلات

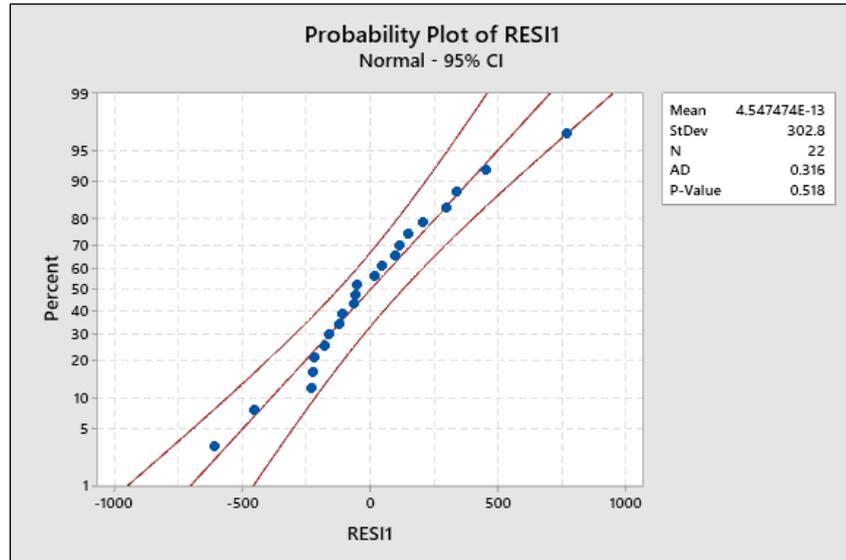
جدول ۲- تحلیل واریانس مدل رگرسیونی اهواز-فارسیات

P	F	MS ³	SS ²	DF ¹	Source
۰/۰۰	۲۰۴/۷۵	۱۹۷۱۲۷۲۶	۱۹۷۱۲۷۲۶	۱	رگرسیون
		۹۶۲۷۸	۱۹۲۵۵۵۴	۲۰	باقی‌مانده
			۲۱۶۳۸۲۸۰	۲۱	کل

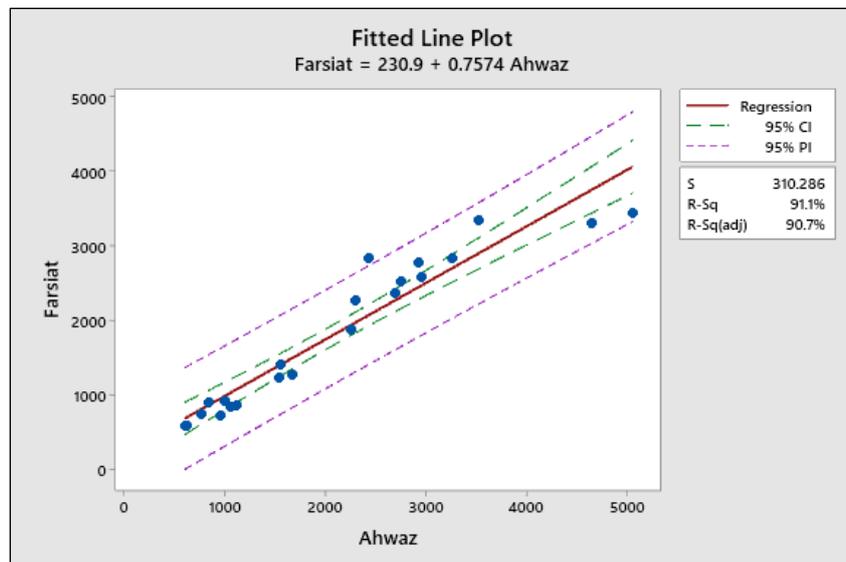
¹ Degree of Freedom

² Sum of Squares

³ Mean Sum of Squares



شکل ۸- آزمون نرمال بودن باقی‌مانده‌های مدل رگرسیونی



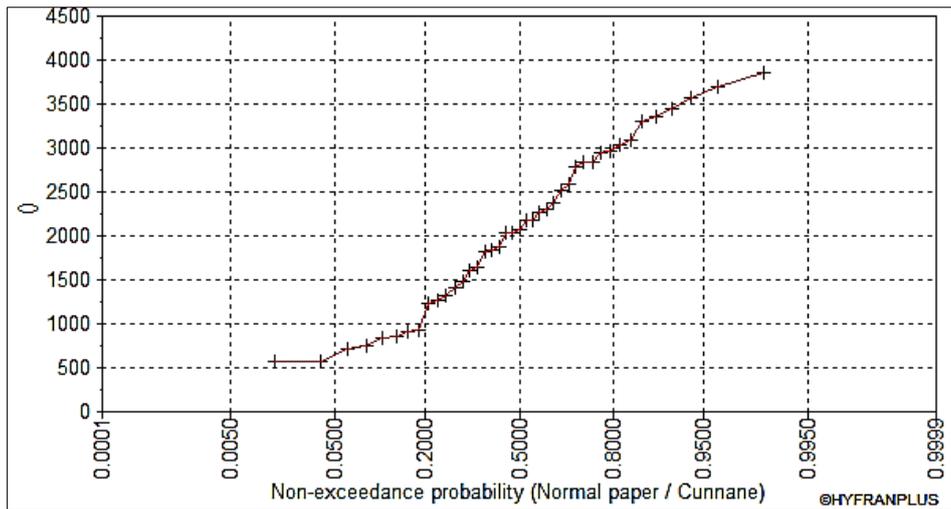
شکل ۹- حدود اعتماد و پیش‌بینی مدل رگرسیونی اهواز-فارسیات

جدول ۳- آماره‌های مربوط به داده‌های تاریخی سیلاب در ایستگاه فارسیات

تعداد داده	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار	میانه	ضریب تغییرات	ضریب چولگی	کورتوزیس
۴۲	۵۷۹	۳۸۵۰	۲۱۰۰	۹۴۸	۲۰۸۰	۰/۴۵۲	۰/۰۵۱۷	۱/۸۳

داده‌های سیل تاریخی را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده آن است که توزیع نرمال می‌تواند کننده مناسبی برای تحلیل فراوانی سیلاب‌های تاریخی فارسیات باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب چولگی داده‌های سیل بسیار کم بوده، این امر می‌تواند مؤید کفایت تعداد ۴۱ سال داده موجود برای تحلیل فراوانی سیلاب‌ها و اعتماد بالا نسبت به نتایج شبیه‌سازی تلقی شود. شکل ۱۰، توزیع احتمال تجمعی تجربی



شکل ۱۰- تابع توزیع تجمعی تجربی سیلاب‌های تاریخی فارسیات

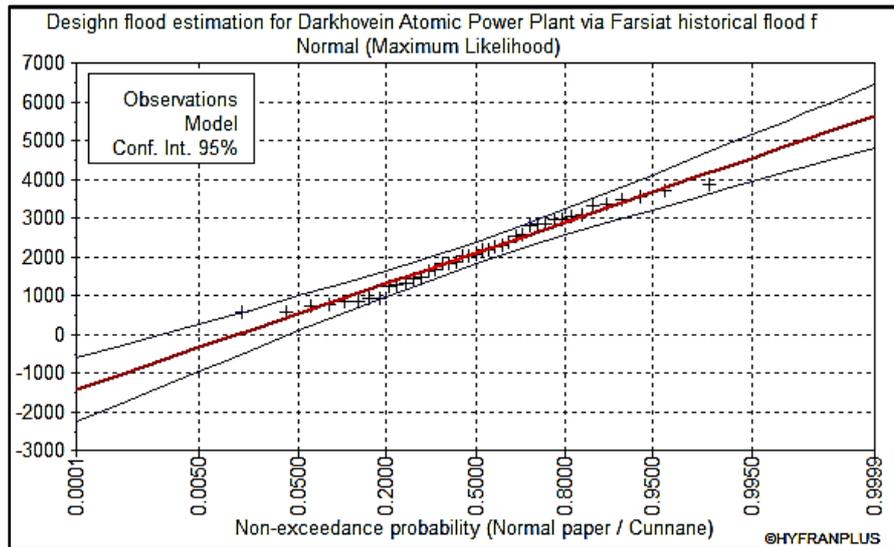
برای ارزیابی و یافتن بهترین تابع چگالی احتمال متداول توابع چگالی احتمال اقدام شد که نتیجه نهایی قابل برازش بر داده‌ها نسبت به برازش ۱۵ تیپ در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- آزمون نیکویی برازش توابع چگالی احتمال بر سیلاب‌های تاریخی فارسیات

Distribution	AD	P
Normal	۰/۳۷۱	۰/۴۰۸
Box-Cox Transformation	۰/۴۹۵	۰/۲۰۳
Lognormal	۰/۹۸۲	۰/۰۱۲
3-Parameter Lognormal	۰/۴۰۸	*
Exponential	۵/۲۲۱	<۰/۰۰۳
2-Parameter Exponential	۲/۱۶۴	<۰/۰۱۰
Weibull	۰/۴۲۹	>۰/۲۵۰
3-Parameter Weibull	۰/۵۰۶	۰/۲۰۷
Smallest Extreme Value	۰/۵۶۴	۰/۱۵۱
Largest Extreme Value	۰/۶۱۹	۰/۰۹۹
Gamma	۰/۶۵۲	۰/۰۹۴
3-Parameter Gamma	۰/۶۳۹	*
Logistic	۰/۴۳۶	۰/۲۳۶
Loglogistic	۰/۸۶۵	۰/۰۱۴
3-Parameter Loglogistic	۰/۴۴۲	*

دارخوین محاسبه شدند. نتیجه حاصل از برازش توزیع نرمال تا سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله در شکل ۱۱ و جدول ۵ آورده شده است.

از استفاده توأمان دو آماره اندرسن دارلینگ (AD) و P value توزیع منتخب توزیع نرمال می‌باشد. با استفاده از این توزیع سیلاب‌های طراحی ایستگاه



شکل ۱۱- تابع چگالی احتمال نرمال برازش داده شده بر سیلاب‌های تاریخی ایستگاه فارسیات

جدول ۵- سیلاب‌های طراحی سایت دارخوین

حدود اعتماد	انحراف از معیار	دبی (m^3sec^{-1})	دوره بازگشت (سال)
۶۴۵۰	۴۸۰۰	۵۶۲۰	۱۰۰۰۰
۵۹۶۰	۴۴۷۰	۵۲۲۰	۲۰۰۰
۵۷۳۰	۴۳۲۰	۵۰۳۰	۱۰۰۰
۴۸۷۰	۳۷۴۰	۴۵۴۰	۲۰۰
۴۸۷۰	۳۷۴۰	۴۳۰۰	۱۰۰
۴۵۶۰	۳۵۳۰	۴۰۴۰	۵۰
۴۲۲۰	۳۲۹۰	۳۷۶۰	۲۵
۴۱۰۰	۳۲۱۰	۳۶۶۰	۲۰
۳۷۱۰	۲۹۲۰	۳۳۱۰	۱۰
۳۲۳۰	۲۵۶۰	۲۸۹۰	۵
۲۳۹۰	۱۸۱۰	۲۱۰۰	۲

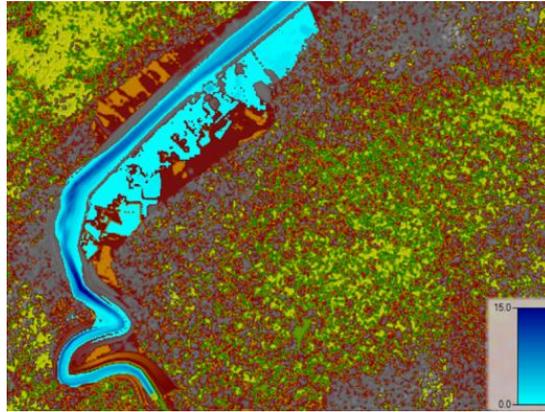
محیط RAS MAPPER فراخوانده شده است که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

با رسیدن دبی جریان به مقدار ۴۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه تمام محدوده تاسیسات هسته‌ای زیر آب رفته و عمق آب در محدوده به ۱/۵ متر می‌رسد و با دبی بیشینه ۵۰۳۰ مترمکعب بر ثانیه (دوره ۱۰۰۰ ساله) عمق آب به ۲/۳ متر می‌رسد. برای تحلیل فراوانی و سپس، محاسبه عدم قطعیت عمق سیلاب طراحی برای دبی‌های مختلف سیلابی با ۱۰۰ بار نمونه‌گیری از فضای دبی‌های محتمل در رودخانه کارون که

شبیه‌سازی دوبعدی سیل مبنای طراحی و استخراج توابع توزیع احتمالات: با ورود دبی سیلابی به رودخانه و با توجه به هندسه رودخانه در محدوده سایت نیروگاهی، هنگامی که دبی رودخانه از مقدار ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه تجاوز کند، آب از بستر و سواحل رودخانه سرریز کرده و وارد محدوده تاسیسات هسته‌ای می‌شود. در این دبی، عمق آب تا حدود ۶۰ سانتی‌متر می‌رسد. نقشه رقومی در نرم‌افزار GIS تهیه شده (شکل ۳) و به همراه عمق سیلاب به

آماري عمق سيلاب در جامعه آماری هدف به شرح جدول ۶ می‌باشد.

بتوانند در سيلاب‌دشت براه افتند، عمق آب در محدوده سایت پلان با اجرای مدل HEC-RAS به ازای هر دبی نمونه‌گیری شده محاسبه شد. مشخصات



شکل ۱۲- عمق جریان حاصل از مدل‌سازی برای دبی پیک ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه

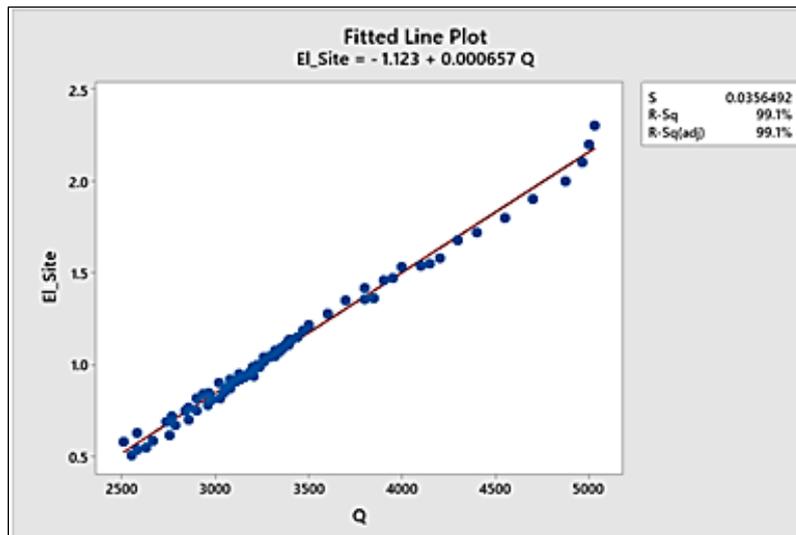
جدول ۶- آماره‌های مربوط به عمق آب شبیه‌سازی شده در محدوده نیروگاه

تعداد	میانگین	انحراف استاندارد	انحراف از معیار	واریانس	ضریب تغییرات	کمینه	بیشینه	میانه	چولگی
۸۳	۱/۱۰۹۹	۰/۰۴۲۱	۰/۳۸۳۲	۰/۱۴۶۹	۳۴/۵۳	۰/۵۱	۲/۳	۱/۰۵	۱/۰۵

دبی کارون و عمق سيلاب وجود دارد که علاوه بر ضریب تعیین حدود ۹۹ درصد میزان Pvalue آن نیز حدود صفر می‌باشد.

$$EL_{site} = -1.123 + 0.000657Q_{karoun} \quad (11)$$

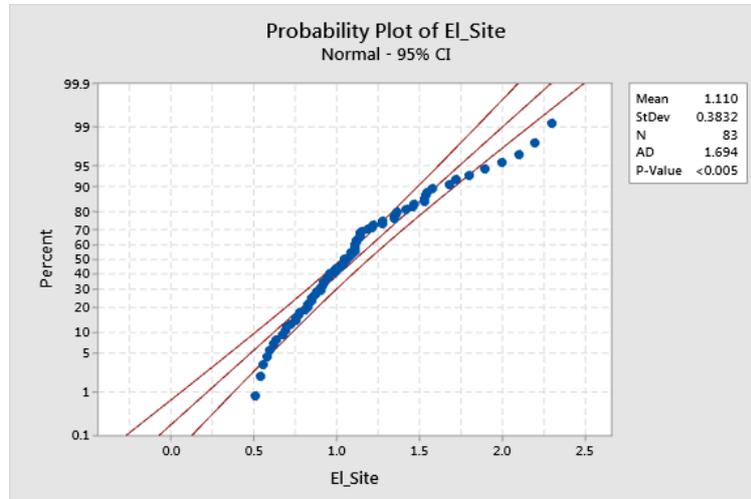
از نتایج حاصله از شبیه‌سازی دو بعدی، نمودار پراکندگی میزان متوسط عمق به ازای دبی رودخانه کارون در محوطه نیروگاه به‌دست آمد که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مطابق با معادله (۱۱) رابطه خطی قابل اعتمادی بین



شکل ۱۳- رابطه عمق آب در سایت نیروگاه و دبی رودخانه کارون در ایستگاه فارسیات

همانند توزیع احتمالاتی سیلاب مولد آن باشد. شکل ۱۴، نشان می‌دهد که توزیع احتمالاتی عمق سیلاب برخلاف دبی سیلابی در محدوده طرح از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند.

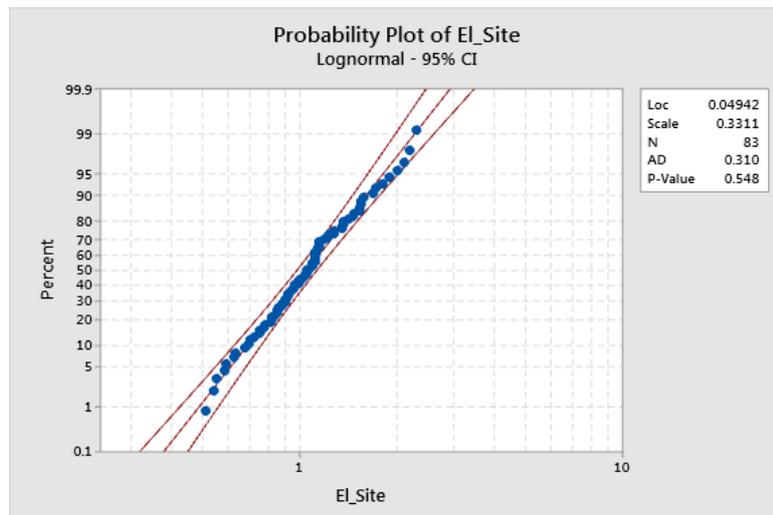
با توجه به تصادفی بودن عوامل مولد عمق سیلاب، برای تعیین مقادیر حدی عمق لازم است، توزیع احتمالاتی این متغیر تعیین شود. با توجه به غیرخطی بودن عوامل مؤثر بر تشکیل این متغیر تصادفی نمی‌توان اطمینان داشت که توزیع احتمالاتی عمق



شکل ۱۴- آزمون نرمالیته برای عمق سیلاب در محل سایت

۱۵، برازش تابع توزیع احتمالی لوگ نرمال بر داده‌های عمق جریان را نشان می‌دهد.

آزمون نیکویی برازش نشان داد که توزیع عمق جریان سیلابی در منطقه دارخوین توزیع لوگ نرمال با میانگین ۰/۰۴۸ و واریانس ۰/۱۱۲۶ می‌باشد. شکل



شکل ۱۵- ارزیابی تابع توزیع تجمعی عمق جریان سیلابی در مقابل توزیع احتمال لوگ-نرمال

به‌دلیل عدم وجود تابع قابل تحلیل با استفاده از سری تیلور و روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو، به‌دلیل تعدد عوامل مؤثر شامل طیف وسیعی از عوامل هواشناسی، مورفولوژیکی رودخانه و دشت که به‌دلیل

محاسبه عدم قطعیت: همان‌طور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، در محاسبه عدم قطعیت پارامترهای سیلاب، استفاده از روش‌های تقریبی مانند FOSM،

فراوانی عمق سیلاب تغییر یافت، عدم قطعیت تحمیل شده برای تأمین ایمنی به یک مساله یک بعدی تغییر حالت داد. بر این اساس و با توجه به آن که توزیع حاکم بر عمق طراحی با توجه به شبیه سازی قطعی پارامتر از طریق اجرای مدل هیدرولیکی برای طیف وسیعی از سیلاب های محتمل مشخص است، برای تعیین عدم قطعیت از روش روزنبلات (RPEM) استفاده به عمل آمد. با استفاده از معادله های (۵) الی (۹) مقادیر x_- و x_+ ، p_- و p_+ و همچنین، x_-' و x_+' مطابق جدول زیر محاسبه شده اند.

جدول ۸- پارامترهای محاسبه شده برای روش روزنبلات

p_-	p_+	x_-'	x_+'	Cs
۰/۷۳۲۴۱۷	۰/۲۶۷۵۸۳	۰/۶۰۴۴۳۶	۱/۶۵۴۴۳۶	۱/۰۵

حد بالای عمق محتمل از روش روزنبلات (ستون پنجم جدول ۹) و سپس، با استفاده از رابطه (۱۱)، دبی سیلابی مربوط به هر عمق را به دست آورد و در نهایت، با استفاده از مقادیر جدول ۵ دوره بازگشت سیل مورد نظر را محاسبه کرد. نتایج حاصله در جدول ۹ ارائه شده اند.

کمبود داده و دانش، شناخت قابل اعتمادی از توزیع چگالی احتمال حاکم بر آن ها به تنهایی و همین طور حاکم بر خروجی حاصل از اندرکنش عوامل تولید عمق سیلاب وجود ندارد، میسر نمی باشد. در این تحقیق، با توجه به مشکلات یاد شده برای دیگر روش های تحلیل عدم قطعیت، استفاده از روش های تقریب نقطه ای یک یا چند متغیره برای که برای هر دو حالت توزیع متقارن و غیرمتقارن قابل تعریف هستند، مورد توجه قرار گرفت. با توجه به این که در این تحقیق مساله ایجاد ایمنی برای سازه نیروگاه در مقابل سیل به استفاده از روش های مبتنی بر تحلیل

اکنون می توان با داشتن x_-' ها برای هر سطح اعتماد دلخواه و به عبارت دیگر، برای هر احتمال تجاوز یا دوره بازگشت به حدود بالا و پایین مقادیر محتمل عمق سیلاب برای احتساب عدم قطعیت های ممکن دست یافت. با توجه به این که هدف طرح تأمین ایمنی تاسیسات در مقابل سیل است، تنها به گزارش حد بالای این پارامتر بسنده شد. اکنون می توان با داشتن

جدول ۹- عمق و دوره بازگشت سیلاب در محدوده دارخوین و دبی با دوره بازگشت متناظر در کارون

دوره بازگشت عمق سیلاب	P	2P	Z	d+(m)	Q (m ³ sec ⁻¹)	دوره بازگشت دبی سیلابی
۲	۰/۵	۱	۰	۱/۱۱	۳۳۹۸/۶	۱۲/۵
۵	۰/۲	۰/۴	۰/۸	۱/۶۴۳	۴۲۱۰/۷	۸۲/۷
۱۰	۰/۱	۰/۲	۱/۶۴۵	۲/۱۵۳	۴۹۸۶/۰	۹۲۶/۵
۲۵	۰/۰۴	۰/۰۸	۱/۷۵۱	۲/۲۲	۵۰۸۸/۳	۱۳۰۷
۵۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۲/۰۵۴	۲/۴۱۲	۵۳۸۰/۷	۵۲۰۰
۱۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۲	۲/۳۲۶	۲/۵۸۵	۵۶۴۳/۱	۱۰۴۶۰
۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۳/۰۹	۳/۰۶۹	۶۳۸۰/۴	*
۱۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۳/۷۱۹	۳/۴۶۸	۶۹۸۷/۳	*

به دوره بازگشت سیلاب در جدول ۹، ملاحظه می شود که دبی ۱۰۰۰۰ ساله رودخانه کارون در محل سایت نیروگاه با در نظر گرفتن همه عدم قطعیت ها عمقی معادل ۲/۵۸ متر را ایجاد خواهد کرد. نکته جالب توجه در این خصوص آن است، دوره بازگشت عمق

اگر سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله معادل و یا حد پایین بیشینه سیلاب محتمل (PMF^۱) فرض شود (Smith, ۲۰۱۳) می توان به ازای این دوره بازگشت عمق طراحی ایمن را محاسبه کرد. با توجه به ارقام مربوط

^۱ Probable Maximum Flood

سیلابی نیست که نیروگاه را در معرض خطر قرار می‌دهد. این بدان معنی است که سیل طراحی مورد نظر برای ایجاد ایمنی مناسب برای نیروگاه اتمی و یا هر سازه دیگر در محل بستر سیلابی را نمی‌توان از تحلیل فراوانی سیلاب‌های ثبت شده در رودخانه مجاور سایت به‌دست آورد. بر اساس یافته‌های تحقیق، علت این امر آن است که سرریز شدن سیلاب از دیواره‌های رودخانه همچون فیلتر عمل کرده و باعث تغییر رفتار احتمالاتی عمق سیلاب در سایت طراحی نسبت به رفتار احتمالاتی جریان در درون رودخانه می‌شود. بر این اساس، استفاده از یک دوره بازگشت مساوی و یکسان برای دبی سیل طراحی و عمق آب‌گرفتگی ناشی از آن، آن‌طور که در مدل‌سازی بارش-رواناب مرسوم است، می‌تواند منجر به اشتباهاتی عمده در معماری نیروگاه اتمی و یا هر سازه واقع در بستر سیلابی نزدیک به رودخانه شود. بر این اساس، می‌توان گفت که برخلاف رواناب که دوره بازگشت آن معادل دوره بازگشت بارش مولد در نظر گرفته می‌شود، عمق سیلاب در بستر سیلابی می‌تواند از دوره بازگشتی متفاوت با دوره بازگشت سیلاب جاری در آبراهه اصلی رودخانه برخوردار باشد. نتایج مطالعات حاضر نشان داد که در سایت دارخوین درحالی‌که دوره بازگشت سیل طراحی ۱۰ هزار ساله می‌باشد، عمق طراحی برای ایمن‌سازی سازه، دارای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله است. نکته مهم دیگر که در این مطالعه آشکار شد، آن بود که تابع چگالی احتمال دو پدیده با وجود رابطه علت و معلولی (در اینجا سیل و عمق آب‌گرفتگی)، متفاوت از یکدیگر است. در مطالعه موردی انجام شده تابع چگالی احتمال سیلاب، نرمال و تابع چگالی احتمال عمق آب‌گرفتگی لوگ نرمال به‌دست آمد.

در این تحقیق، برای آن‌که بتوان عدم قطعیت‌های ناشی از عوامل طبیعی و کمبود دانش در ارتباط با به-کارگیری مدل هیدرولیکی دوبعدی HECRAS را در تامین حفاظت معقول برای سازه در نظر گرفت، از روش تخمین نقطه‌ای روزنبلات استفاده شد. علت استفاده از این تکنیک آن بود که تنوع پارامترهای دخیل در عدم قطعیت ارتفاع طراحی (شامل عوامل مولد سیلاب و همچنین، پارامترهای نیازمند واسنجی

طراحی برای این سیل ۱۰۰ ساله می‌باشد. بر این اساس و با توجه به این‌که سیل طراحی عملاً معادل PMF محسوب می‌شود، عمق با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، معرف ارتفاع مناسب برای نصب تاسیسات و تجهیزات مهم ایمنی نیروگاه اتمی خواهد بود. بدیهی است که به این ارتفاع باید عمق آزاد ناشی از حرکت امواج در اثر وزش باد در دریاچه تشکیل شده در اطراف نیروگاه را نیز باید افزود. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که مطابق نظر (IAEA, ۲۰۱۸؛ Bensi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Bowles, ۲۰۱۴) در نظر گرفتن عدم قطعیت برای ارزیابی ریسک ناشی از سیل برای نیروگاه‌های اتمی ضروری است. نتایج حاصله مؤید ارزیابی Garcia و همکاران (۲۰۱۲) در خصوص توانایی روش نقطه‌ای روزنبلات در صورت برازش تابع چگالی احتمال متقارن با میانگین و واریانس مشخص در ارزیابی ریسک حاصل از عمق سیلاب می‌باشد. در خصوص بارز نمایی تفاوت ریسک حاصل از عمق سیلاب و ریسک دبی سیلابی مولد آن مرجع مشخصی برای مقایسه وجود ندارد و یافته‌های این تحقیق اولین در نوع خود می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نیروگاه‌های اتمی برای خنک شدن نیاز به دسترسی آسان به منبع آبی مطمئن دارند. یکی از استراتژی‌های مناسب برای رسیدن به این هدف، جایابی نیروگاه‌های اتمی در کنار رودخانه‌ها است. نکته مهمی که در این میان مورد تأکید است، محافظت نیروگاه در مقابل سیلاب و در واقع جلوگیری از رسیدن جریان سیلابی به هسته مرکزی نیروگاه اتمی می‌باشد. IAEA استاندارد ویژه‌ای برای این‌کار پیشنهاد نمی‌کند و بر تنها نکته‌ای که تأکید می‌ورزد، برقراری بیشینه ایمنی و حفاظت از سایت در مقابل سیلاب است. مطالعه موردی در این تحقیق، نیروگاه اتمی دارخوین در کنار رودخانه کارون در استان خوزستان می‌باشد. این تحقیق، به‌دنبال رسیدن به استاندارد مناسب برای تعیین سیل طراحی برای حفاظت نیروگاه می‌باشد. یکی از نکات مهمی که این تحقیق به آن دست یافت و یا بر آن صحنه گذاشت آن است که سیلابی که در رودخانه جریان می‌یابد،

آسیب در امان باشند، ارتفاع ۲/۵۸۵ متر، ارتفاع قابل قبول برای احداث تجهیزات و تاسیسات با درجه اهمیت بالاتر مانند ساختمان رآکتور یا پسماند سوخت بوده، دیگر ارکان طرح با توجه به عناصری نظیر سهولت دسترسی، حمل و نقل، منظر و ... در ارتفاعی متناسب با ارتفاع هسته اصلی نیروگاه جانمایی و طرح خواهند شد. برای ادامه کار و بررسی ایمنی سازه در سایه عدم قطعیت ناشی از عوامل طبیعی و کمبود دانش موجود در شناسایی پارامترها و عوامل مؤثر در مدل‌سازی، در صورتی که حاشیه اطمینان مناسب بر اساس قوانین عرفی موجود برای طراحی مهندسی سازه‌های بزرگ قابل تعریف باشد، پیشنهاد می‌شود، با تعیین تابع عملکرد و تعیین گشتاورهای اول و دوم این تابع با روش FOSM و سپس، محاسبه شاخص اعتمادپذیری سازه، ارتفاع مناسب برای سازه محاسبه و نتایج دو روش نقطه‌ای روزنبلات و این روش جدید مقایسه شود.

در مدل هیدرولیکی در مقابل آبراهه اصلی رودخانه تا اراضی دشت سیلابی در اطراف سایت نیروگاه) سبب می‌شود تا نتوان از روش‌های تحلیل تقریبی مانند FOSM و همچنین، روش مونت کارلو استفاده کرد. بر این اساس و با در نظر گرفتن عمق جریان سیلابی در محل سایت نیروگاه به‌عنوان تنها متغیر محاسباتی به کمک روش تخمین نقطه‌ای روزنبلات امکان پوشش هر دو عامل متغیرهای طبیعی و کمبود دانش فراهم آمد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، برای ارتفاع هسته نیروگاه، عمق آب‌گرفتنی با دوره بازگشت ۱۰۰ سال و روش تخمین نقطه‌ای روزنبلات برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از هر دو منبع فوق‌الذکر قابل توصیه می‌باشد.

در کل، از دیدگاه معماری برای سایت نیروگاه اتمی دارخوین می‌توان گفت که با توجه به این‌که برخی از ساختمان‌ها، سامانه‌ها و تجهیزات نیروگاه‌های هسته‌ای از بالاترین میزان اهمیت ایمنی برخوردار هستند و باید با توجه به مفهوم دفاع عمقی از هرگونه

منابع مورد استفاده

1. Adib, A. and F. Javdan. 2015. Interactive approach for determination of salinity concentration in tidal rivers, case study: the Karun River in Iran. *Ain Shams Engineering Journal*, 6: 785-793.
2. Adlouni, E.S.B. and B. Bobee. 2015. Hydrological frequency analysis using HYFRAN-PLUS software. *Journal of Decision Support System for Hydrological Risk Assessment*, 340: 25-31.
3. Amirmoradi, K., A. Shokoohi and A. Azizian. 2019. Evaluating risk of economic loss due to river flood in urban areas, study area: Kan Watershed. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 50(9): 2239-2259 (in Persian).
4. Bensi, M., F. Ferrante and J. Philip. 2015. Assessment of flood fragility for nuclear power plants: challenges and next steps. 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Manchester, United Kingdom, August 2015.
5. Blazkova, S. and K. Beven. 2009. A limits of acceptability approach to model evaluation and uncertainty estimation in flood frequency estimation by continuous simulation: Salka Catchment. The Czech Republic, *Journal of Water Resource Research*, 45(12): 1-12.
6. Bowles, D. 2014. Probabilistic flood hazard assessment dam performance PRA and nuclear plant risk. Conference: 9th Nuclear Plant Current Issues Symposium, Charlotte, 50 pages.
7. Climate change toolkit. 2009. Designing for flood risk, Royal Institute of British Architects. Published on: www.architecture.com/climatechange.
8. Diez-Herrero, A. and J. Garrote. 2020. Flood risk analysis and assessment, application and uncertainties: a bibliometric review. *Water Journal*, 12(7): 1-24.
9. Flavelle, C. and C.F.J. Lin. 2019. U.S nuclear power plants weren't built for climate change. Bloomberg, Published on: <https://www.bloomberg.com/graphics/2019-nuclear-power-plants-climate-change>.
10. Golder Associate. 2015. Technical report on flood hazard assessment for nuclear power plants in Canada. Final Report, Report Number 1411008-3, Canadian Nuclear Safety Commission.
11. Goodarzi, E., M. Ziaei and L. Teang Shui. 2013. Introduction to risk and uncertainty in hydrosystem engineering. *Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality*, 22: 16-44.
12. Gracia, L.A., M.L. Martinez, I. Escuder-Bueno and A. Serrano-Lombillo. 2012. Assessing the impact of uncertainty on flood risk estimates with reliability analysis using 1-D and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology and Earth System Science and Discussions*, 16: 1985-1994.

13. Grari, A., M. Chourak, F. Boushaba and S. Cherif. 2017. Characterization of river floods on the plain of Saidia. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8: 4734-4743.
14. IAEA. 2003. Flood hazard for nuclear power plants on coastal and river sites. IAEA Safety Standard Series, No. Ns-G-3.5, 83 pages, www.iaea.org.
15. IAEA. 2009. Implementation of the NPT safeguards agreement in the Islamic Republic of Iran. www.iaea.org.
16. IAEA. 2011a. Safety in the utilization and modification of research reactors, specific safety guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG24, 68 pages, www.iaea.org.
17. IAEA. 2011b. A methodology to assess the safety vulnerabilities of nuclear power plants against site specific extreme natural hazard. 96 pages, www.iaea.org
18. IAEA. 2012. The Fukushima Daiichi accident. Report by the Director-General, 1254 pages, www.iaea.org.
19. IAEA. 2018. Nuclear power reactors in the world. Reference Data Series, 80 pages, www.iaea.org.
20. Komatina, D. and N. Branisavljevic. 2005. Uncertainty analysis as a complement to flood risk assessment, <http://daad.wb.tu.harburg.de/fileadmin/BackUsersResources/Risk/Dejan/UncertaintyAnalysis.pdf>.
21. Montanari, A. and G. Grossi. 2008. Estimation the uncertainty of hydrological forecasts: a statistical approach. *Journal of Water Resource Research*, 44, Published on: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008WR006897>.
22. Mahdavi, M. 2013. Applied hydrology. 2nd edition, Tehran University, 437 pages.
23. Ongdas, N., F. Akiyanova, Y. Karakulov, A. Muratbayeva and N. Zinabdin. 2020. Application of HEC-RAS for flood hazard maps generation for Yesil River in Kazakhstan. *Journal of Water*, 12: 26-42.
24. Schulenberg, T. and L. Leung. 2016. Super-critical water-cooled reactors. Handbook of GEN IV nuclear reactor, Woodhead Published Series in Energy, 103 pages.
25. Shahoei, S.V., J. Porhemmat, H. Sedghi, M. Hosseini and A. Saremi. 2018. Monthly runoff simulation through SWAT hydrological model and evaluation of model in calibration and validation periods, case study: Ravansar Sanjabi Basin in Kermanshah Province, Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(3): 464-477 (in Persian).
26. Shokoohi, A., Z. Ganji, J.M. Vali Samani and V.P. Singh. 2018. Analysis of spatial and temporal risk of agricultural loss due to flooding in paddy farms. *Paddy Water Environment*, 16: 737-748.
27. Shrestha, L., P. Durga, G. Corzo and D. Solomatine. 2006. Comparison of methods for uncertainty analysis of hydrologic models. 7th International Conference on Hydroinformatics HIC 2006, Nice, France.
28. Smith, C.D. 2013. The PMF does have a frequency. *Canadian Water Resources Journal*, 23(1): 1-7.
29. The international disaster database. 2016. Published on <http://www.emdat.be/about>.
30. Tung, Y.K. and B.C. Yen. 2005. Hydrosystem engineering uncertainty analysis. McGraw-Hill, 285 pages.
31. Wagner, D., M. Casada and J.B. Fussel. 1984. Methodology for flood risk analysis for nuclear power plants. *Journal of Low-Probability High-Consequence Risk Analysis*, Part of *Advances in Risk Analysis*, 2: 65-80.
32. Worldbank group. 2016. Methods in flood hazard and risk assessment. Published on www.worldbank.org.
33. Yen, C.C. and M.H. Seits. 1987. A comparison of techniques for evaluating hydrologic model uncertainty. *Journal of Probabilistic Engineering Mechanics*, 2: 25-37.
34. Yu, P.S., T.C. Yang and S.J. Chen. 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 244: 43-59.
35. Zbigniew, W., I.P. Kundzewicz and G.R. Brakenridge. 2018. Changes in river flood hazard in Europe: a review. *Journal of Hydrology Research*, 49(2): 294-302.