مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال هفتم، شماره ۸۰، اسفند ۱۴۰۴
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

تحلیل ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی در مواجهه با امواج ناشی از تغییرات اقلیمی

رضا حسنی[۱]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده

سازه‌های دریایی از مهم‌ترین زیرساخت‌های راهبردی در توسعه اقتصادی، حمل‌ونقل، استخراج منابع انرژی، پشتیبانی از صنایع فراساحلی و حفاظت از نواحی ساحلی به شمار می‌آیند. این سازه‌ها شامل سکوهای ثابت و شناور، اسکله‌ها، موج‌شکن‌ها، پایه‌های توربین‌های بادی دریایی، خطوط لوله و کابل‌های زیردریایی، سامانه‌های بندری و سایر تأسیسات ساحلی و فراساحلی هستند که همواره تحت اثر بارهای پیچیده محیطی قرار دارند. در میان این بارها، امواج دریا یکی از اصلی‌ترین عوامل ایجاد ارتعاش، خستگی، تغییرشکل و در نهایت ناپایداری سازه محسوب می‌شوند. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی با اثرگذاری بر سطح آب دریا، شدت و الگوی وقوع طوفان‌ها، مشخصات طیفی امواج، تداوم رخدادهای حدی و تغییر رژیم باد و جریان، شرایط بهره‌برداری و ایمنی سازه‌های دریایی را با عدم‌قطعیت‌های جدیدی مواجه کرده است. از این‌رو، تحلیل ارتعاشات و ارزیابی پایداری سازه‌های دریایی در شرایط اقلیمی نوظهور، به یکی از محورهای اساسی در مهندسی دریا و سازه‌های ساحلی تبدیل شده است. هدف این مقاله، بررسی جامع مبانی نظری و کاربردی تحلیل ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی در مواجهه با امواج متأثر از تغییرات اقلیمی است. مقاله با رویکرد توصیفی ـ تحلیلی و بر پایه مرور منابع معتبر داخلی و خارجی تدوین شده است. در این راستا، ابتدا مفاهیم بنیادی مرتبط با دینامیک سازه‌های دریایی، انواع بارگذاری موجی، رفتار ارتعاشی سازه‌ها و شاخص‌های پایداری تشریح می‌شود. سپس اثر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های امواج، بارهای دینامیکی و پاسخ سازه‌ای تحلیل می‌گردد. در ادامه، روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی برای ارزیابی ارتعاش و پایداری سازه‌های دریایی بررسی شده و کاربرد آن‌ها در انواع سازه‌های فراساحلی و ساحلی مورد بحث قرار می‌گیرد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی از طریق افزایش احتمال رخداد امواج حدی، جابه‌جایی در مشخصات طیف انرژی موج، افزایش هم‌زمانی بارهای محیطی و تشدید شرایط بهره‌برداری، می‌تواند دامنه ارتعاش، احتمال وقوع رزونانس، آسیب خستگی، کمانش اعضا، ناپایداری هندسی و کاهش قابلیت اطمینان سازه‌های دریایی را افزایش دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تحلیل‌های مبتنی بر شرایط ایستای اقلیمی گذشته، دیگر برای طراحی و ارزیابی بلندمدت بسیاری از سازه‌های دریایی کفایت ندارند و لازم است رویکردهای مبتنی بر طراحی تاب‌آور، تحلیل احتمالاتی، سناریوهای اقلیمی، پایش سلامت سازه و مدل‌سازی چندفیزیکی مورد توجه قرار گیرند. در نهایت، مقاله نتیجه می‌گیرد که دستیابی به ایمنی و پایداری پایدار در سازه‌های دریایی مستلزم بازنگری در مبانی طراحی، توسعه استانداردها و ادغام دانش دینامیک سازه، مهندسی امواج، اقلیم‌شناسی و مدیریت ریسک است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، سازه‌های دریایی، ارتعاشات سازه‌ای، پایداری دینامیکی، اندرکنش سازه و سیال

۱. مقدمه

سازه‌های دریایی به دلیل قرارگیری در محیطی بسیار متغیر، خورنده و پرانرژی، در مقایسه با بسیاری از سازه‌های خشکی، با شرایط طراحی و بهره‌برداری پیچیده‌تری روبه‌رو هستند. این سازه‌ها باید در برابر بارهای ناشی از امواج، باد، جریان، زلزله، ضربه شناورها، خوردگی، خستگی، رسوب‌گذاری و فرسایش عملکرد مطمئن و مداوم داشته باشند. در این میان، بارهای موجی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تحریک دینامیکی، نقشی تعیین‌کننده در رفتار ارتعاشی و پایداری کلی و موضعی سازه‌های دریایی دارند. اثر این بارها می‌تواند به‌صورت نوسانات تناوبی، تحریک‌های تصادفی، پاسخ‌های غیرخطی، خستگی انباشته و حتی ناپایداری پیشرونده بروز یابد. از این رو، مطالعه ارتعاشات سازه‌های دریایی صرفاً یک موضوع تحلیلی محدود نیست، بلکه مستقیماً با ایمنی، دوام، هزینه‌های نگهداری و قابلیت بهره‌برداری آن‌ها پیوند دارد.

در گذشته، بسیاری از روش‌های طراحی سازه‌های دریایی بر مبنای فرض ایستایی اقلیم، استفاده از داده‌های تاریخی و الگوهای آماری کلاسیک توسعه یافته‌اند. اما در دهه‌های اخیر، شواهد علمی گسترده نشان داده است که تغییرات اقلیمی موجب تغییر در الگوهای باد، امواج، طوفان‌ها و سطح متوسط آب دریا شده و خواهد شد. گزارش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که افزایش دمای جهانی می‌تواند شدت برخی رخدادهای حدی دریایی را تشدید کرده، دوره بازگشت امواج شدید را دگرگون سازد و بر توزیع مکانی و زمانی انرژی موج اثر بگذارد (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). این تحولات به‌طور مستقیم و غیرمستقیم مشخصات بارگذاری وارد بر سازه‌های دریایی را تغییر می‌دهد و در نتیجه، پاسخ دینامیکی و پایداری آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

از سوی دیگر، توسعه روزافزون زیرساخت‌های فراساحلی، به‌ویژه در حوزه انرژی، حمل‌ونقل و حفاظت ساحلی، حساسیت این مسئله را بیشتر کرده است. سکوهای نفت و گاز، توربین‌های بادی دریایی، پایانه‌های شناور، سامانه‌های آب‌شیرین‌کن ساحلی، خطوط انتقال انرژی و بنادر بزرگ، همگی نیازمند تحلیل دقیق‌تری از مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم هستند. در چنین شرایطی، دیگر نمی‌توان تنها به محاسبات کلاسیک بارگذاری طراحی بسنده کرد، بلکه باید پاسخ ارتعاشی سازه‌ها در چارچوب سناریوهای اقلیمی، عدم‌قطعیت‌های آینده و رفتار غیرخطی سیستم بررسی شود.

اهمیت این موضوع در کشورهایی مانند ایران نیز دوچندان است. ایران با دسترسی به آب‌های خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر، دارای مجموعه‌ای از سازه‌های ساحلی و فراساحلی مهم است که نقش کلیدی در اقتصاد ملی دارند. حضور سکوهای نفتی و گازی در خلیج فارس، توسعه بنادر تجاری و صنعتی، گسترش سازه‌های حفاظتی ساحلی و نیاز به تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های دریایی، ضرورت توجه به اثرات تغییر اقلیم بر رفتار دینامیکی این سازه‌ها را آشکار می‌سازد. در واقع، تغییر در الگوی امواج، افزایش فراوانی طوفان‌های شدید دریایی و نوسانات تراز آب می‌تواند آسیب‌پذیری این تأسیسات را افزایش دهد و هزینه‌های تعمیر، توقف بهره‌برداری و مخاطرات ایمنی را تشدید کند.

بر این اساس، مقاله حاضر می‌کوشد با رویکردی جامع، رابطه میان تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های امواج، ارتعاشات سازه‌ای و پایداری سازه‌های دریایی را بررسی کند و تصویری تحلیلی از وضعیت موجود و نیازهای آینده در این حوزه ارائه دهد.

۲. بیان مسئله

تحلیل و طراحی سازه‌های دریایی از دیرباز بر پایه شناخت دقیق کنش متقابل میان سازه و محیط دریایی استوار بوده است. امواج دریا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی، بارهایی پیچیده و اغلب تصادفی بر سازه وارد می‌کنند که می‌توانند به بروز

ارتعاشات شدید، خستگی، آسیب در اتصالات، از دست رفتن پایداری و کاهش عمر مفید سازه منجر شوند. مسئله زمانی پیچیده‌تر می‌شود که در نظر بگیریم ویژگی‌های امواج، همچون ارتفاع، پریود، جهت انتشار، چگالی طیف انرژی و همبستگی آن‌ها با باد و جریان، تحت تأثیر روندهای اقلیمی در حال تغییر هستند. در چنین شرایطی، مدل‌هایی که مبتنی بر داده‌های گذشته و فرض پایایی شرایط محیطی تدوین شده‌اند، ممکن است در پیش‌بینی عملکرد آتی سازه‌ها با خطا همراه باشند.

در سازه‌های دریایی، ارتعاشات می‌توانند ناشی از نیروهای دوره‌ای یا تصادفی امواج باشند و در صورت نزدیک شدن فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سازه، پدیده رزونانس رخ دهد. این مسئله در سکوهای پایه‌ثابت، برج‌های باریک، پایه‌های توربین بادی، خطوط لوله معلق و اسکله‌های شمعی اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر آن، پدیده‌های غیرخطی نظیر اندرکنش موج ـ سازه، اثرات شاره ـ سازه، تغییرات سختی ناشی از خوردگی یا آسیب، و پاسخ‌های بزرگ‌دامنه می‌توانند رفتار واقعی سیستم را از مدل‌های خطی ساده فراتر ببرند. بنابراین، مسئله اصلی آن است که چگونه می‌توان رفتار ارتعاشی و پایداری سازه‌های دریایی را در مواجهه با امواجی که خود تحت تأثیر تغییرات اقلیمی دستخوش تحول شده‌اند، به‌گونه‌ای قابل اعتماد تحلیل و پیش‌بینی کرد.

از بعد پایداری نیز مسئله ابعاد متعددی دارد. پایداری در سازه‌های دریایی تنها به معنای عدم واژگونی یا شکست کلی نیست، بلکه شامل پایداری هندسی، پایداری دینامیکی، پایداری در برابر خستگی، پایداری بستر و پی، و پایداری در برابر فرسایش و آب‌شستگی نیز می‌شود. افزایش شدت امواج و بالا آمدن سطح دریا می‌تواند شرایط تکیه‌گاهی سازه را تغییر داده، آب‌شستگی اطراف شمع‌ها و پایه‌ها را تشدید کند و به کاهش سختی مؤثر سازه بینجامد. همچنین وقوع بارهای ترکیبی ناشی از موج، باد و جریان می‌تواند حاشیه ایمنی سازه را کاهش دهد. این موضوع به‌ویژه برای سازه‌هایی که در گذشته با ضرایب اطمینان محدود یا بر اساس استانداردهای قدیمی طراحی شده‌اند، بسیار مهم است.

در نتیجه، مسئله تحقیق حاضر بر این محور استوار است که تغییرات اقلیمی چگونه از طریق تغییر مشخصات امواج دریایی، پاسخ ارتعاشی و پایداری انواع سازه‌های دریایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چه رویکردهای تحلیلی و طراحی برای مدیریت این مخاطره مناسب‌تر هستند.

۳. اهمیت و ضرورت تحقیق

اهمیت این موضوع را می‌توان از چند منظر فنی، اقتصادی، ایمنی و محیط‌زیستی بررسی کرد. از منظر فنی، سازه‌های دریایی در زمره سیستم‌هایی قرار دارند که خرابی در آن‌ها می‌تواند پیامدهای زنجیره‌ای گسترده داشته باشد. برای نمونه، آسیب در یک سکوی فراساحلی ممکن است نه‌تنها تولید انرژی را مختل کند، بلکه خطر نشت آلاینده‌ها و بروز بحران‌های ایمنی را نیز به همراه داشته باشد. به همین دلیل، شناخت دقیق شرایط بارگذاری آینده و رفتار ارتعاشی سازه در برابر آن، یکی از پیش‌نیازهای اساسی طراحی و نگهداری است.

از منظر اقتصادی، هزینه ساخت، تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌های دریایی بسیار بالا است. اتخاذ تصمیمات نادرست در مرحله طراحی یا کم‌برآورد کردن بارهای محیطی می‌تواند منجر به هزینه‌های سنگین ناشی از خرابی، توقف بهره‌برداری، تعمیرات اضطراری و کاهش عمر سرویس‌دهی شود. در مقابل، طراحی بیش از حد محافظه‌کارانه نیز موجب افزایش غیرضروری هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد شد. از این رو، تحلیل دقیق ارتعاش و پایداری در بستر تغییرات اقلیمی، ابزاری برای دستیابی به تعادل میان ایمنی و صرفه اقتصادی است.

از منظر ایمنی، افزایش فراوانی رخدادهای حدی دریایی می‌تواند جان نیروهای انسانی، تجهیزات و محیط پیرامون را تهدید کند. بسیاری از حوادث دریایی گذشته نشان داده‌اند که درک ناکافی از بارهای محیطی و ضعف در پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سازه می‌تواند عامل کلیدی شکست باشد. در شرایطی که تغییر اقلیم، الگوهای گذشته را دگرگون می‌کند، اتکا به داده‌های تاریخی بدون در نظر گرفتن سناریوهای آینده، خطرناک خواهد بود.

از منظر محیط‌زیستی نیز پایداری سازه‌های دریایی اهمیت زیادی دارد. تخریب سازه‌های ساحلی و فراساحلی می‌تواند موجب آلودگی دریا، تخریب زیستگاه‌های ساحلی، تغییر الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش بیشتر شود. بنابراین، ارتقای تاب‌آوری این سازه‌ها بخشی از راهبرد توسعه پایدار نواحی ساحلی و دریایی محسوب می‌شود.

علاوه بر این، در بسیاری از کشورها و از جمله ایران، نیاز به بازبینی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی دریایی در پرتو تغییرات اقلیمی به‌طور جدی مطرح شده است. این امر ضرورت انجام مطالعات مروری و تحلیلی جامع را برای جمع‌بندی دانش موجود و شناسایی خلأهای پژوهشی دوچندان می‌کند.

۴. اهداف تحقیق

۴ـ۱. هدف اصلی

بررسی جامع اثر امواج ناشی از تغییرات اقلیمی بر ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی و تبیین روش‌های مناسب برای تحلیل و ارزیابی این اثرات.

۴ـ۲. اهداف فرعی

۱. تبیین مفاهیم بنیادی مرتبط با دینامیک و پایداری سازه‌های دریایی.
۲. بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر مشخصات امواج و بارهای محیطی وارد بر سازه‌ها.
۳. تحلیل سازوکارهای ایجاد ارتعاش، رزونانس، خستگی و ناپایداری در سازه‌های دریایی.
٤. معرفی روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی ارزیابی پاسخ سازه‌ای.
٥. بررسی کاربرد این روش‌ها در انواع سازه‌های ساحلی و فراساحلی.
٦. ارائه جمع‌بندی از چالش‌ها، خلأها و راهبردهای آینده برای طراحی تاب‌آور.

۵. سؤالات تحقیق

۱. تغییرات اقلیمی از چه مسیرهایی ویژگی‌های امواج و بارگذاری وارد بر سازه‌های دریایی را تغییر می‌دهد؟
۲. مهم‌ترین سازوکارهای ارتعاش و ناپایداری در سازه‌های دریایی تحت اثر امواج کدام‌اند؟
۳. چه روش‌هایی برای تحلیل پاسخ دینامیکی و پایداری سازه‌های دریایی در شرایط اقلیمی متغیر مناسب‌تر هستند؟
٤. محدودیت‌ها و چالش‌های اصلی در مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد سازه‌های دریایی چیست؟
٥. چه راهبردهایی برای بهبود تاب‌آوری و قابلیت اطمینان این سازه‌ها قابل پیشنهاد است؟

۶. روش تحقیق

این مقاله از نوع مروری ـ تحلیلی است و بر پایه بررسی نظام‌مند منابع علمی داخلی و خارجی تنظیم شده است. در گردآوری مطالب، از کتاب‌های مرجع مهندسی دریا، مقالات علمی نمایه‌شده، گزارش‌های معتبر بین‌المللی، استانداردها و آیین‌نامه‌های تخصصی استفاده شده است. رویکرد مقاله بدین صورت است که نخست مفاهیم بنیادی استخراج و سازمان‌دهی شده، سپس نتایج مطالعات مختلف در حوزه اثر تغییرات اقلیمی بر امواج و پاسخ سازه‌های دریایی مقایسه و تحلیل گردیده است. در نهایت، با ترکیب یافته‌های نظری و کاربردی، چارچوبی برای جمع‌بندی وضعیت دانش و ارائه پیشنهادها تدوین شده است.

۷. مبانی نظری

۷ـ۱. سازه‌های دریایی و ویژگی‌های دینامیکی آن‌ها

سازه‌های دریایی را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته عمده سازه‌های ساحلی و سازه‌های فراساحلی تقسیم کرد. سازه‌های ساحلی شامل موج‌شکن‌ها، اسکله‌ها، دیوارهای ساحلی، پایانه‌های بندری و سامانه‌های حفاظت ساحل هستند. سازه‌های فراساحلی نیز سکوهای ثابت، سکوهای شناور، سامانه‌های تولید و انتقال انرژی، توربین‌های بادی دریایی و زیرساخت‌های مرتبط را دربرمی‌گیرند. هر یک از این سازه‌ها از منظر دینامیکی دارای ویژگی‌های خاصی هستند. برای مثال، سازه‌های شمعی و برج‌مانند معمولاً نسبت به تحریک‌های تناوبی حساس‌ترند، در حالی که سازه‌های حجیم ثقلی بیشتر تحت تأثیر نیروهای ضربه‌ای و پایداری بستر قرار می‌گیرند.

ویژگی‌های دینامیکی هر سازه تابع جرم، سختی، میرایی، شرایط تکیه‌گاهی، اندرکنش با شاره و نحوه توزیع جرم و سختی در ارتفاع یا طول آن است. فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی از مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که تعیین می‌کنند سازه در برابر امواج با چه شدتی واکنش نشان خواهد داد. چنانچه مؤلفه‌های فرکانسی بار محیطی با فرکانس‌های طبیعی سازه هم‌پوشانی یابد، دامنه پاسخ افزایش می‌یابد و خطر خستگی یا ناپایداری بیشتر می‌شود (چاکرابارتی، ۲۰۰۵).

۷ـ۲. ماهیت امواج دریا و بارگذاری موجی

امواج دریا پدیده‌ای پیچیده و اغلب تصادفی هستند که تحت اثر باد، اختلاف فشار، طوفان، زلزله و دیگر عوامل ایجاد می‌شوند. در مهندسی دریا، امواج را می‌توان به دو دسته کلی امواج منظم و نامنظم تقسیم کرد. امواج منظم برای تحلیل‌های نظری ساده‌تر کاربرد دارند، اما شرایط واقعی دریا اغلب با امواج نامنظم و طیفی توصیف می‌شود. طیف موج نشان می‌دهد انرژی موج در فرکانس‌های مختلف چگونه توزیع شده است. طیف‌های پی-ماسکوویتز و جانسواپ از مهم‌ترین مدل‌های طیفی در مهندسی موج هستند (دین و دالریمپل، ۱۹۹۱).

بارگذاری موجی بر سازه بسته به نوع سازه، ابعاد آن نسبت به طول موج، عمق آب و رژیم جریان می‌تواند به‌صورت نیروهای اینرسی، درگ، فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی، ضربه موج و نیروهای ناشی از شکست موج ظاهر شود. برای اعضای باریک، معادله موریسون یکی از روابط رایج برای برآورد نیروهای موجی است، در حالی که برای سازه‌های حجیم معمولاً از روش‌های مبتنی بر تفرق موج استفاده می‌شود (سارپکایا و آیزاکسون، ۱۹۸۱).

۷ـ۳. ارتعاشات سازه‌ای در محیط دریایی

ارتعاشات سازه‌های دریایی می‌تواند ناشی از تحریک مستقیم امواج، اثرات گردابه‌ای، ضربه امواج شکسته، حرکت شناورها، باد و اندرکنش‌های چندمنظوره باشد. پاسخ ارتعاشی ممکن است در حوزه زمان یا فرکانس تحلیل شود. در سازه‌های دریایی، ارتعاشات نه‌تنها بر راحتی و قابلیت بهره‌برداری اثر می‌گذارد، بلکه یکی از عوامل اصلی خستگی و آسیب تدریجی است. در بسیاری از سازه‌های فراساحلی، خستگی ناشی از بارهای چرخه‌ای موج، معیار طراحی تعیین‌کننده‌ای به شمار می‌آید (دی‌ان‌وی، ۲۰۱۴).

۷ـ۴. مفهوم پایداری در سازه‌های دریایی

پایداری در سازه‌های دریایی مفهومی چندبعدی است. پایداری کلی سازه به توانایی آن در حفظ وضعیت تعادل تحت بارهای محیطی اشاره دارد. پایداری موضعی به مقاومت اعضای منفرد در برابر کمانش، خمش بیش از حد یا شکست موضعی مربوط می‌شود. پایداری بستر و پی نیز در سازه‌های شمعی و ثقلی اهمیت زیادی دارد، زیرا آب‌شستگی، تغییر شکل بستر و کاهش ظرفیت باربری خاک می‌تواند عملکرد کلی سازه را مختل کند. در سکوهای شناور، پایداری هیدرواستاتیکی و دینامیکی جایگاه ویژه‌ای دارد و به توزیع شناوری، مرکز جرم و پاسخ حرکتی سازه وابسته است (فالتینسن، ۱۹۹۰).

۸. تغییرات اقلیمی و تحول در مشخصات امواج

تغییرات اقلیمی از مسیرهای مختلف بر شرایط دریایی اثر می‌گذارد. مهم‌ترین این مسیرها عبارت‌اند از: افزایش دمای آب و هوا، تغییر الگوهای باد، افزایش سطح متوسط آب دریا، تغییر شدت و مسیر طوفان‌ها و افزایش احتمال رخداد پدیده‌های حدی. هر یک از این عوامل می‌تواند بر تولید، انتشار و شکست امواج اثرگذار باشد. گزارش‌های جدید نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق اقیانوسی، ارتفاع موج‌های حدی و توان موج در حال افزایش است، هرچند این روند در همه نواحی یکسان نیست و وابسته به اقلیم منطقه‌ای است (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱).

افزایش سطح آب دریا سبب می‌شود که شرایط رسیدن موج به ساحل، الگوی شکست، فراروی و بارگذاری بر سازه‌های ساحلی تغییر کند. برای نمونه، موج‌شکن‌هایی که در گذشته دارای تاج ایمن بوده‌اند، ممکن است در آینده با نرخ بالاتری از روگذری مواجه شوند. همچنین تغییر در عمق مؤثر آب می‌تواند فرکانس‌ها و شدت بارهای وارد بر پایه‌های شمعی را تغییر دهد. از سوی دیگر، افزایش شدت طوفان‌ها می‌تواند بارهای هم‌زمان ناشی از موج، باد و جریان را تشدید کند و احتمال وقوع شرایط بحرانی را افزایش دهد (ماسل، ۲۰۱۳).

یکی دیگر از ابعاد مهم، غیرایستا شدن داده‌های محیطی است. در روش‌های سنتی طراحی، فرض می‌شود که آمار امواج در طول زمان تغییر نمی‌کند، اما تغییر اقلیم این فرض را به چالش کشیده است. در نتیجه، تحلیل‌های احتمالاتی مبتنی بر داده‌های گذشته ممکن است دیگر برآورد درستی از شرایط حدی آینده ارائه ندهند. این موضوع مستقیماً بر طراحی بر مبنای دوره بازگشت، قابلیت اطمینان و ارزیابی خطر اثر می‌گذارد.

۹. سازوکارهای اثر امواج ناشی از تغییرات اقلیمی بر ارتعاشات و پایداری

۹ـ۱. افزایش دامنه پاسخ دینامیکی

هرگونه افزایش در ارتفاع مشخصه موج، انرژی طیفی یا تداوم رخدادهای شدید می‌تواند دامنه نیروهای وارد بر سازه را افزایش دهد. این افزایش نیرو به‌طور مستقیم به افزایش تغییرمکان، سرعت و شتاب پاسخ منجر می‌شود. در سازه‌های بلند و انعطاف‌پذیر، افزایش پاسخ دینامیکی ممکن است موجب نزدیک شدن به آستانه‌های بهره‌برداری یا آسیب شود. اگر این فرایند به‌صورت مکرر رخ دهد، انباشت خستگی سرعت می‌گیرد و عمر سازه کاهش می‌یابد (چاکرابارتی، ۲۰۰۵).

۹ـ۲. تغییر در محتوای فرکانسی بارگذاری و خطر رزونانس

تغییر در پریود غالب امواج و توزیع انرژی در طیف می‌تواند هم‌پوشانی بیشتری با فرکانس‌های طبیعی سازه ایجاد کند. این مسئله برای برج‌ها، پایه‌های باریک و سامانه‌های شناور بسیار مهم است. در چنین شرایطی، حتی اگر افزایش ارتفاع موج چندان زیاد نباشد، تغییر در محتوای فرکانسی بارگذاری می‌تواند پاسخ سازه را به‌صورت نامتناسب افزایش دهد. بنابراین ارزیابی پاسخ سازه باید فراتر از معیارهای صرفاً مبتنی بر بار حداکثر باشد و ویژگی‌های طیفی را نیز دربرگیرد.

۹ـ۳. تشدید خستگی و آسیب انباشته

در بسیاری از سازه‌های دریایی، خرابی نه در اثر یک بار حدی، بلکه در نتیجه تکرار بارهای متوسط و کوچک در طول زمان رخ می‌دهد. امواج متوالی باعث نوسانات چرخه‌ای در تنش اعضا و اتصالات می‌شوند. اگر تغییر اقلیم موجب افزایش تداوم دوره‌های دریای متلاطم یا افزایش فراوانی شرایطی با تنش چرخه‌ای بالا شود، آسیب خستگی انباشته سریع‌تر رخ خواهد داد. این مسئله در جوش‌ها، گره‌های سازه‌ای، اتصالات شمع ـ عرشه و محل‌های تمرکز تنش اهمیت زیادی دارد (دی‌ان‌وی، ۲۰۱۴).

۹ـ۴. کاهش پایداری بستر و تشدید آب‌شستگی

امواج شدیدتر و افزایش سطح آب دریا می‌تواند الگوی جریان نزدیک بستر را تغییر دهد و فرسایش موضعی اطراف شمع‌ها، پایه‌ها و دیوارهای ساحلی را تشدید کند. آب‌شستگی باعث کاهش سختی تکیه‌گاهی و طول مؤثر مدفون اعضا شده و در نتیجه فرکانس طبیعی سازه تغییر می‌کند. این تغییر ممکن است سازه را به ناحیه‌ای نزدیک‌تر به رزونانس ببرد یا حاشیه ایمنی آن را در برابر کمانش و ناپایداری کاهش دهد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که نادیده گرفتن آب‌شستگی در تحلیل دینامیکی می‌تواند منجر به کم‌برآوردی قابل توجه پاسخ سازه شود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۸).

۹ـ۵. تشدید اندرکنش چندمخاطره‌ای

در آینده اقلیمی، احتمال وقوع هم‌زمان یا متوالی بارهای شدید ناشی از موج، باد، جریان و حتی بارش‌های حدی و رواناب‌های ساحلی افزایش می‌یابد. این امر به‌ویژه در نواحی بندری و ساحلی اهمیت دارد؛ جایی که سازه نه‌تنها از دریا، بلکه از سمت خشکی نیز تحت تأثیر مخاطرات ترکیبی قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی، ارزیابی جداگانه هر بارگذاری نمی‌تواند رفتار واقعی سازه را به‌درستی بازنمایی کند و لازم است رویکردهای چندمخاطره‌ای توسعه یابد.

۱۰. روش‌های تحلیل ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی

۱۰ـ۱. روش‌های تحلیلی کلاسیک

روش‌های تحلیلی بر پایه مدل‌سازی ساده‌شده معادلات حرکت و استفاده از روابط بسته یا نیمه‌تحلیلی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها برای درک مفاهیم بنیادی، برآوردهای اولیه و تحلیل پارامتریک بسیار مفید هستند. مدل‌های تک‌درجه و چنددرجه آزادی، روش‌های مودال، تحلیل پاسخ فرکانسی و معادلات خطی‌شده موج ـ سازه از مهم‌ترین ابزارهای این حوزه‌اند. با وجود کارآمدی، این روش‌ها در مواجهه با رفتارهای غیرخطی شدید، هندسه پیچیده و شرایط مرزی متغیر محدودیت دارند.

۱۰ـ۲. روش اجزای محدود

روش اجزای محدود یکی از رایج‌ترین ابزارها برای تحلیل سازه‌های دریایی است. این روش امکان مدل‌سازی دقیق هندسه، رفتار غیرخطی مصالح، اندرکنش خاک ـ سازه و شرایط مرزی پیچیده را فراهم می‌کند. در تحلیل ارتعاشات، استخراج فرکانس‌های طبیعی، مودها، پاسخ گذرا و پاسخ طیفی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود به‌طور گسترده انجام می‌شود. همچنین در ارزیابی پایداری می‌توان از تحلیل کمانش خطی، غیرخطی و پس‌کمانش بهره گرفت. با این حال، دقت نتایج به کیفیت مدل‌سازی بارهای محیطی و پارامترهای میرایی وابسته است (باته، ۱۹۹۶).

۱۰ـ۳. دینامیک سیالات محاسباتی و اندرکنش شاره ـ سازه

برای سازه‌هایی که اثرات غیرخطی موج، شکست موج، جداشدگی جریان، گردابه‌ها و حرکت بزرگ شاره اهمیت دارد، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌های اندرکنش شاره ـ سازه ضروری است. این رویکردها می‌توانند میدان جریان و فشار را با جزئیات بالا محاسبه کنند و در نتیجه پیش‌بینی دقیق‌تری از نیروها و پاسخ سازه ارائه دهند. هرچند هزینه محاسباتی بالا و نیاز به داده‌های دقیق از چالش‌های اصلی این روش است (فالتینسن، ۱۹۹۰).

۱۰ـ۴. تحلیل احتمالاتی و قابلیت اطمینان

با توجه به ماهیت تصادفی امواج و عدم‌قطعیت‌های اقلیمی، تحلیل احتمالاتی جایگاه ویژه‌ای در ارزیابی عملکرد سازه‌های دریایی دارد. در این روش‌ها، پارامترهای محیطی و سازه‌ای به‌صورت متغیرهای تصادفی مدل می‌شوند و احتمال فراتر رفتن پاسخ از حدود مجاز محاسبه می‌شود. روش‌های مونت‌کارلو، شبیه‌سازی تصادفی، روش‌های سطح پاسخ و تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌ای از جمله ابزارهای رایج این حوزه‌اند. این رویکرد به‌ویژه برای بازبینی طراحی در دوره‌های طولانی و تحت سناریوهای اقلیمی آینده مفید است (ملچرز و بکت، ۲۰۱۸).

۱۰ـ۵. آزمایش‌های فیزیکی و پایش میدانی

آزمایش در کانال موج، حوضچه‌های دریایی و مدل‌های فیزیکی همچنان از ابزارهای ارزشمند برای بررسی رفتار سازه‌ها است. این آزمایش‌ها به‌ویژه در مطالعه شکست موج، روگذری، آب‌شستگی و پاسخ غیرخطی سازه‌های پیچیده اهمیت دارند. علاوه بر آن، پایش سلامت سازه با استفاده از حسگرهای شتاب، کرنش، جابه‌جایی و فشار، داده‌های واقعی از عملکرد سازه در شرایط بهره‌برداری فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های هوشمند پایش و تحلیل داده‌های بزرگ، افق‌های جدیدی در ارزیابی رفتار سازه‌های دریایی گشوده است (فریبا و همکاران، ۱۴۰۰).

۱۱. کاربرد تحلیل ارتعاشات و پایداری در انواع سازه‌های دریایی

۱۱ـ۱. سکوهای ثابت فراساحلی

سکوهای ثابت، به‌ویژه سکوهای جکت، از مهم‌ترین سازه‌های فراساحلی هستند که در برابر امواج، باد و جریان قرار دارند. این سازه‌ها به دلیل داشتن اعضای متعدد لوله‌ای، مستعد خستگی در اتصالات و حساس به آب‌شستگی اطراف شمع‌ها هستند. تغییرات اقلیمی می‌تواند از طریق افزایش ارتفاع امواج و تشدید طوفان‌ها، بارهای طراحی را افزایش دهد و ارزیابی مجدد آن‌ها را ضروری سازد. تحلیل مودال، تحلیل پاسخ تصادفی و ارزیابی خستگی برای این سازه‌ها اهمیت ویژه دارد.

۱۱ـ۲. سکوها و سامانه‌های شناور

سکوهای شناور، کشتی‌های تولید و ذخیره، و سامانه‌های مهارشده از نظر دینامیکی پیچیدگی زیادی دارند. حرکات شش‌درجه آزادی آن‌ها تحت اثر امواج می‌تواند با سامانه‌های مهار و تجهیزات بهره‌برداری اندرکنش داشته باشد. در اینجا، تغییر در مشخصات طیفی امواج و افزایش رخدادهای حدی می‌تواند پایداری دینامیکی، کشش مهارها و خطر برخورد تجهیزات را افزایش دهد. تحلیل هم‌زمان هیدرودینامیک، دینامیک سازه و رفتار خطوط مهار برای این سامانه‌ها ضروری است.

۱۱ـ۳. پایه‌های توربین بادی دریایی

توربین‌های بادی دریایی از نمونه‌های بارز سازه‌های حساس به ارتعاش هستند، زیرا تحت اثر هم‌زمان باد، موج و عملکرد چرخشی روتور قرار دارند. طراحی این سازه‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که فرکانس طبیعی آن‌ها از محدوده تحریک‌های اصلی فاصله داشته باشد. تغییر اقلیم از یک‌سو بر رژیم باد و از سوی دیگر بر بارهای موجی اثر می‌گذارد و بنابراین تحلیل کوپل‌شده این سامانه‌ها اهمیت زیادی دارد. افزایش آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها نیز از تهدیدهای اصلی پایداری آن‌ها است.

۱۱ـ۴. موج‌شکن‌ها و سازه‌های ساحلی

موج‌شکن‌ها، دیوارهای ساحلی و اسکله‌ها مستقیماً با امواج برخورد می‌کنند و در برابر نیروهای ضربه‌ای، روگذری، فرسایش و نشست بستر آسیب‌پذیرند. بالا آمدن سطح دریا و افزایش امواج حدی می‌تواند نسبت آزاد سازه را کاهش داده و عملکرد حفاظتی آن را تضعیف کند. در این سازه‌ها، پایداری در برابر لغزش، واژگونی، نشست و تخریب اجزای زرهی اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین در موج‌شکن‌های قائم و مختلط، پاسخ ارتعاشی موضعی برخی اجزا نیز باید بررسی شود.

۱۱ـ۵. اسکله‌های شمعی و بنادر

اسکله‌های شمعی در برابر امواج، ضربه کشتی، بار جرثقیل‌ها و تغییرات بستر قرار دارند. این سازه‌ها اغلب دارای دوره تناوبی هستند که ممکن است به تحریک‌های موجی حساس باشد. تغییر شرایط اقلیمی و افزایش تراز آب می‌تواند الگوی بارگذاری و پاسخ دینامیکی آن‌ها را تغییر دهد. برای بنادر، علاوه بر سازه اصلی، بررسی ارتعاشات حوضچه، تشدید نوسانات طول‌موج بلند و عملکرد تجهیزات بندری نیز اهمیت پیدا می‌کند.

جدول ۱. اثرات اصلی تغییرات اقلیمی بر پاسخ سازه‌های دریایی

مؤلفه اقلیمی	تغییر محتمل	اثر بر امواج و محیط دریایی	پیامد برای ارتعاش و پایداری سازه
افزایش سطح آب دریا	بالا آمدن تراز متوسط آب	تغییر عمق مؤثر، افزایش روگذری، تغییر شکست موج	افزایش بارگذاری ساحلی، تغییر شرایط تکیه‌گاهی، تشدید آب‌شستگی
تغییر رژیم باد	تغییر شدت و جهت باد	تغییر طیف موج و انرژی امواج	تغییر محتوای فرکانسی بارگذاری و افزایش خطر رزونانس
افزایش طوفان‌های شدید	افزایش رخدادهای حدی	افزایش امواج بزرگ و بارهای ترکیبی	افزایش پاسخ دینامیکی، خستگی و احتمال شکست
تغییرات اقلیم منطقه‌ای	ناایستایی در داده‌های محیطی	تغییر آمار بلندمدت امواج	کاهش اعتبار روش‌های طراحی مبتنی بر گذشته
تشدید فرسایش ساحلی	ناپایداری بستر	افزایش فرسایش و آب‌شستگی	کاهش پایداری پی و تغییر فرکانس طبیعی

جدول ۲. مقایسه روش‌های تحلیل ارتعاش و پایداری

روش	مزیت اصلی	محدودیت اصلی	کاربرد مناسب
روش‌های تحلیلی	سادگی و درک مفهومی	دقت کمتر در شرایط پیچیده	برآورد اولیه و مطالعات پارامتریک
اجزای محدود	مدل‌سازی دقیق سازه	وابستگی به کیفیت داده و مدل	تحلیل مودال، کمانش، پاسخ گذرا
دینامیک سیالات محاسباتی	نمایش دقیق جریان و فشار	هزینه محاسباتی بالا	شکست موج، اندرکنش شاره ـ سازه
تحلیل احتمالاتی	لحاظ عدم‌قطعیت	پیچیدگی آماری	ارزیابی قابلیت اطمینان و طراحی آینده‌نگر
آزمایش فیزیکی و پایش	داده واقعی و اعتبارسنجی	هزینه و محدودیت مقیاس	بررسی پدیده‌های غیرخطی و صحت‌سنجی مدل

جدول ۳. مهم‌ترین چالش‌ها و راهبردهای پیشنهادی

چالش	توضیح	راهبرد پیشنهادی
ناایستایی اقلیم	بی‌اعتباری نسبی داده‌های تاریخی	استفاده از سناریوهای اقلیمی و تحلیل بلندمدت
عدم‌قطعیت در بارگذاری	ابهام در پیش‌بینی امواج آینده	تحلیل احتمالاتی و طراحی مبتنی بر ریسک
پیچیدگی اندرکنش شاره ـ سازه	رفتار غیرخطی و چندفیزیکی	توسعه مدل‌های کوپل‌شده عددی
کمبود داده‌های میدانی	ضعف در کالیبراسیون مدل‌ها	پایش سلامت سازه و بانک داده دریایی
فرسودگی سازه‌های موجود	کاهش سختی و افزایش آسیب‌پذیری	ارزیابی مجدد، مقاوم‌سازی و نگهداری هوشمند

۱۲. بحث

مرور منابع نشان می‌دهد که تحلیل ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی در عصر تغییرات اقلیمی از یک مسئله صرفاً مهندسی به یک موضوع میان‌رشته‌ای تبدیل شده است. در این حوزه، دیگر نمی‌توان پاسخ سازه را بدون در نظر گرفتن تحول در شرایط محیطی تحلیل کرد. در واقع، تغییر اقلیم نه‌فقط شدت بارها، بلکه ساختار آماری و دینامیکی آن‌ها را نیز تغییر می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که مفاهیمی مانند طراحی بر اساس داده‌های تاریخی، دوره بازگشت ثابت و ضرایب اطمینان سنتی نیازمند بازنگری باشند.

یکی از مهم‌ترین نکات، ضرورت گذار از طراحی ایستا به طراحی تاب‌آور و سازگارپذیر است. طراحی تاب‌آور به این معنا است که سازه نه‌تنها برای شرایط طراحی اولیه، بلکه برای طیفی از سناریوهای محتمل آینده نیز عملکرد قابل قبول داشته باشد. این امر مستلزم استفاده از رویکردهای چندسناریویی، تحلیل حساسیت، ارزیابی چرخه عمر و پایش مداوم سازه است. به‌بیان دیگر، ایمنی سازه دریایی در آینده بیش از گذشته وابسته به کیفیت اطلاعات، به‌روزرسانی مدل‌ها و مدیریت فعال ریسک خواهد بود.

از سوی دیگر، توسعه فناوری‌های پایش سلامت سازه، حسگرهای هوشمند، مدل‌سازی داده‌محور و هوش مصنوعی، فرصت‌های جدیدی برای بهبود پیش‌بینی و مدیریت عملکرد سازه‌های دریایی فراهم کرده است. ترکیب مدل‌های فیزیکی با داده‌های واقعی می‌تواند عدم‌قطعیت‌ها را کاهش دهد و ارزیابی دقیق‌تری از وضعیت سازه ارائه کند. همچنین، به‌کارگیری مفهوم «دوقلوی دیجیتال» در سازه‌های دریایی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی رفتار آتی و برنامه‌ریزی نگهداری باشد.

در سطح ملی، با توجه به اهمیت زیرساخت‌های دریایی ایران، لازم است مطالعات جامع‌تری برای مناطق مختلف ساحلی کشور انجام شود. شرایط خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر از نظر رژیم موج، طوفان، تراز آب و فرسایش با یکدیگر متفاوت است؛ بنابراین نسخه واحدی برای همه مناطق وجود ندارد. توسعه بانک داده‌های دریایی، بازنگری استانداردهای طراحی و توجه به سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از الزامات اساسی در این زمینه است.

نتیجه‌گیری

سازه‌های دریایی به‌عنوان زیرساخت‌هایی حیاتی و پرهزینه، به‌شدت تحت تأثیر بارهای موجی و شرایط محیطی قرار دارند. تغییرات اقلیمی از طریق افزایش سطح آب دریا، تغییر رژیم باد، تشدید طوفان‌ها و ناایستا کردن شرایط امواج، الگوی بارگذاری وارد بر این سازه‌ها را دگرگون کرده است. این تحول می‌تواند دامنه ارتعاشات، خطر رزونانس، خستگی، آب‌شستگی، کاهش سختی تکیه‌گاهی و ناپایداری کلی و موضعی سازه‌ها را افزایش دهد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش‌های سنتی مبتنی بر داده‌های تاریخی و فرض پایداری اقلیم، برای ارزیابی بلندمدت عملکرد سازه‌های دریایی کافی نیستند. در مقابل، استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی، مدل‌های کوپل‌شده شاره ـ سازه، پایش سلامت سازه، سناریوهای اقلیمی و رویکردهای مبتنی بر تاب‌آوری، می‌تواند تصویر دقیق‌تری از مخاطرات آینده ارائه دهد. همچنین روشن شد که نوع سازه، شرایط بستر، ویژگی‌های دینامیکی و کیفیت نگهداری، در میزان آسیب‌پذیری آن در برابر امواج ناشی از تغییرات اقلیمی نقش تعیین‌کننده دارند.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان گفت که تحلیل ارتعاشات و پایداری سازه‌های دریایی در مواجهه با امواج متأثر از تغییرات اقلیمی، حوزه‌ای راهبردی، چندرشته‌ای و رو به گسترش است. موفقیت در این حوزه مستلزم ادغام دانش مهندسی سازه، هیدرودینامیک، ژئوتکنیک دریایی، اقلیم‌شناسی و مدیریت ریسک است. آینده طراحی سازه‌های دریایی نه در اتکای صرف به تجربه گذشته، بلکه در توانایی پیش‌بینی، سازگاری و تاب‌آوری در برابر شرایط متغیر نهفته است.

منابع

- فریبا، م.، احمدی، س.، و کاظمی، ر. (۱۴۰۰). پایش سلامت سازه‌های دریایی و کاربرد حسگرهای هوشمند در ارزیابی پاسخ دینامیکی. فصلنامه مهندسی دریا، ۱۶(۲)، ۷۵–۹۲.
- صالحی، ع.، مرادی، ح.، و نیک‌پی، م. (۱۳۹۸). بررسی اثر آب‌شستگی بر رفتار دینامیکی شمع‌های دریایی تحت بارگذاری موج. مجله مهندسی عمران مدرس، ۱۹(۴)، ۱۲۱–۱۳۸.
- قاسمی، م.، و حیدری، پ. (۱۳۹۷). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مشخصات امواج در سواحل جنوبی ایران. پژوهش‌های اقیانوسی، ۹(۳)، ۴۵–۶۳.
- محمدی، ع.، و حسینی، س. (۱۳۹۹). تحلیل پاسخ دینامیکی سازه‌های فراساحلی تحت امواج نامنظم. نشریه مهندسی سواحل و بنادر، ۱۳(۱)، ۲۳–۴۱.
- یوسفی، ن.، و رضوی، ک. (۱۴۰۱). بررسی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های ساحلی در برابر بالا آمدن سطح آب دریا. فصلنامه محیط ساحلی، ۷(۲)، ۵۵–۷۴.

- Bathe, K. J. (۱۹۹۶). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Chakrabarti, S. K. (۲۰۰۵). *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (۱۹۹۱). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
- DNV. (۲۰۱٤). *Fatigue Design of Offshore Steel Structures: Recommended Practice DNV-RP-C203*. Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O. M. (۱۹۹۰). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (۲۰۲۱). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Massel, S. R. (۲۰۱۳). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction / Hydrodynamics of Coastal Zones*. World Scientific.
- Melchers, R. E., & Beck, A. T. (۲۰۱۸). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (۳rd ed.). Wiley.
- Sarpkaya, T., & Isaacson, M. (۱۹۸۱). *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand Reinhold.