



A Climate-Informed Actuarial Pricing Framework for Catastrophe Excess of Loss Reinsurance: A Case Study of Flood Risk in Iran

Ali Zinsaz ^{1,*}, Omid Fathi²

¹ Department of Business, Faculty of Entrepreneurship, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Department of Insurance, ECO College of Insurance, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

KEYWORDS:

Climate risk
Composite models
Extreme value theory
Non-Stationary risk
Reinsurance pricing

ABSTRACT

BACKGROUND AND OBJECTIVES: The increasing frequency and severity of floods in Iran, coupled with accelerating climate change, has become a serious challenge to the stability of insurance and reinsurance markets. Iran, due to its geographical location and climatic diversity, has historically been exposed to natural disasters, with floods accounting for over 60% of total economic losses from natural catastrophes between 1990 and 2023. Major recent events, such as the devastating floods of March 2019, which caused more than \$8 billion in economic damage, have starkly revealed the country's high vulnerability and the urgent need for efficient risk transfer mechanisms. Under such circumstances, sole reliance on traditional actuarial pricing models based on stationary historical data—an approach that assumes the past is a reliable guide to the future—can lead to systematic underestimation of future risks. This limitation is particularly critical for the upper layers of catastrophe excess-of-loss (Cat XL) reinsurance, which are inherently exposed to extreme tail risks where data is scarce but potential losses are catastrophic. The scientific consensus confirms that the climate system is undergoing fundamental changes due to anthropogenic activities, rendering the stationarity assumption increasingly untenable for weather-related risks. This study aims to design and apply a novel climate-informed actuarial pricing framework to quantify the impact of climate change on the technical pricing of flood reinsurance in Iran. The main focus is on estimating and analyzing the "climate risk premium" across different reinsurance layers, thereby providing a quantitative basis for incorporating climate projections into actuarial practice.

METHODS: To model annual flood losses over the period 1990–2023, a composite Lognormal-Generalized Pareto Distribution (GPD) was employed to adequately capture the heavy-tailed behavior of the data. To incorporate climate change effects, projected changes in the extreme precipitation index (RX5day) from regional climate models under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were extracted and used to adjust the scale parameter of the GPD. This transformation shifted the loss distribution from a stationary to a non-stationary framework. Subsequently, a Monte Carlo simulation with 100,000 iterations was conducted to price a four-layer catastrophe excess-of-loss reinsurance program.

FINDINGS: The results demonstrate that the composite Lognormal-GPD distribution provides a statistically superior fit to the tail of historical loss data compared to conventional single-distribution approaches, as confirmed by Kolmogorov-Smirnov tests (p -value > 0.05) and Q-Q plot analysis. Analysis of the regional climate model outputs revealed mean relative increases in the RX5day index for Iran of approximately +12% under SSP2-4.5 and +24% under SSP5-8.5. These projected changes translated into corresponding adjustments to the GPD scale parameter, shifting the loss distributions toward larger values. Under the high-emission scenario (SSP5-8.5), the "climate risk premium"—defined as the percentage increase in the technical rate relative to the stationary historical baseline—exhibited a pronounced and systematic upward gradient across reinsurance layers. Specifically, the climate risk premium was calculated at 8% for the lowest layer (\$5 million excess of \$5 million), increasing to 11.1% for the second layer, 19.9% for the third layer, and reaching 38% for the highest layer (\$90 million excess of \$60 million). Furthermore, the exhaustion probability of the top layer more than doubled, increasing from 0.00094 in the historical baseline to 0.00201 under SSP5-8.5. These findings clearly indicate that the impact of climate change is disproportionately more severe on higher and riskier layers, creating a distinct "premium gradient" that traditional stationary models cannot capture.

CONCLUSION: Ignoring the non-stationary nature of climate risks leads to systematic and layer-dependent underpricing in catastrophe reinsurance, with the magnitude of underpricing increasing dramatically for upper layers. The proposed climate-informed actuarial framework provides a practical, transparent, and replicable methodology for primary insurers and reinsurers to directly integrate climate projections into their technical rate calculations. By quantifying the climate risk premium explicitly, this

approach enables more accurate pricing, improved capital allocation, and enhanced risk management. For Iranian insurers, the findings imply an 8–38% increase in technical rates for flood catastrophe layers, with corresponding implications for pricing and reinsurance purchasing decisions. For international reinsurers, the framework offers a robust basis for evaluating flood risk in Iran under different climate scenarios and informing portfolio strategy. More broadly, this approach can enhance market resilience, support evidence-based regulatory decisions, and inform optimal risk transfer strategies in Iran and other vulnerable regions facing similar climate challenges. The transition from stationary to dynamic paradigms in catastrophe risk management is an unavoidable necessity in an era of accelerating climate change.

زود بایند منتشر نشده



چارچوب قیمت‌گذاری اکچوئری اقلیم-آگاه بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه‌آمیز: مطالعه موردی ریسک سیل در ایران

علی زین ساز^۱، امید فتحی^۲

^۱ دکتری کارآفرینی، گروه کسب و کار، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۲ کارشناسی ارشد آمار بیمه، دانشکده بیمه اکو، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در ایران، هم‌زمان با تشدید تغییرات اقلیمی، به یکی از چالش‌های جدی برای ثبات بازارهای بیمه و بیمه اتکایی تبدیل شده است. در چنین شرایطی، اتکای صرف به مدل‌های سنتی قیمت‌گذاری اکچوئری که مبتنی بر داده‌های تاریخی ایستا هستند، می‌تواند به کم‌برآوردی نظام‌مند ریسک‌های آتی منجر شود؛ به‌ویژه در لایه‌های بالایی بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه‌آمیز که ماهیتاً در معرض ریسک‌های دنباله‌ای قرار دارند. این پژوهش با هدف طراحی و به‌کارگیری یک چارچوب قیمت‌گذاری اکچوئری اقلیم‌آگاه انجام شده است تا اثر تغییرات اقلیمی بر نرخ‌گذاری فنی بیمه اتکایی سیل در ایران کمی‌سازی شود. تمرکز اصلی مطالعه بر برآورد «حق بیمه ریسک اقلیمی» در سطوح مختلف لایه‌های اتکایی است.

روش‌شناسی: برای مدل‌سازی خسارت‌های سالانه سیل طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳، از یک توزیع ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو تعمیم‌یافته (GPD) استفاده شد تا رفتار دنباله سنگین داده‌ها به‌درستی منعکس شود. به‌منظور لحاظ کردن اثر تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی‌های مربوط به شاخص شدت بارش از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج و برای تعدیل پارامتر مقیاس توزیع پارتو تعمیم‌یافته به‌کار گرفته شد. به این ترتیب، توزیع خسارت از حالت ایستا به چارچوبی غیرایستا منتقل شد. در ادامه شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰,۰۰۰ تکرار برای قیمت‌گذاری یک برنامه چهارلایه قرارداد اتکایی مازاد خسارت فاجعه‌آمیز مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد توزیع ترکیبی به‌طور معناداری برازش بهتری بر بخش دنباله داده‌های تاریخی دارد. تحت سناریوی انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP5-8.5)، «حق بیمه ریسک اقلیمی» — که به‌صورت درصد افزایش نرخ فنی نسبت به حالت ایستا تعریف شد — روندی صعودی و قابل توجه در میان لایه‌ها نشان داد: ۸ درصد برای پایین‌ترین لایه (۵ میلیون دلار مازاد بر ۵ میلیون دلار) در برابر ۳۸ درصد برای بالاترین لایه (۹۰ میلیون دلار مازاد بر ۶۰ میلیون دلار). همچنین احتمال اتمام لایه بالایی بیش از دو برابر شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که اثر تغییرات اقلیمی بر لایه‌های بالاتر و پریسک‌تر، به‌مراتب شدیدتر و نامتناسب‌تر است.

نتیجه‌گیری: نادیده گرفتن ماهیت غیرایستای ریسک‌های اقلیمی، منجر به کم‌برآوردی نظام‌مند و وابسته به لایه در قیمت‌گذاری بیمه اتکایی فاجعه‌آمیز می‌شود. چارچوب پیشنهادی این پژوهش، رویکردی عملی و قابل تکرار در اختیار بیمه‌گران مستقیم و بیمه‌گران اتکایی قرار می‌دهد تا پیش‌بینی‌های اقلیمی را به‌صورت مستقیم در محاسبات نرخ فنی خود ادغام کنند. چنین رویکردی می‌تواند به تقویت تاب‌آوری بازار، بهبود مدیریت سرمایه و اتخاذ راهبردهای بهینه انتقال ریسک در ایران و سایر مناطق آسیب‌پذیر کمک کند.

کلمات کلیدی:

ریسک اقلیمی
ریسک غیرایستا
قیمت‌گذاری بیمه
اتکایی فاجعه‌آمیز
مدل‌های ترکیبی
نظریه ارزش فرین

صنعت بیمه و بیمه اتکایی به عنوان یک ضربه گیر مالی کلیدی در مواجهه با بلایای طبیعی عمل می کند. در ایران، سیل به عنوان پرهزینه ترین بلا در چند دهه گذشته شناسایی شده است (CRED, 2023). رویدادهای بزرگ اخیر، مانند سیل فروردین ۱۳۹۸، که خسارتی بالغ بر ۱۰ میلیارد دلار به اقتصاد ملی وارد آوردند، آسیب پذیری بالای کشور و نیاز مبرم به مکانیسم های کارآمد انتقال ریسک را عیان ساخته اند (OCHA, 2019). در این میان، بیمه اتکایی بین المللی کانالی حیاتی برای پخش این ریسک های فراتر از ظرفیت نگهداری بازار داخلی محسوب می شود.

قیمت گذاری دقیق قراردادهای بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه آمیز همواره چالشی پیچیده بوده، چرا که مستلزم مدل سازی صحیح رویدادهای نادر اما به شدت ویرانگر است (Werner & Modlin, 2010). مدل های سنتی قیمت گذاری عمدتاً بر فرض ایستایی آماری متکی هستند؛ بدین معنا که توزیع خسارت های گذشته، نماینده بی تغییر ریسک آینده فرض می شود. با این حال، اجماع علمی قاطع، نشان دهنده تغییر سیستم اقلیمی تحت تأثیر فعالیت های انسانی است (Masson-Delmotte et al., 2021). برای ایران، مطالعات مبتنی بر مدل های اقلیمی منطقه ای مانند کوردکس- منا پیش بینی می کنند که با وجود کاهش احتمالی در تعداد روزهای بارانی، شدت و حدت بارش در روزهای بارانی به طور معناداری افزایش خواهد یافت (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021). این تغییر الگو، احتمال وقوع سیلاب های ناگهانی و مخرب را افزایش داده و به طور بنیادین، فرض ایستایی در مدل سازی ریسک سیل را زیر سؤال می برد.

این چالش، یک شکاف مهم بین پژوهش و عمل را نمایان می سازد. از یک سو، چارچوب های روش شناختی برای قیمت گذاری اکچوئری اقلیم-آگاه در حال ظهور هستند که بر ادغام پیش بینی های اقلیمی در مدل های ریسک تأکید دارند (McNeil et al., 2015)، از سوی دیگر، مدل های آماری پیشرفته ای مانند مدل های ترکیبی برای برازش دقیق دنباله سنگین توزیع خسارت های فاجعه توسعه یافته اند (Reynkens et al., 2017). با وجود این پیشرفت ها، کاربرد عملیاتی و آزمون چنین چارچوب های تلفیقی در یک مطالعه موردی ملی و در بافتی با چالش داده مانند ایران، به طور گسترده مورد غفلت واقع شده است. اکثر تحلیل های ریسک موجود برای ایران یا فاقد عمق فنی اکچوئری لازم برای قیمت گذاری هستند، یا تغییرات اقلیمی را به صورت کیفی و غیرمستقیم در نظر می گیرند.

هدف این مقاله، پر کردن شکاف موجود از طریق ارائه و اجرای یک چارچوب قیمت گذاری اکچوئری اقلیم آگاه است که متناسب با شرایط اقلیمی و ساختار بازار بیمه ایران طراحی شده است. نوآوری این پژوهش را می توان در سه محور اصلی خلاصه کرد:

۱. توسعه یک مطالعه موردی عینی: تمرکز بر ریسک سیل در ایران با اتکا به داده های واقعی خسارت و بهره گیری از پیش بینی های کمی مدل های اقلیمی منطقه ای، به گونه ای که نتایج از سطح نظری فراتر رفته و قابلیت کاربرد عملی داشته باشد.
۲. ایجاد یک پیوند روش شناختی کمی: ارائه یک مسیر تحلیلی مشخص برای تبدیل تغییرات پیش بینی شده در شاخص های شدت بارش به تعدیل پارامترهای مدل توزیع خسارت ترکیبی لگ نرمال-پارتو. این بخش عملاً حلقه اتصال میان علم اقلیم و مدل سازی اکچوئری را برقرار می کند.
۳. تولید خروجی های کاربردی برای تصمیم گیری بازار: کمی سازی اثر سناریوهای مختلف اقلیمی بر شاخص های کلیدی قیمت گذاری، از جمله خسارت مورد انتظار و نرخ فنی، در قالب یک نمونه واقعی قرارداد بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه آمیز؛ به گونه ای که نتایج بتواند مستقیماً در فرآیند نرخ گذاری و مدیریت سرمایه مورد استفاده قرار گیرد.

چارچوب پیشنهادی می تواند به عنوان راهنمایی عملی برای بیمه گران، بیمه گران اتکایی و نهادهای تنظیم گر به کار رود تا پیامدهای مالی تغییرات اقلیمی را دقیق تر درک کرده و تصمیمات آگاهانه تری در حوزه قیمت گذاری، نگهداری ریسک و تخصیص سرمایه اتخاذ کنند. بر همین اساس در این پژوهش به کمی سازی اثر تغییرات اقلیمی بر نرخ گذاری فنی بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه آمیز سیل در ایران و برآورد حق بیمه ریسک اقلیمی در لایه های مختلف قرارداد پرداخته شده است.

نظریه قیمت‌گذاری خنثی نسبت به ریسک در بیمه اتکایی

مبنای نظری اصلی برای قیمت‌گذاری قراردادهای بیمه و اتکایی، چارچوب قیمت‌گذاری خنثی نسبت به ریسک^۱ است که از نظریه مالی مدرن اقتباس شده است (Cochrane, 2005). در این چارچوب، قیمت منصفانه یک قرارداد بیمه اتکایی، برابر است با ارزش فعلی خسارت مورد انتظار، اما تحت اندازه احتمال معادل مارتینگل^۲، نه لزوماً احتمال واقعی^۳. به عبارت ریاضی، حق‌بیمه خالص^۴ برای یک لایه اتکایی با حد خسارت A و حداکثر پوشش L به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Pi = e^{-rT} \mathbb{E}^Q[\min(\max(X - A, 0), L)]$$

که در آن X متغیر تصادفی خسارت کل سالانه، r نرخ بهره بدون ریسک و T دوره پوشش است. چالش اصلی در عمل، یافتن یا برآورد اندازه احتمال Q است که بازتاب‌دهنده ترجیحات بازار، قیمت‌گذاری ریسک و شرایط کلی نقدینگی است (Møller & Steffensen, 2007). برای ریسک‌های فاجعه‌آمیز، که معمولاً با بازارهای سرمایه مرتبط نیستند، یک رویکرد رایج، استفاده از فرمول تبدیل انتظار تحت P با یک سربار ریسک^۵ است، مانند استفاده از نظریه توزیع شده^۶ یا نظریه تبدیل وانگ^۷ (Wang, 2000).

نظریه ارزش فرین و مدل‌سازی دنباله سنگین توزیع خسارت

ریسک‌های فاجعه‌آمیز ذاتاً با رویدادهای نادر اما با شدت بسیار بالا مشخص می‌شوند. نظریه ارزش فرین^۸ چارچوب ریاضی مستحکمی برای استنتاج در مورد احتمال رویدادهای فراتر از محدوده داده‌های مشاهده شده تاریخی فراهم می‌کند (Embrechts et al., 2013). قضیه بنیادی ارزش فرین بیان می‌دارد که برای دنباله‌ای از مقادیر بیشینه مستقل و هم‌توزیع، پس از استانداردسازی مناسب، توزیع حدی به یکی از سه خانواده زیرمجموعه توزیع تعمیم‌یافته ارزش فرین تعلق دارد. برای مدل‌سازی مقادیر فراتر از یک آستانه بالا، توزیع شرطی این مقادیر به صورت مجانبی به یک توزیع پارتو تعمیم‌یافته همگرا می‌شود (Coles et al., 2001). این ویژگی، توزیع پارتو تعمیم‌یافته را به ابزار استاندارد برای مدل‌سازی "دم" توزیع خسارت‌های فاجعه‌آمیز تبدیل کرده است.

مدل‌های ترکیبی برای توزیع خسارت

از آنجا که توزیع کلی خسارت‌های بیمه‌ای اغلب شامل یک «بدنه» (خسارت‌های کوچک و متوسط) و یک «دم سنگین» (خسارت‌های بزرگ) است، استفاده از یک توزیع پارامتریک واحد (مانند لگ‌نرمال یا گاما) ممکن است منجر به برازش ضعیف در یکی از این نواحی شود. مدل‌های ترکیبی این مشکل را با اتصال دو یا چند توزیع در نقاط اتصال از پیش تعیین‌شده حل می‌کنند (Reynkens et al., 2017). یک مدل ترکیبی رایج، مدل لگ‌نرمال-پارتو است که در آن خسارت‌های زیر یک آستانه u با توزیع لگ‌نرمال و خسارت‌های بالای u با توزیع پارتو تعمیم‌یافته مدل می‌شوند (Scollnik, 2007). تابع چگالی احتمال این مدل به صورت زیر است:

$$f(x) = \begin{cases} (1 - \phi) \cdot f_{LN}(x | \theta_{LN}) & \text{برای } x \leq u \\ \phi \cdot f_{GPD}(x - u | \theta_{GPD}) & \text{برای } x > u \end{cases}$$

¹ Risk-Neutral Pricing

² Equivalent Martingale Measure - Q

³ Physical Measure - P

⁴ Pure Premium

⁵ Risk Load

⁶ Distortion Theory

⁷ Wang Transform

⁸ Extreme Value Theory - EVT

که در آن $\phi = P(X > u)$ احتمال فراتر رفتن از آستانه است. این مدل انعطاف‌پذیری بالایی را برای شبیه‌سازی همزمان رفتار بدنه و دم توزیع فراهم می‌کند.

عدم قطعیت اقلیمی و ریسک غیرایستا

فرض بنیادی در بیشتر مدل‌های مالی و اکچوئری ایستایی فرآیندهای تصادفی پایه است. این فرض در مورد ریسک‌های آب‌وهوایی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی به چالش کشیده شده است (Masson-Delmotte et al., 2021). تغییر در ترکیب جو، متوسط دمای جهانی و چرخه هیدرولوژیکی، فراوانی، شدت و مکان رویدادهای حدی آب‌وهوایی (مانند بارش‌های سنگین، خشکسالی‌ها و امواج گرمایی) را تغییر می‌دهد. این امر منجر به یک ریسک غیرایستا می‌شود که در آن توزیع احتمال خسارت در طول زمان ثابت نیست (Kunreuther et al., 2013). بنابراین، مدل‌های قیمت‌گذاری که صرفاً بر داده‌های تاریخی متکی هستند، ممکن است ریسک آینده را به شکل سیستماتیک کم‌برآورد کنند. ادغام پیش‌بینی‌های کمی از مدل‌های سیستم زمین (مانند مدل‌های گردش عمومی جو و مدل‌های منطقه‌ای) در چارچوب‌های ارزیابی ریسک، یک پارادایم ضروری برای حرکت از "اقلیم گذشته به عنوان آنالوگ آینده" به سمت "مدل‌سازی صریح آینده احتمالاتی" است (Hausfather & Peters, 2020).

شبیه‌سازی مونت‌کارلو در قیمت‌گذاری بیمه

برای محاسبه قیمت قراردادهای پیچیده بیمه اتکایی که فاقد فرم تحلیلی بسته هستند، شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک روش عددی قدرتمند است (Kroese et al., 2011). در این روش، با تولید تعداد زیادی (مثلاً $N=10^5$ یا 10^6) سناریوی تصادفی از متغیرهای کلیدی (مانند فراوانی و شدت رویدادها، الگوی وابستگی مکانی)، یک توزیع تجربی از خسارت کل ایجاد می‌شود. سپس، شاخص‌های مورد نظر مانند خسارت مورد انتظار، احتمال فعال شدن قرارداد^۱، احتمال اتمام لایه^۲ و چارک‌های توزیع به طور مستقیم از این توزیع تجربی محاسبه می‌شوند. قدرت این روش در توانایی آن برای در نظرگیری پیچیدگی‌هایی مانند ساختارهای لایه‌ای قرارداد، وابستگی‌ها^۳ بین خطرهای مختلف و ادغام سناریوهای خارجی (مانند سناریوهای اقلیمی) نهفته است.

مروری بر پیشینه پژوهش

مرور ادبیات حاضر در سه حوزه متمرکز است: (۱) کاربرد مدل‌های ترکیبی و ارزش فرین در قیمت‌گذاری فاجعه، (۲) تلاش‌های اولیه برای ادغام ریسک اقلیمی در مدل‌های بیمه و (۳) شکاف موجود که این تحقیق قصد پر کردن آن را دارد.

مدل‌های ترکیبی در قیمت‌گذاری بیمه اتکایی فاجعه‌آمیز

مدل‌سازی دقیق دنباله توزیع خسارت، سنگ بنای قیمت‌گذاری لایه‌های بالای بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه‌آمیز^۴ است. اسکولنیک (Scolnik, 2007) به طور پیشگامانه‌ای استفاده از مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو را برای داده‌های خسارت معرفی کرد و نشان داد این مدل در مقایسه با توزیع‌های تک‌حالت، برازش بهتری به داده‌های دارای چولگی و کشیدگی بالا ارائه می‌دهد. پس از آن، رینکنس و همکاران (Reynkens et al., 2017) چارچوب کلی‌تری برای مدل‌سازی ترکیبی با استفاده از ترکیبی از توزیع اِرلانگ و توزیع ارزش فرین ارائه دادند و یک استراتژی برازش سراسری را پیشنهاد کردند که برای داده‌های سانسور شده که در بیمه رایج است، مناسب می‌باشد. پژوهش‌های کاربردی‌تر، مانند کار کیر و روی (Khare &

¹ Attach Probability

² Exhaustion Probability

³ Copulas

⁴ Cat XL

Roy, 2021). بر نقش ویژه خسارت‌های رخدادی بزرگ^۱ در شکل‌دهی به هزینه مورد انتظار لایه‌های قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که جداسازی مدل‌سازی بدنه و دم توزیع برای درک این نقش ضروری است.

ادغام ریسک اقلیمی در ارزیابی ریسک و قیمت‌گذاری بیمه

با افزایش پذیرش علمی تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت انسانی، تلاش‌ها برای کمی‌سازی تأثیر آن بر ریسک‌های بیمه‌ای شدت گرفته است. مک‌نیل، فری و امبرچتس (McNeil et al., 2015) در اثر مرجع خود به صراحت بر ناکافی بودن رویکردهای ایستا در محیط غیرایستای کنونی تأکید کرده و نیاز به در نظرگیری مدل ریسک^۲ ناشی از تغییر پارادایم اقلیمی را خاطرنشان ساخته‌اند. در سطح کاربردی، برخی مطالعات به صورت موردی، پیوند بین پیش‌بینی‌های اقلیمی و خسارت‌های بیمه‌ای را بررسی کرده‌اند. برای نمونه، پژوهش‌هایی در اروپا و آمریکای شمالی از خروجی مدل‌های منطقه‌ای اقلیمی^۳ (RCMs) برای تعدیل پارامترهای مدل‌های مخاطره^۴ سیل یا طوفان استفاده کرده و سپس نتایج را در مدل‌های خسارت وارد کرده‌اند. با این حال، این مطالعات اغلب بر تخمین مخاطره فیزیکی متمرکز بوده و کمتر به پیامدهای کامل مالی و قیمت‌گذاری در چارچوب اکچوئری پرداخته‌اند.

شکاف پژوهشی و سهم مطالعه حاضر

با وجود پیشرفت‌های فوق، یک شکاف روش‌شناختی و کاربردی آشکار قابل شناسایی است. از یک سو، ادبیات غنی اکچوئری در حوزه قیمت‌گذاری قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز عمدتاً در یک چارچوب ایستا عمل می‌کند و تغییرپذیری بلندمدت اقلیمی را به صورت صریح در مدل‌های خود وارد نمی‌کند. از سوی دیگر، مطالعات اقلیمی-مخاطره اغلب در مرحله تبدیل خطر به خسارت مالی متوقف می‌شوند و ندرتاً تا محاسبه شاخص‌های دقیق قیمت‌گذاری بیمه اتکایی (مانند نرخ فنی لایه‌ها) پیش می‌روند. به ویژه، کاربرد یک چارچوب ترکیبی قیمت‌گذاری اکچوئری-اقلیمی در بستر یک کشور با بازار بیمه در حال توسعه و با آسیب‌پذیری بالا در برابر مخاطرات اقلیمی (مانند ایران) در ادبیات موجود مغفول مانده است.

این مطالعه قصد دارد تا با الهام از چارچوب‌های نظری و روش‌شناختی مطرح‌شده، به این موارد بپردازد:

۱. توسعه یک چارچوب عملیاتی: پیاده‌سازی یک مسیر روشن از داده‌های اقلیمی منطقه‌ای تا محاسبه نرخ فنی لایه‌های قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز، با استفاده از یک مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو به عنوان هسته اکچوئری.

۲. مطالعه موردی متمایز: تمرکز بر ریسک سیل در ایران به عنوان یک مورد مطالعاتی درخور توجه، با در نظرگیری چالش‌های خاص داده‌ای (مانند شکاف بیمه‌ای) و اقلیمی (افزایش شدت بارش).

۳. کمی‌سازی حق‌بیمه ریسک اقلیمی: ارائه یک برآورد کمی از حق‌بیمه ریسک اقلیمی^۵ که به عنوان تفاوت بین نرخ‌های فنی محاسبه‌شده تحت سناریوهای اقلیمی آینده و سناریوی پایه تاریخی تعریف می‌شود.

¹ Large Occurrence Losses

² risk model

³ Regional Climate Models

⁴ Hazard Models

⁵ Climate Risk Premium - CRP

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی، تنوع اقلیمی و سابقه بلایای پرهزینه طبیعی، به ویژه سیل، به عنوان منطقه مطالعه انتخاب شد. بر اساس داده‌های پایگاه بین‌المللی بلایا^۱ (CRED, 2023)، در بازه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳، سیل‌ها مسئول بیش از ۶۰٪ از کل خسارت اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی در ایران بوده‌اند. همچنین، پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای پروژه کوردکس-منا حاکی از افزایش معنادار در شدت بارش‌های حدی در بسیاری از نقاط ایران تحت سناریوهای انتشار بالا است (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021)، که لزوم در نظرگیری این تغییرات غیرایستا در ارزیابی ریسک را دوچندان می‌سازد.

این تحقیق از سه مجموعه داده اصلی استفاده می‌کند:

۱. داده‌های خسارت تاریخی: داده‌های سالانه خسارت اقتصادی کل ناشی از سیل در ایران برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ از پایگاه بین‌المللی بلایا (CRED, 2023) استخراج شد. برای اطمینان از قابلیت مقایسه در طول زمان، کلیه مقادیر خسارت با استفاده از شاخص قیمت مصرف‌کننده (CPI) ایالات متحده به قیمت‌های ثابت سال ۲۰۲۳ تعدیل گردید. با توجه به پایین بودن نرخ نفوذ بیمه در ایران - حدود ۲.۲٪ طبق آمار بیمه مرکزی ایران (بیمه مرکزی ج.ا.ا، ۱۴۰۳) - یک نسبت بیمه‌پذیری ۲۰٪ به عنوان فرض پایه در نظر گرفته شد. این فرض مبتنی بر میانگین نسبت خسارت‌های بیمه‌شده در رویدادهای بزرگ تاریخی (مانند سیل ۱۳۹۸ که حدود ۲۵٪ خسارت‌ها تحت پوشش بیمه بود) است. برای بررسی حساسیت نتایج به این فرض، تحلیل حساسیت با مقادیر جایگزین ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ انجام شد. نتایج این تحلیل در ادامه ارائه شده است و نشان می‌دهد که الگوی صعودی حق بیمه ریسک اقلیمی در لایه‌های مختلف پایدار و مقاوم باقی می‌ماند. برای مواجهه با مشکل کم‌گزارشی یا عدم گزارش در سال‌های خاص، از روش درون‌یابی خطی و نیز تطبیق با داده‌های تکمیلی سازمان ملل (OCHA) استفاده گردید.

۲. داده‌های اقلیمی: داده‌های شاخص بارش شدید حداکثر ۵ روزه^۲ از خروجی یک مدل منطقه‌ای تحت پروژه کوردکس-منا و با مدل RCA4 که توسط موسسه سلطنتی هواشناسی و هیدرولوژی سوئد^۳ اجرا شده، تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای منطقه ایران استخراج شد. داده‌ها برای یک دوره پایه تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) و یک دوره آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۴) پردازش شدند. تغییرات نسبی در شاخص بارش شدید حداکثر ۵ روزه بین این دو دوره محاسبه گردید.

۳. ساختار قرارداد نمونه: یک قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز^۴ فرضی اما واقع‌گرایانه برای پوشش خسارت سیل سراسری ایران طراحی شد. ساختار چهارلایه این برنامه در جدول ۱ ارائه شده است. قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز نوعی قرارداد بیمه اتکایی است که برای پوشش رویدادهایی طراحی شده که در آن‌ها دو ریسک یا بیشتر به طور همزمان دچار خسارت می‌شوند (مانند سیل، زلزله، طوفان). خسارت‌های ناشی از یک رویداد تجمیع شده و قرارداد، مازاد خسارت تجمیعی نسبت به سهم نگهداری را تا سقف حد پوشش جبران می‌کند (Spice, 2025).

نوع پوشش	حد لایه	سهم نگهداری	لایه
مازاد خسارت	۵ میلیون دلار	۵ میلیون دلار	L1

¹ The international disaster database

² RX5day

³ SMHI

⁴ Cat XL

نوع پوشش	حد لایه	سهم نگهداری	لایه
مازاد خسارت	۱۵ میلیون دلار	۱۰ میلیون دلار	L2
مازاد خسارت	۳۵ میلیون دلار	۲۵ میلیون دلار	L3
مازاد خسارت	۹۰ میلیون دلار	۶۰ میلیون دلار	L4

جدول ۱. ساختار برنامه نمونه بیمه اتکایی مازاد خسارت فاجعه آمیز (سیل) برای ایران

Table 1. Structure of the Sample Catastrophe Excess of Loss Reinsurance Program (Flood) for Iran

چارچوب تحقیق شامل چهار مرحله متوالی است:

مرحله ۱: برازش مدل ترکیبی بر داده‌های تاریخی: برای تعیین آستانه بهینه (u) از نمودار میانگین باقیمانده فراتر از آستانه^۱ استفاده شد. آستانه در این مدل، همان سهم نگهداری^۲ بیمه‌گر واگذارنده در قراردادهای مازاد خسارت است. خسارت‌های کمتر از این مقدار، به طور کامل توسط بیمه‌گر واگذارنده تحمل می‌شوند و به بیمه‌گر اتکایی منتقل نمی‌گردند. مدل ترکیبی لگ‌نرمال (برای خسارت‌های زیر u) دقیقاً همین بخش از توزیع را مدل‌سازی می‌کند. خسارت‌های فراتر از u ، وارد لایه اتکایی شده و با توزیع پارتو تعمیم‌یافته مدل می‌شوند. در این روش، آستانه‌ای انتخاب می‌شود که در آن نمودار میانگین مازاد نسبت به آستانه‌های بالاتر رفتاری تقریباً خطی از خود نشان دهد. همچنین معیار ثبات پارامترهای توزیع پارتو تعمیم‌یافته به عنوان روش مکمل برای تأیید نهایی آستانه به کار رفت. پس از تعیین $u = 8$ میلیون دلار، پارامترهای توزیع لگ‌نرمال (μ, σ) و پارامترهای توزیع پارتو تعمیم‌یافته (β, γ) به روش درست‌نمایی بیشینه^۳ برآورد شدند. برازش مدل نهایی با استفاده از دو روش ارزیابی شد: (۱) آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (K-S) برای مقایسه توزیع تجربی و نظری ($p\text{-value} > 0.05$ مؤید برازش مناسب)، و (۲) نمودار Q-Q. برای بررسی حساسیت نتایج به انتخاب آستانه، تحلیل حساسیت با تغییر u در بازه ۷ تا ۹ میلیون دلار انجام شد که تغییرات نرخ فنی نهایی لایه‌ها کمتر از ۲٪ بود.

مرحله ۲: تعدیل مدل بر اساس سناریوهای اقلیمی: در این مرحله، پارامتر مقیاس (β) توزیع پارتو تعمیم‌یافته به صورت خطی با ضریب تغییرات پیش‌بینی‌شده در شاخص شدت بارش حداکثر ۵ روزه تعدیل گردید. مطالعات هیدرولوژیکی و مهندسی سیلاب نشان می‌دهند که افزایش شدت بارش حداکثر ۵ روزه، به طور تقریبی خطی با افزایش دبی پیک سیلاب و متعاقباً خسارت‌های بزرگ مرتبط است. بر این اساس، فرمول تعدیل به صورت زیر تعریف شد:

$$\beta_{\text{new}} = \beta_{\text{base}} \times (1 + \Delta_{\text{RX5 day}})$$

که در آن $\Delta_{\text{RX5 day}}$ تغییر نسبی پیش‌بینی‌شده در شاخص شدت بارش حداکثر ۵ روزه است. ضریب انتقال برابر یک در نظر گرفته شد تا اثر انتقال یک به یک لحاظ شود. برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، مقادیر β_{new} به ترتیب ۵.۸ و ۶.۴ میلیون دلار محاسبه شد.

¹ Mean Residual Life Plot

² retention

³ Maximum Likelihood Estimation (MLE)

مرحله ۳: شبیه‌سازی مونت‌کارلو: شبیه‌سازی مونت‌کارلو با $N=100,000$ تکرار در نرم‌افزار R (نسخه ۴.۲.۰) و با استفاده از بسته‌های `ReIns` و `evd` اجرا شد. برای ارزیابی همگرایی، خطای استاندارد برآورد خسارت مورد انتظار لایه‌ها برای تعداد تکرارهای مختلف (۱۰۰,۰۰۰، ۵۰,۰۰۰، ۱۰,۰۰۰ و ۲۰۰,۰۰۰) محاسبه گردید. نتایج نشان داد که پس از ۱۰۰,۰۰۰ تکرار، تغییرات برآوردها کمتر از ۰.۱٪ بوده و لذا همگرایی حاصل شده است. در هر تکرار، یک مقدار تصادفی از توزیع ترکیبی بر اساس پارامترهای مربوط به هر وضعیت اقلیمی (پایه، SSP2-4.5 یا SSP5-8.5) به عنوان خسارت کل سالانه (X) تولید شد. رویدادهای سیل در سال‌های مختلف مستقل فرض شدند. سپس پرداخت هر لایه k با سهم نگهداری A_k و حد پوشش L_k مطابق جدول ۱ به صورت:

$$Y_k = \min(\max(X - A_k, 0), L_k)$$

محاسبه گردید.

مرحله ۴: محاسبه شاخص‌های قیمت‌گذاری: از توزیع تجربی ۱۰۰,۰۰۰ نمونه‌ای پرداخت هر لایه، شاخص‌های کلیدی زیر استخراج شد:

- خسارت مورد انتظار $EL_k = E[Y_k]$
- نرخ فنی هر لایه $Tech_{ROLk} = EL_k / L_k$
- احتمال فعال شدن لایه $P(X > A_k)$
- احتمال اتمام لایه $P(X > A_k + L_k)$

تمامی تحلیل‌های آماری، شبیه‌سازی‌ها و استخراج شاخص‌ها در محیط نرم‌افزار R (نسخه ۴.۲.۰) با استفاده از بسته‌های `evd`، `ismev` و `ReIns` انجام شد تا از یکپارچگی و صحت محاسبات اطمینان حاصل گردد.

نتایج و بحث

برازش مدل ترکیبی و تحلیل دنباله توزیع

نتایج برازش مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو به داده‌های خسارت بیمه‌پذیر سیل ایران (۱۹۹۰-۲۰۲۳) نشان داد که آستانه بهینه سهم نگهداری u در حدود ۸ میلیون دلار قرار دارد. پارامترهای مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو با استفاده از روش درست‌نمایی بیشینه برآورد شدند. برآورد پارامترها به صورت عددی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی BFGS در نرم‌افزار R انجام گرفت. برای محاسبه خطای استاندارد پارامترها و اطمینان از پایداری برآوردها، از روش بوت‌استرپ پارامتریک با ۱,۰۰۰ تکرار استفاده شد. نتایج برآورد پارامترها در جدول ۲ گزارش شده است. آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف انجام شده بر روی مدل نهایی، برازش مناسب آن را تایید کرد ($p\text{-value} > 0.05$).

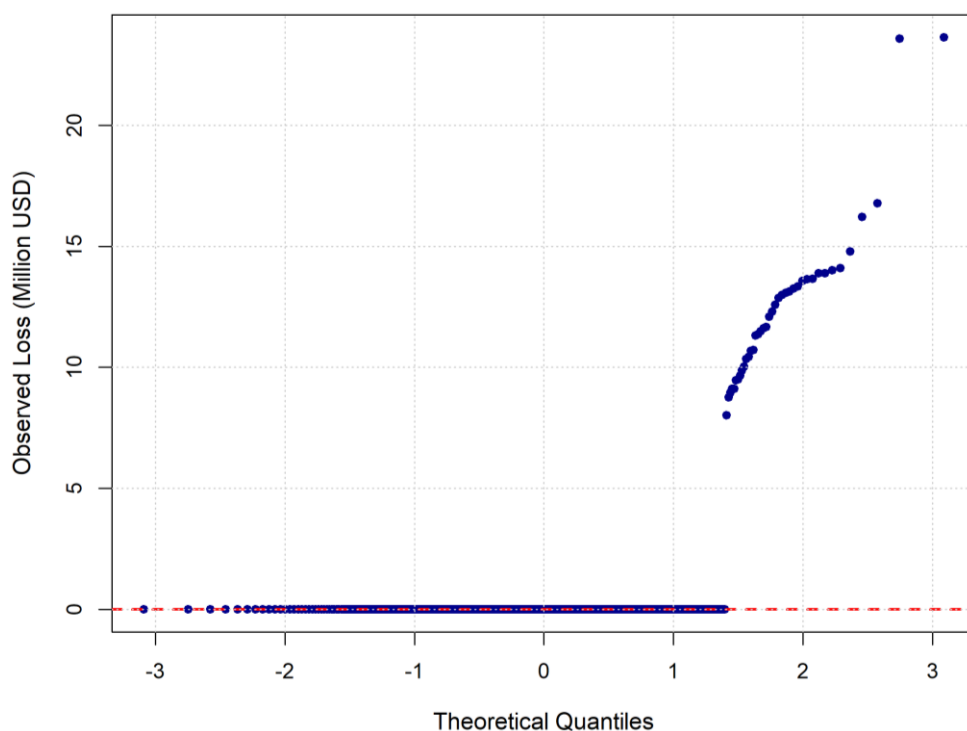
خطای استاندارد	تخمین	پارامتر	توزیع
۰.۱۸	۱.۴۲	میانگین لگاریتمی (μ)	لگ‌نرمال ($x \leq u \leq u$)
۰.۱۲	۰.۹۵	انحراف معیار لگاریتمی (σ)	
۰.۱۵	۰.۶۸	پارامتر شکل (ξ)	GPD ($x > u > u$)

خطای استاندارد	تخمین	پارامتر	توزیع
۱.۱ میلیون دلار	۵.۲ میلیون دلار	پارامتر مقیاس (β)	
-	۰.۰۸	$\phi = P(X > u)$	احتمال فراتر از آستانه

جدول ۲. پارامترهای تخمین زده شده مدل ترکیبی لگنرمال-پارتو (دوره پایه)

Table 2. Estimated Parameters of the Composite Lognormal-Pareto Model (Baseline Period)

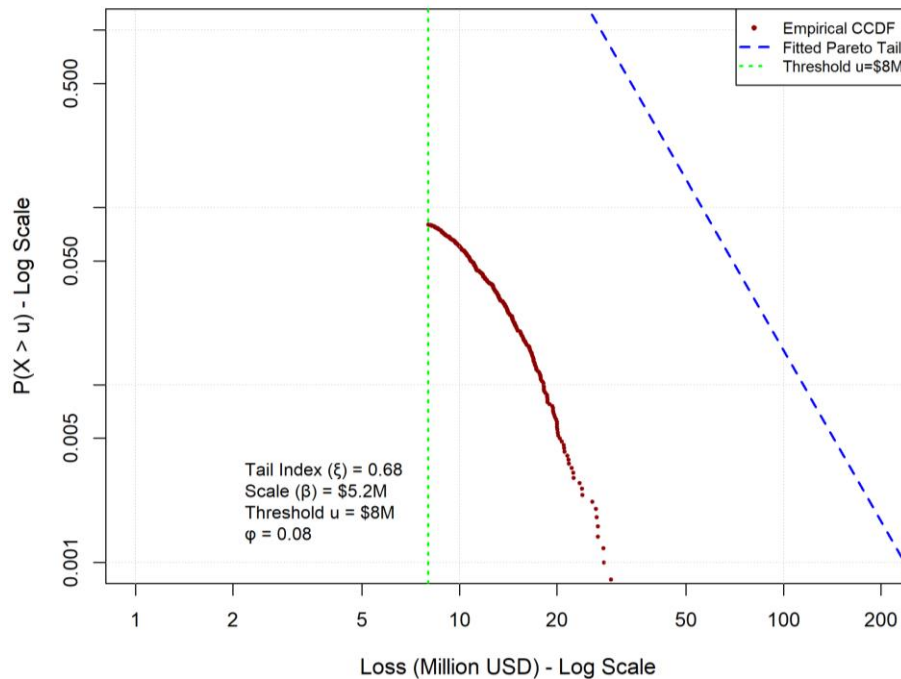
نمودار Q-Q در شکل ۱ نیز همخوانی خوب مقادیر تجربی و نظری، به ویژه در ناحیه دنباله (بالای صدک ۹۰ام) را نشان می دهد که برای قیمت گذاری لایه های قرارداد مازاد خسارت فاجعه آمیز حیاتی است.



شکل ۱. نمودار Q-Q مدل ترکیبی لگنرمال-پارتو

Figure 1. Q-Q Plot of the Composite Lognormal-GPD Model

برای درک رفتار دنباله سنگین توزیع، تابع توزیع تکمیلی در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی رسم شد (شکل ۲) خطی بودن نسبی بخش انتهایی نمودار در این مقیاس، تاییدی بر رفتار شبه-پارتو (سنگین دم) خسارت های بزرگ است. این مشاهده مطابق با نظریه ارزش فرین و ضرورت استفاده از توزیع پارتو تعمیم یافته برای مدل سازی این بخش از داده ها می باشد.



شکل ۲. نمودار تابع توزیع تجمعی تکمیلی (CCDF) در مقیاس لگاریتمی-لگاریتمی برای تحلیل دنباله سنگین توزیع خسارت
Figure 2. CCDF Log-Log Plot for Heavy Tail Analysis of Loss Distribution

تأثیر تغییرات اقلیمی بر پارامترهای ریسک

بر اساس خروجی مدل کوردکس-منا، میانگین تغییر نسبی شاخص بارش شدید حداکثر ۵ روزه در ایران در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۴ نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی SSP2-4.5 حدود ۱۲٪+ و تحت سناریوی SSP5-8.5 حدود ۲۴٪+ برآورد شد. این تغییرات منجر به تعدیل پارامتر مقیاس از توزیع پارتو تعمیم‌یافته گردید. این افزایش در پارامتر مقیاس، نشان‌دهنده انتقال توزیع به سمت راست و احتمال وقوع خسارت‌های بزرگ‌تر است.

نتایج شبیه‌سازی و شاخص‌های قیمت‌گذاری

نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو برای سه وضعیت در جدول ۳ خلاصه شده است. تغییرات کلیدی به شرح زیر است:

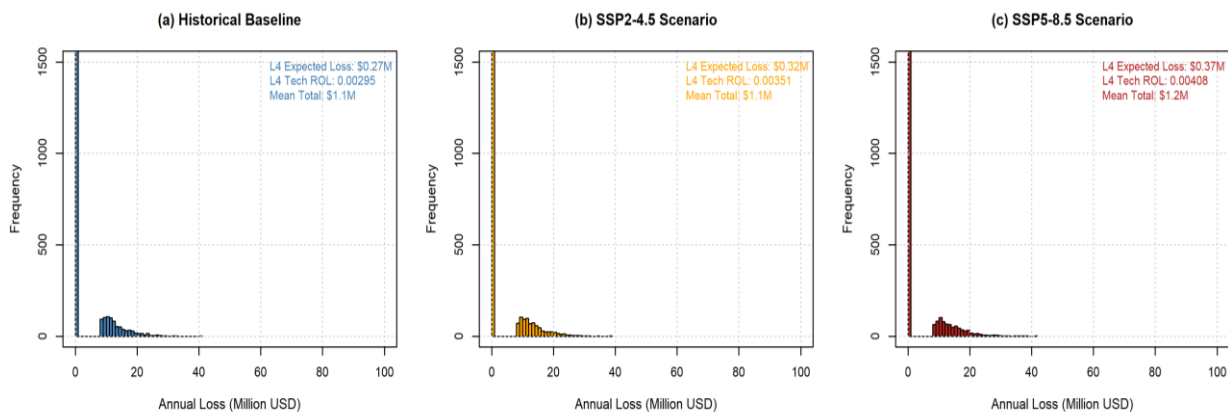
- افزایش خسارت مورد انتظار: تحت تأثیرترین لایه، L4 (بالاترین لایه) است. خسارت مورد انتظار این لایه تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به پایه تاریخی ۳۸٪ افزایش می‌یابد (از ۲۶۵,۸۶۴ به ۳۶۷,۱۹۲ دلار). این در حالی است که افزایش خسارت مورد انتظار برای لایه L1 تنها ۸٪ است. این گریبان نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات اقلیمی به طور نامتناسبی بر لایه‌های بالاتر متمرکز است.
- افزایش نرخ فنی: الگوی مشابهی برای نرخ فنی مشاهده می‌شود. نرخ فنی لایه L4 تحت سناریوی SSP5-8.5 از ۰.۰۰۲۹۵ به ۰.۰۰۴۰۸ افزایش می‌یابد که معادل ۳۸٪+ است. این افزایش برای لایه L1 تنها ۸٪+ (از ۰.۰۰۷۰۶۳ به ۰.۰۰۷۶۲۸) می‌باشد.
- تغییر در احتمالات: احتمال فعال شدن و احتمال اتمام لایه برای تمام لایه‌ها تحت سناریوهای اقلیمی افزایش می‌یابد. قابل توجه است که احتمال اتمام لایه L4 تحت سناریوی SSP5-8.5 بیش از دو برابر می‌شود (از ۰.۰۰۰۹۴ به ۰.۰۰۲۰۱). این افزایش چشمگیر در احتمال رویدادهای بسیار نادر اما فاجعه‌بار، همان نقطه کانونی ریسک اقلیمی برای بیمه‌گران اتکایی است.
- دامنه عدم قطعیت ناشی از مدل‌های اقلیمی: با اعمال تغییرات $\pm 10\%$ درصدی در شاخص Δ_{RX5day} از ۲۴٪ به محدوده ۲۱.۶٪ تا ۲۶.۴٪، حق بیمه ریسک اقلیمی لایه L4 تحت سناریوی SSP5-8.5 در محدوده ۳۵.۱٪ تا ۴۱.۵٪ قرار می‌گیرد. این دامنه عدم قطعیت باید در تصمیم‌گیری‌های قیمت‌گذاری لحاظ شود.

احتمال اتمام	احتمال فعال شدن	نرخ فنی	خسارت مورد انتظار	وضعیت	لایه
۰.۰۷۰۱	۰.۰۷۱۷	۰.۰۷۰۶۳	۳۵۳,۱۳۶	پایه تاریخی	L1
۰.۰۷۲۹	۰.۰۷۴۵	۰.۰۷۴۱۶	۳۷۰,۷۹۲	SSP2-4.5	
۰.۰۷۴۷	۰.۰۷۶۳	۰.۰۷۶۲۸	۳۸۱,۴۰۹	SSP5-8.5	
۰.۰۴۳۱	۰.۰۷۰۱	۰.۰۶۵۰۷	۹۷۶,۰۵۷	پایه تاریخی	L2
۰.۰۴۶۲	۰.۰۷۳۹	۰.۰۶۹۳۴	۱,۰۴۰,۱۱۵	SSP2-4.5	
۰.۰۴۸۴	۰.۰۷۶۴	۰.۰۷۲۳۱	۱,۰۸۴,۶۷۰	SSP5-8.5	
۰.۰۰۷۲	۰.۰۷۰۰	۰.۰۲۳۱۱	۸۰۸,۶۸۹	پایه تاریخی	L3
۰.۰۰۸۵	۰.۰۷۳۸	۰.۰۲۵۷۵	۹۰۱,۲۲۴	SSP2-4.5	
۰.۰۰۹۴	۰.۰۷۶۳	۰.۰۲۷۷۱	۹۶۹,۸۸۱	SSP5-8.5	
۰.۰۰۰۹	۰.۰۰۹۰	۰.۰۰۲۹۵	۲۶۵,۸۶۴	پایه تاریخی	L4
۰.۰۰۱۴	۰.۰۱۰۵	۰.۰۰۳۵۱	۳۱۵,۵۵۰	SSP2-4.5	
۰.۰۰۲۰	۰.۰۱۱۹	۰.۰۰۴۰۸	۳۶۷,۱۹۲	SSP5-8.5	

جدول ۳. خلاصه شاخص‌های قیمت‌گذاری لایه‌های قرارداد مازاد خسارت فاجعه‌آمیز تحت سه وضعیت اقلیمی

Table 3. Summary of Pricing Indicators for Catastrophe Excess of Loss Reinsurance Layers Under Three Climate Scenarios

برای تجسم تأثیر تغییرات اقلیمی بر توزیع کلی ریسک، هیستوگرام خسارت کل سالانه تحت سه وضعیت در شکل ۳ رسم شده است. واضح است که تحت سناریوهای اقلیمی، نه تنها دم توزیع کشیده‌تر می‌شود، بلکه کل توزیع به سمت مقادیر بالاتر جابجا می‌گردد.



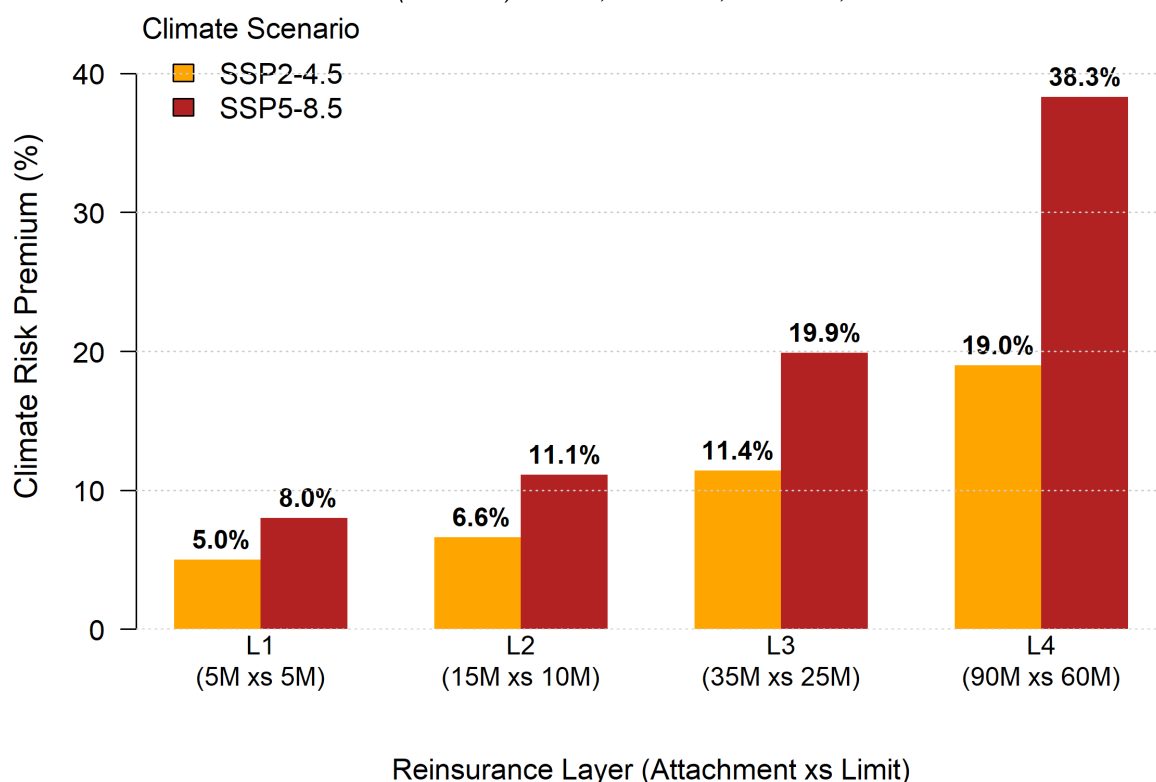
شکل ۳. توزیع خسارت کل سالانه تحت سه سناریوی اقلیمی

Figure 3. Distribution of Annual Flood Losses Under Three Climate Scenarios

برآورد حق بیمه ریسک اقلیمی

حق بیمه ریسک اقلیمی در اینجا به عنوان درصد افزایش در نرخ فنی هر لایه تحت یک سناریوی اقلیمی آینده نسبت به سناریوی پایه تاریخی تعریف می شود. نتایج محاسبه حق بیمه ریسک اقلیمی در شکل ۴ به صورت گرافیکی نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، حق بیمه ریسک اقلیمی برای لایه L4 تحت سناریوی SSP5-8.5 به حدود ۳۸٪ می رسد، در حالی که برای لایه L1 این مقدار تنها ۸٪ است. این گرادیان صعودی، پیامد مهمی برای بازار اتکا دارد: قیمت گذاری لایه های بالاتر، که هم اکنون نیز از عدم قطعیت بیشتری برخوردارند، در آینده نیاز به بارگذاری ریسک بسیار بالاتری برای پوشش عدم قطعیت اقلیمی خواهند داشت.

CRP (SSP5-8.5): L1=8%, L2=11.1%, L3=19.9%, L4=38.3%



شکل ۴. نمودار حق بیمه ریسک اقلیمی

Figure 4. Climate Risk Premium

تحلیل حساسیت نسبت به فرض نسبت بیمه پذیری

برای ارزیابی پایداری نتایج نسبت به فرض نسبت بیمه پذیری ۲۰٪، این نسبت در سه سطح جایگزین ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه مقادیر مطلق نرخ های فنی با افزایش نسبت بیمه پذیری به طور خطی افزایش می یابند، اما حق بیمه ریسک اقلیمی تغییر معناداری نمی کند. جدول ۴ نتایج این تحلیل حساسیت را برای لایه L4 تحت سناریوی SSP5-8.5 نشان می دهد:

نسبت بیمه پذیری	حق بیمه ریسک اقلیمی لایه L4
۱۰٪	۳۷.۸٪
۱۵٪	۳۸.۱٪

٪۳۸.۳	(پایه) ٪۲۰
٪۳۸.۵	٪۲۵

جدول ۴. تحلیل حساسیت حق بیمه ریسک اقلیمی (CRP) لایه L4 نسبت به تغییرات نسبت بیمه‌پذیری تحت سناریوی SSP5-8.5

Table 4. Sensitivity Analysis of Climate Risk Premium (CRP) for Layer L4 to Changes in Insurance Penetration Ratio under SSP5-8.5 Scenario

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تغییر نسبت بیمه‌پذیری از ۱۰٪ به ۲۵٪، حق بیمه ریسک اقلیمی لایه L4 را تنها حدود ۰.۷ درصد تغییر می‌دهد. این امر نشان‌دهنده مقاوم بودن نتیجه اصلی مقاله نسبت به انتخاب این فرض است.

یافته‌های این تحقیق چندین نکته کلیدی را روشن می‌سازد که پیامدهای مهمی برای نظریه و عمل در حوزه قیمت‌گذاری بیمه اتکایی فاجعه‌آمیز دارد.

تفسیر یافته‌های کلیدی در پرتو ادبیات موجود

نخست، تأیید برازش مناسب مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو برای داده‌های خسارت سیل ایران، یافته‌های پیشین پژوهشگرانی مانند اسکولنیک (Scolnik, 2007) و رینکنس و همکاران (Reynkens et al., 2017) را در بافتی جدید تأیید می‌کند. برتری این مدل در شبیه‌سازی همزمان بدنه و دم توزیع، آن را به ویژه برای بازارهایی با داده‌های محدود اما رویدادهای فرین پرتکرار (مانند ایران) به یک ابزار ضروری تبدیل می‌کند. دوم، شناسایی گرادیان صعودی حق بیمه ریسک اقلیمی از لایه‌های پایین به بالا، یافته‌ای نوآورانه و با اهمیت عملیاتی بالا است. این یافته با منطق نظریه ارزش فرین همسو است: لایه‌های بالاتر صرفاً به رویدادهای فرین وابسته‌اند و هرگونه تغییر در دم توزیع (که مستقیماً تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است) تأثیر نامتناسبی بر آنها می‌گذارد (Embrechts et al., 2013). این نتیجه، هشدار مک‌نیل و همکاران (McNeil et al., 2015) در مورد کم‌برآوردی ریسک توسط مدل‌های ایستا را به صورت کمی و ملموس نشان می‌دهد.

دلالت‌ها برای دینفعان بازار بیمه ایران

برای بیمه‌گران مستقیم در ایران، این نتایج بر لزوم بازنگری در مدل‌های داخلی قیمت‌گذاری و اندوخته‌گیری برای ریسک سیل تأکید دارد. افزایش ۸ تا ۳۸ درصدی در نرخ فنی لایه‌های اتکایی، به معنای افزایش قابل توجه هزینه انتقال ریسک به بازار بین‌المللی است. این امر می‌تواند بر قیمت نهایی بیمه‌نامه‌های سیل تأثیر بگذارد و لزوم سرمایه‌گذاری در ابزارهای کاهش ریسک (مانند مدیریت سیلاب) و توسعه پوشش‌های دولتی-خصوصی را پررنگ‌تر کند. برای بیمه‌گران اتکایی بین‌المللی، این مطالعه یک چارچوب شفاف برای ارزیابی ریسک سیل در ایران تحت سناریوهای اقلیمی مختلف ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای مذاکرات قیمت‌گذاری قراردادهای باشد. همچنین، تفاوت فاحش در حق بیمه ریسک اقلیمی بین لایه‌ها نشان می‌دهد که استراتژی سبد ریسک باید بازبینی شود؛ ممکن است نگهداری لایه‌های پایین‌تر از نظر ریسک-بازده جذاب‌تر شود، در حالی که برای لایه‌های بالاتر نیاز به سرمایه بیشتر یا استفاده از ابزارهای بازار سرمایه (مانند اوراق فاجعه) احساس شود.

محدودیت‌های تحقیق

این مطالعه با محدودیت‌هایی همراه است که مسیرهایی برای پژوهش‌های آینده می‌گشاید. نخست، به دلیل نبود داده دقیق خسارت بیمه‌پذیر، از یک نسبت بیمه‌پذیری ثابت و فرضی استفاده شد. در واقعیت، این نسبت می‌تواند در طول زمان و بین مناطق مختلف متغیر باشد. دوم، چارچوب ارائه‌شده تنها خطر سیل را در نظر گرفته است. یک مدل جامع‌تر باید مخاطرات دیگر (مانند زلزله) و وابستگی‌های احتمالی بین آنها را نیز شامل شود. سوم، پیوند بین تغییر در شاخص اقلیمی و پارامترهای مدل خسار به صورت خطی و ساده در نظر گرفته شد. در حالی که این یک فرض استاندارد در مطالعات اولیه است، مدل‌سازی رابطه غیرخطی و مبتنی بر توابع آسیب‌پذیری گام بعدی پیشرفت این چارچوب خواهد بود. چهارم، تحلیل تنها بر دو سناریوی میانی و پرتأثیر (SSP) متمرکز بود و دامنه کامل عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی را پوشش نمی‌دهد.

در مقایسه با مطالعات مشابه که تأثیر اقلیم را بر خطر سیل در اروپا یا آمریکای شمالی بررسی کرده‌اند (به عنوان مثال، مطالعاتی که افزایش ۳۰-۱۰ درصدی در خسارت مورد انتظار سیل تا اواسط قرن را پیش‌بینی می‌کنند)، یافته افزایش ۳۸ درصدی خسارت مورد انتظار لایه بالا (L4) برای ایران تحت بدبینانه‌ترین سناریو، در همان بازه قرار می‌گیرد اما در کران بالایی آن است (Bouwer, 2013). این می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاتر

زیرساخت‌ها و عدم تطابق کافی در ایران باشد. از سوی دیگر، تمرکز این مطالعه بر شاخص‌های قیمت‌گذاری اتکایی به جای صرفاً شاخص‌های خطر فیزیکی، آن را از بسیاری از مطالعات موجود متمایز و کاربردی‌تر می‌سازد.

جمع‌بندی و پیشنهادها

این پژوهش با هدف طراحی و ارزیابی یک چارچوب قیمت‌گذاری اکچوئری اقلیم‌آگاه برای قرارداد بیمه اتکایی فاجعه‌آمیز، با تمرکز بر ریسک سیل در ایران انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی نه تنها سطح ریسک را افزایش می‌دهد، بلکه ساختار آن را نیز به صورت غیرخطی تغییر می‌دهد؛ به گونه‌ای که اثر آن در لایه‌های مختلف اتکایی یکسان نیست. استفاده از مدل ترکیبی لگ‌نرمال-پارتو این امکان را فراهم کرد که خسارت‌های بزرگ و رفتار دنباله سنگین توزیع با دقت بیشتری برآورد شود؛ موضوعی که در قیمت‌گذاری لایه‌های مازاد خسارت اهمیت اساسی دارد. در گام بعد، با وارد کردن پیش‌بینی‌های کمی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در ساختار توزیع خسارت، اثر تغییرات اقلیمی به صورت مستقیم در نرخ فنی منعکس شد و به برآورد «حق‌بیمه ریسک اقلیمی» انجامید. بر اساس نتایج، تحت سناریوی انتشار بالای SSP5-8.5، نرخ فنی لایه نخست تنها ۸ درصد افزایش یافت؛ در حالی که همین اثر برای لایه نهایی به ۳۸ درصد رسید. این اختلاف قابل توجه نشان می‌دهد که ریسک ناشی از تغییرات اقلیمی به طور نامتناسب بر لایه‌های بالاتر و پریسک‌تر تأثیر می‌گذارد. به بیان ساده‌تر، هرچه به لایه‌های بالایی نزدیک می‌شویم، حساسیت نرخ به عدم قطعیت اقلیمی بیشتر می‌شود. در نتیجه، تکیه بر روش‌های سنتی مبتنی بر داده‌های تاریخی ایستا می‌تواند به کم‌برآوردی نظام‌مند ریسک، به ویژه در لایه‌های بالایی قراردادهای اتکایی فاجعه‌آمیز، منجر شود و تصمیمات نرخ‌گذاری و مدیریت سرمایه را با خطا مواجه سازد.

بر اساس یافته‌های این تحقیق، پیشنهادهای زیر برای ذی‌نفعان مختلف ارائه می‌شود:

- الزام یا تشویق شرکت‌های بیمه و اتکای به انجام تست استرس اقلیمی بر پرتفوی‌های فاجعه‌محور خود با استفاده از سناریوهای استاندارد شده.
- پشتیبانی از ایجاد یک بانک داده ملی یکپارچه از خسارت‌های بیمه‌پذیر بلایای طبیعی، با جزئیات جغرافیایی و علتی، برای بهبود پایه مدل‌سازی.
- گنجاندن صریح سناریوهای اقلیمی در فرآیندهای قیمت‌گذاری، خرید بیمه اتکایی و مدیریت سرمایه.
- بازنگری در استراتژی لایه‌بندی سبد ریسک فاجعه با در نظرگیری حق‌بیمه ریسک اقلیمی متفاوت برای لایه‌های مختلف.
- سرمایه‌گذاری در توسعه کفایت داده و قابلیت‌های مدل‌سازی داخلی یا همکاری با ارائه‌دهندگان مدل‌های فاجعه برای بومی‌سازی پیش‌بینی‌ها.

برای تکمیل و گسترش این تحقیق، مسیرهای پژوهشی زیر پیشنهاد می‌شود:

- افزایش دقت پیوند خطر-خسارت: جایگزینی فرض خطی ساده با توابع آسیب‌پذیری مبتنی بر مهندسی یا داده‌های خرد، که شدت یک رویداد اقلیمی (مثلاً عمق سیل) را به میزان خسارت مالی تبدیل می‌کند.
- در نظرگیری چندخطری و وابستگی‌ها: توسعه چارچوب برای شامل کردن سایر مخاطرات کلیدی ایران (به ویژه زلزله)
- تجزیه و تحلیل عدم قطعیت: انجام تحلیل حساسیت جامع‌تر برای در نظرگیری عدم قطعیت‌های موجود در خود مدل‌های اقلیمی
- کاربرد در ابزارهای مالی نوین: بررسی امکان به کارگیری خروجی چنین چارچوبی در طراحی و قیمت‌گذاری اوراق فاجعه برای ایران، به عنوان مکملی برای بیمه اتکایی سنتی.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که گذار از پارادایم ایستا به پویا در مدیریت ریسک فاجعه، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. چارچوب ارائه‌شده گامی عملی در این مسیر است و می‌تواند به افزایش تاب‌آوری مالی بخش بیمه و اقتصاد ملی در برابر پیامدهای فزاینده تغییرات اقلیمی کمک کند.

مشارکت نویسندگان

..... نگارش، کدنویسی، تحلیل و احصای مبانی نظری و پیشینه پژوهش را بر عهده داشته است. نیز مسئولیت کنترل چارچوب تدوین و رعایت استانداردهای پژوهشی و مشاوره آماری را عهده دار بوده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم مقاله که با پیشنهادهای ارزشمند خود باعث بهبود و ارتقای محتوای مقاله شدند، کمال تقدیر و تشکر را دارند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در مورد انتشار پژوهش ثبت شده وجود ندارد. علاوه بر این، موارد اخلاقی از جمله سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، رفتار نادرست، جعل و/یا جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر و همچنین، سیاست مجله در قبال استفاده از هوش مصنوعی از سوی نویسندگان رعایت شده است.

منابع

بیمه مرکزی جمهوری اسلامی ایران (۱۴۰۳). *سالنامه آماری بیمه مرکزی جمهوری اسلامی ایران سال ۱۴۰۳*.
https://centinsur.ir/_douranportal/documents/2277/salnameh403.pdf

Bouwer, L. M. (2013). Projections of future extreme weather losses under changes in climate and exposure. *Risk Analysis*, 33(5), 915–930. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01880.x>

Central Insurance of the Islamic Republic of Iran. (2024). *Statistical yearbook of the insurance industry 2024*. https://centinsur.ir/_douranportal/documents/2277/salnameh403.pdf [In Persian].

Cochrane, J. H. (2005). *Asset pricing* (Revised ed.). Princeton University Press.
<http://www.johnhcochrane.com/research-all/asset-pricing>

Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>

CRED. (2023). *The International Disaster Database: Country profile for Iran*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain. <https://www.emdat.be>

Embrechts, P., Klüppelberg, C., & Mikosch, T. (2013). *Modelling extremal events for insurance and finance* (4th corr. print). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33483-2>

Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions – the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K.

Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Khare, S., & Roy, K. (2021). Quantifying the role of occurrence losses in catastrophe excess of loss reinsurance pricing. *Risks*, 9(3), Article 52. <https://doi.org/10.3390/risks9030052>

Kroese, D. P., Taimre, T., & Botev, Z. I. (2011). *Handbook of Monte Carlo methods*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118014967>

Kunreuther, H., Heal, G., Allen, M., Edenhofer, O., Field, C. B., & Yohe, G. (2013). Risk management and climate change. *Nature Climate Change*, 3(5), 447–450. <https://doi.org/10.1038/nclimate1740>

McNeil, A. J., Frey, R., & Embrechts, P. (2015). *Quantitative risk management: Concepts, techniques and tools* (Revised ed.). Princeton University Press. <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691166278/quantitative-risk-management>

Møller, T., & Steffensen, M. (2007). *Market-valuation methods in life and pension insurance*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511543474>

OCHA. (2019, April 9). *Islamic Republic of Iran: Situation overview: Floods* (As of 9 April 2019). United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. <https://www.unocha.org/publications/report/iran-islamic-republic/islamic-republic-iran-situation-overview-floods-9-april-2019>

Reynkens, T., Verbelen, R., Beirlant, J., & Antonio, K. (2017). Modelling censored losses using splicing: A global fit strategy with mixed Erlang and extreme value distributions. *Insurance: Mathematics and Economics*, 77, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2017.08.005>

Scollnik, D. P. M. (2007). On composite lognormal–Pareto models. *Scandinavian Actuarial Journal*, 2007(1), 20–33. <https://doi.org/10.1080/03461230601110447>

Spice, M. (2025). *Reinsurance (M97) Study Text*. CII: London. <https://www.cii.co.uk/learning/qualifications/unit-reinsurance-m97/?srsltid=AfmBOoolrQFEJowEVaa0HGcLyW7mxoYIKze4nGGSLj3TyVnjGTGK27Vd>

Wang, S. S. (2000). A class of distortion operators for pricing financial and insurance risks. *Journal of Risk and Insurance*, 67(1), 15–36. <https://doi.org/10.2307/253675>

Werner, G., & Modlin, C. (2016). *Basic ratemaking* (5th ed.). Casualty Actuarial Society. <https://www.casact.org/publications/basic-ratemaking>

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in extreme climate indices in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 643–660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03562-8>