

چکیده

رو آوردن به انرژی‌های پاک امری اجتناب‌ناپذیر است، در این میان انرژی باد یکی از متداول‌ترین و در دسترس‌ترین آنهاست. استفاده از انرژی باد با توجه به مزیت‌های شناخته شده آن نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، باعث شده فناوری ساخت توربین‌های بادی رشد بیشتری پیدا کند و همین امر علت افزایش ظرفیت توربین‌های بادی و تجاری شدن اندازه‌های بزرگ‌تر آن گردیده است. با افزایش ظرفیت توربین‌های بادی، الزاماً اندازه روتور و در نتیجه ارتفاع برج افزایش می‌یابد. عموماً استانداردها ترکیبات بار طراحی را برای تحلیل‌های بار نهایی و بار خستگی مشخص می‌کنند. سرعت ۱۱ متر بر ثانیه سرعتی است که طبق نمودار تولید توان توربین مورد مطالعه، در آن سرعت توربین به توان حداکثر خود می‌رسد، از این رو فرض بر این است که توربین در سائیتی نصب می‌شود که در اکثر اوقات در این سرعت باد خواهد بود و لذا احتمال وقوع زلزله در این سرعت بیش از سایر حالت‌ها می‌باشد. لذا با توجه به تأکید در نظرگیری نیروی زلزله در مناطق لرزه‌خیز همراه با سایر نیروهای وارد به توربین بادی در نسخه‌های جدید آیین‌نامه‌های مطرح در این زمینه و لرزه‌خیز بودن کشور ایران، تحلیل مقایسه‌ای بار لرزه‌ای با سایر نیروهای وارد به توربین بادی بر اساس استاندارد GL، فصل ۴، جداول (۲) تا (۴) برای باد اغتشاشی ۱۱ متر بر ثانیه، در حالت زاویه انحراف صفر برای توربین بادی ۲ مگاوات ملی ایران در یک مدل کامل و کاربردی، با مدل‌سازی سازه برج فولادی و پی بتنی و لایه‌های خاک در ساختمان مورد نظر، از روش عددی المان محدود به صورت دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS آنالیز و مورد پژوهش قرار گرفته است. با توجه به محل استقرار این توربین بادی، با لایه‌های خاک به عمق ۶ متر، حداکثر تغییر مکان نوک برج با در نظرگیری بار لرزه‌ای حدود ۷ درصد افزایش داشت، اما افزایش قابل توجه تنش معادل در ارتفاع ۵۰ متری برج، علی‌رغم عمق کم لایه‌های خاک و عدم بزرگ‌نمایی محسوس شتاب زلزله وارد شده از بستر سنگی به سطح زمین، بالغ بر ۳۶ درصد به دست آمد. لذا ضرورت در نظرگیری هم‌زمان نیروی زلزله همراه با نیروهای باد به‌خوبی نتیجه گردید.

واژگان کلیدی: توربین بادی، آنالیز دینامیکی، برج توربین بادی، رفتار لرزه‌ای، اندرکنش خاک و سازه.

بررسی عددی و مقایسه‌ای رفتار دینامیکی و لرزه‌ای برج توربین بادی به روش اجزای محدود

شهرام توکلی فریمانی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله،
دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی،
تهران، ایران

نعمت حسنی (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، N_hassani@sbu.ac.ir

حمید محمد نژاد

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

آیدین غزنوی اسکویی

استادیار، گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگاه نیرو، تهران،
ایران

۱- مقدمه

در آرایه فراساحلی آبردین، قطر روتور بیش از ۱۶۰ متر و نرخ خروجی ۸ مگاوات می‌باشد (Anderson, 2020). در سال ۲۰۲۱ شرکت MingYang Smart Energy مستقر در چین، از یک توربین بادی ۱۶ مگاواتی رونمایی کرد که به‌عنوان بزرگ‌ترین

از زمان اولین طراحی ریزاجر در سال ۱۹۷۵ ابعاد توربین‌های بادی جدید به‌طور متوسط حدود ۷ درصد در سال افزایش یافته است، با افزایش توان متناظر ۱۶ درصد در سال تا سال ۲۰۱۸ بزرگ‌ترین توربین بادی تجاری (توربین بادی ۸ مگاواتی وستاس

فرض صلب بودن خاک زیرین منجر به خطا در ارزیابی تقاضای لرزه‌ای می‌شود و تقریبی است. برش پایه و گشتاور واژگونی، حتی برای یک خاک نسبتاً سفت، می‌تواند به دلیل اثر اندرکنش خاک و سازه در مقایسه با مدل پی صلب، تقریباً سه برابر بزرگ‌تر باشد. برای تمام رکوردهای اعمال شده، جابه‌جایی لختی اندازه‌گیری شده در بالای برج با کاهش سختی خاک افزایش می‌یابد. توزیع برش و لنگر پایه تحت تأثیر نوع خاک می‌باشد. در برخی موارد، لنگر پایه به دلیل اثر اندرکنش افزایش یافته است، در حالی که برش پایه در مقایسه با مدل پی صلب کاهش یافته است. این تغییر در توزیع تقاضای لرزه‌ای ممکن است بر طراحی برج توربین‌های بادی تأثیر بگذارد. بر خلاف معمول، مشاهده گردید که اعمال یک ضریب کاهش یکنواخت برای تقاضای لرزه‌ای در طول ارتفاع برج، ممکن است در برخی موارد منجر به طراحی نایمن شود. اسمیت و محمود (Smith & Mahmoud, 2016) مدل‌های عددی واقع‌گرایانه توسعه یافته را برای ارزیابی عملکرد توربین‌های بادی با ارتفاع‌های مختلف، با اعمال بارهای باد، بارهای عملیاتی و لرزه‌ای مورد استفاده قرار دادند و سه مدل توربین بادی با ارتفاع ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ متری را شبیه‌سازی نمودند. سوابق لرزه‌ای هر دو میدان نزدیک و دور در شبیه‌سازی زلزله مورد استفاده قرار گرفت و با فرض بزرگی زلزله بین ۶/۵ تا ۷/۵ در مجموع ۱۰ زلزله شامل پنج رکورد میدان نزدیک و پنج رکورد میدان دور انتخاب شد؛ و سه کلاس خاک انتخاب گردید و نتیجه‌گیری شد که حداکثر مقادیر دررفت نسبی برای بارهای باد و عملیاتی از بار لرزه‌ای بالاتر است و به‌طور کلی، دررفت نسبی برای توربین‌های ۶۰ و ۹۰ متری به نسبت توربین ۱۲۰ متری بالاتر است، در چهار مورد از تحلیل‌ها، مصالح کف برج نزدیک پایه به تنش تسلیم رسید ولی توربین ۱۲۰ متری هرگز به تنش تسلیم نرسید. لی و همکاران (Li, Huang, & Du, 2019) تحلیل پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی تحت حرکات زمین با طول موج بالا را مورد بررسی قرار دادند. در نتیجه، جابه‌جایی افقی به تدریج در امتداد ارتفاع برج افزایش یافت و حداکثر مقدار آن در بالای برج ظاهر شد. حداکثر جابه‌جایی بالای برج به ۲ متر رسید که می‌تواند باعث

توربین بادی جهان شناخته می‌شود. این توربین ۱۶ مگاواتی MySE 16.0-242 نام دارد و قطر روتور آن ۲۴۲ متر است. طول هر تیغه آن ۱۱۸ متر است و مساحتی در حدود ۴۶ هزار مترمربع را در برمی‌گیرد. پیش‌بینی می‌شود نمونه اولیه این توربین در نیمه اول سال ۲۰۲۳ در کف دریا یا بر روی یک پایه شناور نصب و در سال ۲۰۲۴ به بهره‌برداری برسد (Ming Yang Smart Energy). ویچر (Witcher, 2005) روشی را برای محاسبه بارهای زلزله وارد بر یک توربین دو مگاواتی در نرم‌افزار GH Blade مورد استفاده قرار داد و نتیجه گرفت پاسخ‌های تحلیل در حوزه زمان و فرکانس، همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. پراول (Prowell, 2011) بار لرزه‌ای وارد بر توربین ۵ مگاواتی NREL را با استفاده از نرم‌افزار FAST برآورد کرد. نتایج پژوهش وی نشان داد اثر زلزله در مقدار لنگر مورد نیاز طراحی برج توربین تأثیر قابل توجهی دارد و باید اثر آن را در محاسبات وارد کرد.

دیاز (Díaz & Suárez, 2014) یک مدل تحلیلی از یک توربین بادی فعال برای به دست آوردن پاسخ لرزه‌ای ناشی از سه شتاب پایه ارائه شده در نظر گرفت. نتایج این تحلیل با میانگین بارهای باد ثابت تقریبی نشان داد که تنش‌های القا شده در برج توسط بارهای شدید باد به‌طور کلی بزرگ‌تر از بارهای ناشی از زلزله در ترکیب بار هستند. قائم‌مقامی و همکاران (Ghaemmaghani, Mercan, & Kianoush, 2016) رفتار لرزه‌ای توربین‌های بادی قرار گرفته بر روی یک لایه خاکی منعطف محدود در یک فضای سه‌بعدی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه پارامتریک متشکل از ۲۴ رکورد زلزله و سه نیمرخ خاک انجام شد و مقادیر مختلف واکنش باد در نظر گرفته شد. حرکات زمین میدان آزاد بر اساس روش معادل خطی با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری SHAKE2000 تخمین زده شد. با استفاده از مفهوم تابع انتقال فوریه، مشخص شد که اثر اندرکنش خاک و سازه بر پارامترهای مودال اول و دوم ناچیز است. با این حال، گشتاور پایه حاصل و نیروهای برشی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اثر اندرکنش خاک و سازه بود. همان‌طور که در این تحقیق نشان داده شد، طراحی لرزه‌ای برج توربین‌های بادی بر اساس

اندرکنش خاک و سازه صحیح‌تر است که در حوزه فرکانس انجام شود. هارت و همکاران (Harte, Basu, & Nielsen, 2012) پاسخ ارتعاش اجباری همراه با باد یک توربین بادی خشکی شامل اثرات متقابل دینامیکی بین پی و خاک زیرین را با یک مدل توربین بادی خشکی محور افقی چند درجه آزادی با استفاده از رویکرد اوپلر- لاگرانژی توسعه داده شده بررسی نمودند، برش پایه و لنگر خمشی در پایه برج و در فونداسیون محاسبه شد. تفاوت معنی‌داری بین برش و لنگر در پی و پایه برج پیدا نشد. اینرسی پی قابل اغماض بود و مقادیر حداکثر پاسخ فرکانس، مضرپی از سه برابر سرعت چرخش پره بود و نشان داده شد که اندرکنش خاک و سازه برای خاک‌های سخت‌تر، تأثیر کمتری بر روی حداکثر لنگر خمشی و نیروی برشی پی دارد، هرچند که مقادیر پاسخ فرکانس در تاریخچه زمانی به‌طور قابل توجهی تحت اثر اندرکنش خاک و سازه بود. این اثر می‌تواند تأثیر معنی‌داری روی خستگی فونداسیون توربین بادی داشته باشد. همچنین نشان داده شد که چرخش فونداسیون به‌طور قابل توجهی با کاهش سختی خاک افزایش می‌یابد. سرمت و همکاران (Sermet, Ensar Yigit, Ergun, & Hokelekli, 2020) سه برج با متریا و مقاطع مختلف و ارتفاع یکسان ۱۰ متر را از روش المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS با مدل‌سازی سه‌بعدی و با در نظر گرفتن بار باد و سه رکورد شتاب زلزله آنالیز دینامیکی نمودند و در نتیجه برج فولادی بیشترین تنش و جابه‌جایی را ثبت نمود و برج هیبرید در این میان مناسب‌ترین بود. مشاهده شد که سطح تغییرات نیروهای دینامیکی تأثیر معنی‌داری بر بزرگی حداکثر جابه‌جایی‌های انتهایی دارد. در همه موارد، بیشترین جابه‌جایی‌ها در نوع برج فولادی که دارای صلبیت کمتری می‌باشد رخ داده است. با این حال، تفاوت تغییر مکان قابل توجهی در انواع مختلف برج وجود نداشت که دلیل آن ارتفاع کم برج بود. با اعمال نیروی زلزله، بیشترین افزایش تنش در برج بتن مسلح با بیشترین وزن اتفاق افتاد. دلیل این امر افزایش نیروی برشی زلزله متناسب با وزن سازه بود. یوان و همکاران (Yuan, Chen, Li, & Xu, 2017)

ایجاد تأثیر غیر خطی هندسی در برج توربین بادی شود، در نتیجه عملکرد لرزه‌ای سازه را کاهش می‌دهد. در همان زمان، شتاب لرزه‌ای عمودی در برج توربین بادی دو برابر شتاب زمین است که ممکن است تأثیر بسزایی در استفاده عادی از توربین بادی پس از زلزله داشته باشد. اسماعیلی و همکاران (Esmaeili, Mohtashami, Salehi-Ahmadabad, & Shooshtari, 2016) کفایت روش استاتیکی معادل در برآورد پاسخ لرزه‌ای برج توربین بادی را مورد بررسی قرار دادند. با بررسی نتایج از دو روش، مشخص شد روش استاتیکی معادل همواره مقادیر برش و لنگر خمشی و جابه‌جایی برج را بیشتر از بیشینه مقادیر حاصل از تحلیل تاریخچه پاسخ برآورد می‌کند و هر قدر خاک سخت‌تر باشد، این اختلاف کمتر است. میزان حساسیت بیشینه برش پایه برج نسبت به روش تحلیل، کمتر از حساسیت بیشینه لنگر خمشی پایه و بیشینه جابه‌جایی افقی نوک برج می‌باشد. برای موارد خاص توربین مورد مطالعه در این پژوهش، افزایش بیشینه لنگر خمشی پایه برج تحت تحلیل استاتیکی معادل، با فرض خاک نوع یک، ۸۲ درصد و با فرض خاک نوع چهار، ۲۷۳ درصد بیشتر از پاسخ روش دینامیکی تاریخچه پاسخ تعیین گردید. همچنین افزایش بیشینه جابه‌جایی افقی نوک برج تحت تحلیل استاتیکی معادل، از ۹۱ درصد برای خاک نوع یک، تا ۲۹۵ درصد برای خاک نوع چهار متغیر بود. علت این اختلاف‌ها را می‌توان به چگونگی توزیع نیروی زلزله در ارتفاع برج در روش استاتیکی معادل نسبت داد. افزون بر این، انجام تحلیل در حوزه زمان یا فرکانس می‌تواند بر نحوه توزیع بیشینه لنگر خمشی در ارتفاع برج تأثیرگذار باشد. ژائو و مایسر (Zhao & Maisser, 2006) بیان نمودند در تحلیل لرزه‌ای یک سازه، اندرکنش خاک و سازه بایستی در نظر گرفته شود زیرا رفتار دینامیکی سازه‌ی توربین بادی در زمان وقوع زلزله متأثر از اندرکنش بین سه بخش است. برج توربین بادی، پی و نوع زمین که از نظر ساختار زمین‌شناسی در نواحی نزدیک پی است. ولف و دیکز (Wolf & Deeks, 2004) اعتقاد داشتند در یک مسئله اندرکنش خاک و سازه سختی دینامیک پی بستگی به فرکانس تحریک دارد بنابراین تحلیلی با لحاظ کردن

(Gesualdo, Guadagnuolo, & Penta, 2018) رفتار یک توربین بادی با برج خرپایی را در معرض حرکت هارمونیک زمین تحلیل نمودند. در این تحلیل شکست ناشی از تشکیل لولاهای برشی را در نظر گرفتند و روش یکپارچه‌سازی گام‌به‌گام برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه در کل حوزه زمانی را اتخاذ نمودند و به این نتیجه رسیدند که این روش می‌تواند به‌طور مؤثر در صورت تأیید شکست برشی اعمال شود. ژو و لی (Zhu & Li, 2018) حالت‌های شکست و علل خرابی و روش‌های تشخیص برخی از اجزای کلیدی و روش‌های متداول و تحلیل پایایی توربین‌های بادی را تجزیه و تحلیل نمودند و به این نتیجه رسیدند که شکست خستگی از رایج‌ترین حالت‌های شکست توربین‌های بادی است، همچنین زمانی این‌گونه تحقیق قابل اطمینان است که کل اجزای توربین بادی از پره تا پی در آن مدل شده و به‌صورت دینامیکی آنالیز گردد. وایزر و همکاران (Wiser, Millstein, Bolinger, Jeong, & Mills, 2021) دریافتند که برج‌های بلندتر و روتورهای بزرگ‌تر می‌توانند ارزش انرژی باد را برای سیستم برق افزایش دهند. به‌طور خاص، در مناطقی که نفوذ باد به حدود ۲۰ درصد رسیده است، با کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی هزینه‌های تراز شده انرژی (LCOE) همراه است. هو و همکاران (Huo, Tong, & Zhang, 2018) یک مدل اجزای محدود یکپارچه شامل روتور، ناسل، برج و پی را با در نظرگیری اثر اندرکنش خاک و سازه با دو رکورد زلزله با پریود بالا در خاک نرم آنالیز نمودند و دریافتند در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه می‌تواند فرکانس طبیعی سیستم توربین بادی را کاهش دهد. همچنین به‌طور کلی، در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه بر حداکثر شتاب، سطح تنش و نیروهای داخلی اثر قابل توجهی ندارد درحالی‌که اثر زیادی بر جابه‌جایی دارد؛ و هنگامی‌که امواج طولانی‌مدت در نظر گرفته می‌شود، گشتاور خمشی، نیروی برشی و تنش‌های فون میزس در بخش پایه برج افزایش یافته و تمرکز تنش قابل توجه است. شاه و دزایی (Shah and Desai, 2022) با شبیه‌سازی دو نوع برج هیبریدی فولادی (استوانه توخالی و خرپای فضایی) و استوانه

شکندگی توربین‌های بادی بزرگ‌مقیاس با در نظر گرفتن ترکیب بارهای لرزه‌ای و آیرودینامیکی در دو سناریو: اول شرایط عملیات عادی با کارکرد سیستم کنترل خط پایه (BCS) و سناریوی دوم شرایط پارک شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اثر میرایی آیرودینامیکی بر پاسخ ساختاری یک توربین بادی در حین کارکرد عادی منجر به کاهش حداکثر مقادیر پاسخ دینامیکی در مقایسه با شرایط پارک می‌شود که باعث می‌شود احتمال تجاوز از حالت حدی در سناریوی اول کاهش یابد. لذا مشخص می‌شود که یک توربین بادی که در شرایط کارکرد عادی تحت بارهای لرزه‌ای و آیرودینامیکی قرار می‌گیرد، ایمن‌تر از شرایط پارک شده است. در نهایت، نتیجه گرفتند که شکندگی توربین‌های بادی مقیاس بزرگ را می‌توان با کارکرد BCS در هنگام وقوع زلزله کاهش داد. آستین و جراث (Austin & Jerath, 2017) اثرات اندرکنش خاک-پی-سازه بر پاسخ لرزه‌ای سه نوع توربین بادی محور افقی ۶۵ کیلووات، ۱ مگاوات و ۲ مگاوات با برج‌های فولادی مخروطی کوتاه و چهار نوع فونداسیون با طراحی مبتنی بر فرکانس، شامل پی گسترده، تک شمع، گروه شمع با کلاهک، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که برای موارد خاص مورد مطالعه در این تحقیق، اثر اندرکنش پی-خاک-سازه بر پاسخ لرزه‌ای به طرز چشمگیری جزئی هستند؛ بنابراین تحلیل لرزه‌ای برج‌های توربین بادی در این موارد را می‌توان با ساده‌سازی با فرض گیرداری در پایه برج انجام داد. کاتسانوس و همکاران (Katsanos, Thöns, & Georgakis, 2016) نتیجه گرفتند استفاده از مدل‌های کامل، از جمله ناسل و پره‌های روتور، برج نگه‌دارنده و همچنین سیستم پی خاک، همراه با تحلیل حوزه زمانی به‌منظور ثبت رفتار دینامیکی پیچیده توربین‌های بادی بسیار مورد اطمینان است. همچنین باید توجه لازم به پدیده اندرکنش خاک و سازه صورت گیرد، زیرا انطباق خاک و برهم‌کنش اینرسی ناشی از زلزله بین رو بنا و سیستم خاک-پی ممکن است به‌طور قابل توجهی خصوصیات دینامیکی یک توربین بادی و پاسخ لرزه‌ای آن را تغییر دهد. جسیوالدو و همکاران

۲- روش پژوهش

مشخصات توربین بادی مورد استفاده در این مطالعه به شرح جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات توربین بادی ۲ مگاواتی ملی ایران.	
ارتفاع	۸۰ متر
نوع	پوسته فولادی
حداکثر ضخامت	۴۰ میلی‌متر
حداقل ضخامت	۱۵ میلی‌متر
فولاد مصرفی	St52
قطر در پایه برج	۴/۱۰ متر
قطر در بالای برج	۳/۱۰ متر
جرم	۱۷۷ تن
طول هر پره	۴۲/۲ متر
جرم هر پره	۸/۷ تن
قطر ریشه پره	۲/۱۰ متر
جرم روتور (پره، هاب، دماغه، یاتاقان)	۶۰ تن
جرم ناسل (شاسی، سیستم دوران، سیستم تولید انرژی الکتریکی)	۸۵ تن
ابعاد پی	۲۰×۲۰ متر مربع
حداقل ارتفاع	۱/۵۰ متر
حداکثر ارتفاع	۲/۵۰ متر
جرم	۱۷۲۰ تن

شبیه‌سازی مدل باد در توربین بادی بر اساس روابط تعیین شده در استانداردها به‌ویژه دو استاندارد GL Guidelines و IEC 61400-1 می‌باشد. شبیه‌سازی باد اغتشاشی با استفاده از نرم‌افزار TurbSim (نرم‌افزار شبیه‌ساز باد اغتشاشی سه‌بعدی) محاسبه و اطلاعات خروجی این نرم‌افزار به‌عنوان ورودی نرم‌افزار FAST استفاده شد.

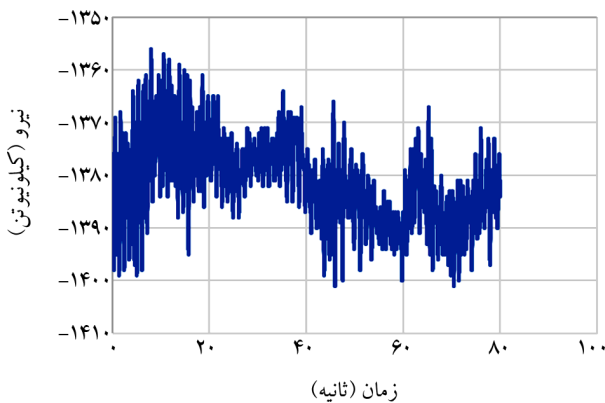
مدل‌سازی آیرودینامیک و دینامیک پره توربین در نرم‌افزار FAST انجام گرفت که کاملاً منطبق بر روش‌های پیشنهادی و مورد استفاده در مدل‌سازی توربین بادی در منابع و دستینه‌ها است. اولین و مهم‌ترین قسمت محاسباتی این نرم‌افزار، مربوط به بخش آیرودینامیکی است. نرم‌افزار FAST برای انجام این قسمت نیاز به اطلاعات کامل پره دارد که شامل: طول وتر پره، میزان زاویه

توخالی فولادی برای توربین بادی ۱/۶ مگاواتی با برج ۷۸ متری در نرم‌افزار Sap-2000 و آنالیز غیر خطی به روش المان محدود و ساخت نمونه آزمایشگاهی ۱:۴۰، دو برج مزبور و وارد نمودن چهار بار لرزه‌ای، به این نتیجه رسیدند که در برج هیبریدی مقادیر جابه‌جایی ۲۵ الی ۴۵ درصد و همچنین مقادیر برش پایه به میزان ۱۰۸ الی ۱۱۸ درصد کاهش داشته است، به این ترتیب برج هیبریدی مزبور را برای برج‌های مرتفع توصیه نمودند.

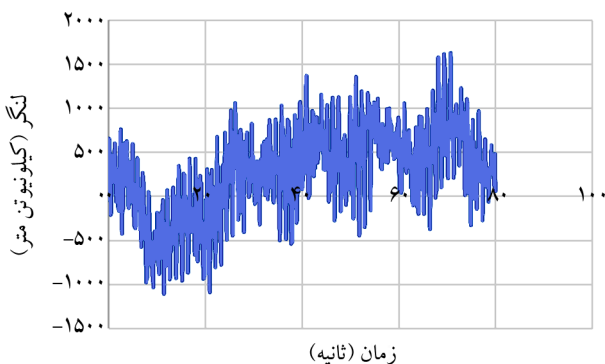
در این مقاله رفتار دینامیکی و لرزه‌ای برج توربین بادی دو مگاوات ملی ایران (شکل ۱)، در بارگذاری خاص و اسمی، مورد بررسی عددی و مقایسه‌ای قرار گرفت. جهت رسیدن به این هدف، از میان بارهای طراحی در حالت دینامیکی، بارهای باد اغتشاشی عادی (NTM) با سرعت اسمی (۱۱ متر بر ثانیه) در مدت ۸۰ ثانیه و بار زلزله به‌دست آمده از مطالعات تحلیل خطر (STS CO., 2011) با مدت ۳۰ ثانیه برای ساختگاهی واقع در استان قزوین، اراضی ملی روستای علی‌آباد، حد فاصل میان شهرهای تاکستان و ابهر، حد شرقی استان قزوین ($N = 36^{\circ} 06' 34/2''$ و $E = 49^{\circ} 23' 31/1''$)، به‌صورت توأم و جداگانه، با لحاظ نمودن اثر اندرکنش سازه و خاک، بر روی خاک به عمق ۶ متر و مشخصات به‌دست آمده از مطالعات ژئوتکنیک (STS CO., 2011)، با استفاده از روش اجزای محدود آنالیز گردید.



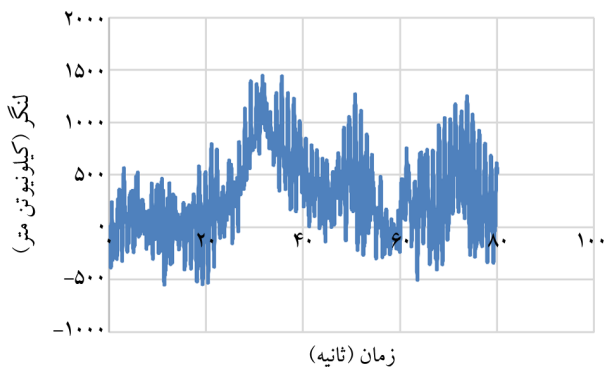
شکل (۱): شکل شماتیک توربین بادی محور افقی.



شکل (۵): لنگر وارد شده به بالای برج در جهت X.



شکل (۶): لنگر وارد شده به بالای برج در جهت Y.



شکل (۷): لنگر وارد شده به بالای برج در جهت Z.

فرکانس و از روش خطی معادل و با استفاده از مشخصات خاک مطالعات ژئوتکنیک (STS CO., 2011)، به روی بستر سنگی برده شد (جدول ۲) که نتایج آن به شرح شکل‌های (۸) و (۹) می‌باشد.

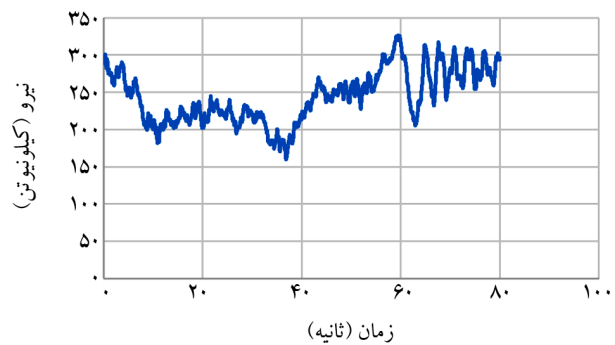
جدول (۲): مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها بر روی سنگ بستر.

در جهت Y	در جهت X	
۰/۳۰۹	۰/۲۸۳	حداکثر شتاب زمین بر حسب g
۱۸/۱۳۰	۱۴/۰۶۰	زمان (ثانیه)

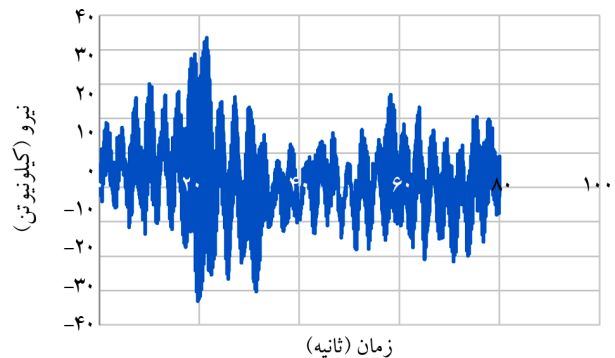
پیش، پروفیل مورد استفاده در هر مقطع، ضرایب آیرودینامیکی هر پروفیل که در هر مقطع از پره بایستی اطلاعات مزبور معین گردد.

در نهایت محاسبه بارهای باد و بارهای عملیاتی در بالای برج با استفاده از نرم‌افزار FAST به شرح شکل‌های (۲) تا (۷) به دست آمد، لازم به توضیح است X و Y در جهت افق و Z در جهت ارتفاع برج توربین می‌باشد.

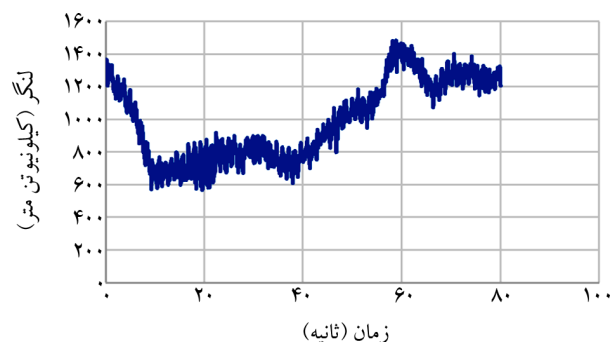
برای بار لرزه‌ای، رکورد زلزله به دست آمده از مطالعات تحلیل خطر (STS CO., 2011) بر روی سطح زمین، با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL و از بخش Deconvolution برای حوزه



شکل (۲): نیروهای وارد شده به بالای برج در جهت X.

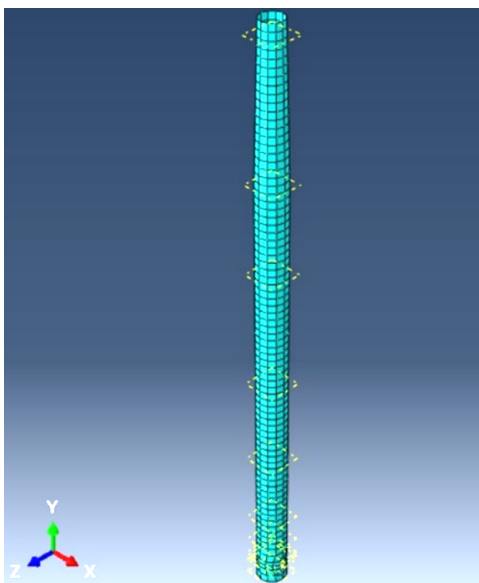


شکل (۳): نیروهای وارد شده به بالای برج در جهت Y.

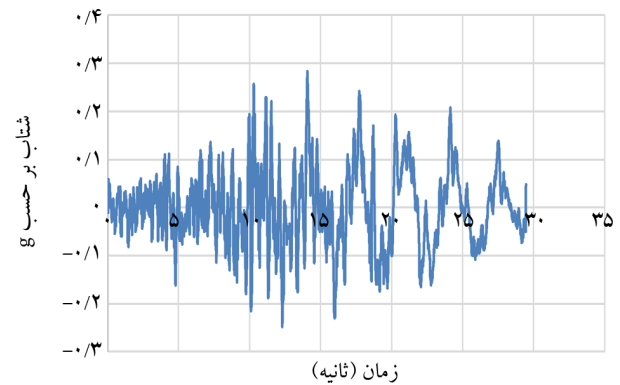


شکل (۴): نیروهای وارد شده به بالای برج در جهت Z.

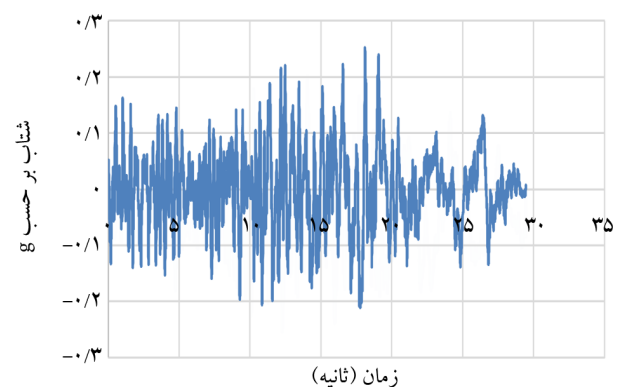
۴ متری برابر ۴۰ میلی‌متر و تا تراز ۱۰ متر برابر ۳۵ میلی‌متر و تا تراز ۲۰ متر برابر ۳۰ میلی‌متر و تا تراز ۳۲ متر برابر ۲۵ میلی‌متر و تا تراز ۴۸ متر برابر ۲۰ میلی‌متر و تا تراز ۷۸ متر برابر ۱۵ میلی‌متر و ۲ متر آخر هم ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. صفحه ستون هم در محل اتصال برج به پایه ستون به ضخامت ۱۱۰ میلی‌متر می‌باشد. با فرضیات فوق، برای ساخت برج ۲۲/۵ متر مکعب و بالغ بر ۱۷۷ تن فولاد مصرف شده است. فولاد استفاده شده در برج و صفحه ستون از نوع ST 52 با حداقل مقاومت تسلیم ۳۶۰ مگا پاسکال و جرم حجمی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ می‌باشد که مطابق نقشه و مشخصات فنی به صورت پوسته در نرم‌افزار ABAQUS تعریف شده است. با توجه به ماهیت مکانیکی برج و پی برای مدل‌سازی برج توربین بادی شکل (۱۰) از المان پوسته‌ای چهار گرهی S4R و برای مدل‌سازی پی و خاک زیر آن از المان‌های مکعبی هشت گرهی C3D8R استفاده گردید و سازه به پی مقید شده یا به عبارت دیگر از قید Tie استفاده شده است. برای تعیین حساسیت مش‌بندی برج، مش‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ و ۲ و ۴ و ۸ متر انتخاب و نتایج آن با هم مقایسه شد (شکل ۱۱). با توجه به بررسی زمان آنالیز و حداکثر تغییر مکان نوک برج، مش ۱ متر برای برج انتخاب گردید.



شکل (۱۰): مش‌بندی برج.



شکل (۸): تاریخچه زمانی شتاب در جهت X.



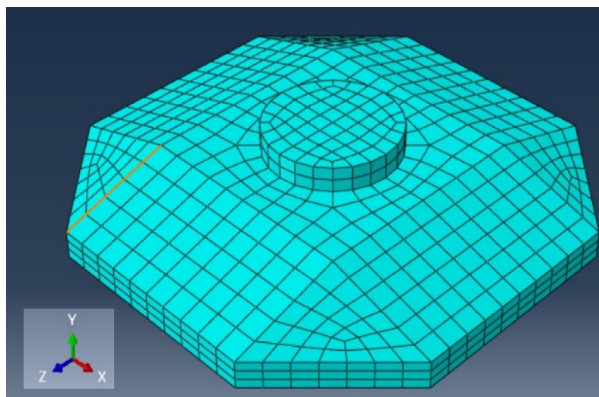
شکل (۹): تاریخچه زمانی شتاب در جهت Y.

برای تحلیل و مدل‌سازی برج و پی و لایه‌های خاک از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. ابتدا بر اساس مشخصات داده شده در نقشه‌های اجرایی، سازه برج و پی مدل شدند و سپس بر اساس مطالعات ژئوتکنیک ساختگاه، خاک با ضخامت ۶ متر با تعریف عمق ۲/۴۰ متر برای تراز زیر پی مدل شده است، ابعاد خاک ۱۴۰ در ۱۴۰ متر در نظر گرفته شد و علاوه بر آن مرزهای جاذب از نوع خاک به طول ۷۰ متر از هر چهار گوشه خاک به صورت بی‌نهایت (Infinite) تعریف شد، سپس خاک‌ریزی (Backfill) روی پی مدل گردید.

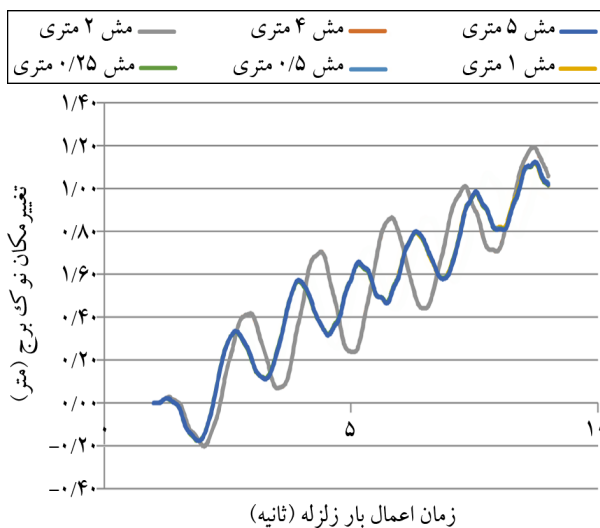
۳- مدل‌سازی عددی

برج توربین بادی شامل چهار قسمت ۱۶ و ۲۲ و ۲۲ و ۲۰ متری می‌باشد که سه قطعه اول دارای قطر ثابت ۴/۱ متر و قطعه چهارم (قطعه بیست‌متری) از قطر ۴/۱ به ۳/۱ متر به صورت مخروطی کاهش می‌یابد و ضخامت برج از تراز صفر الی

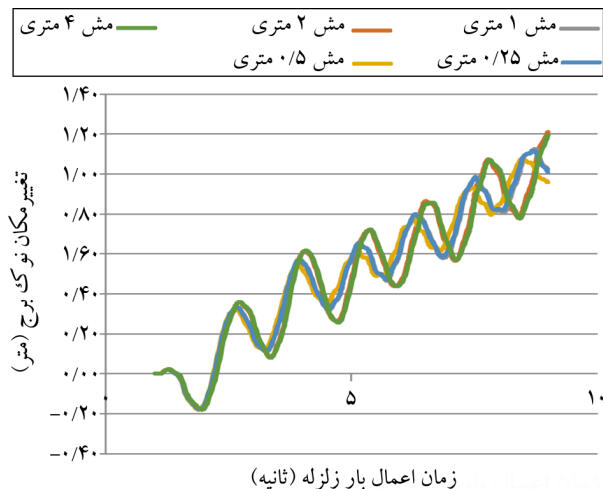
برای تعیین حساسیت مش بندی پی (شکل ۱۲)، مش های ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ و ۲ و ۴ و ۵ متر مقایسه شد (شکل ۱۳) و در نهایت مش بندی ۱ متر برای فونداسیون انتخاب گردید. خاک با استفاده از مطالعات نهایی ژئوتکنیک ساختگاه توربین بادی، از دو لایه و جمعاً شش متر روی بستر سنگی به شرح جدول (۳) تشکیل شده است (STS CO, 2011).



شکل (۱۲): مش بندی فونداسیون توربین بادی.



شکل (۱۳): مقایسه حساسیت مش بندی فونداسیون.



شکل (۱۱): مقایسه حساسیت مش بندی برج

فونداسیون برج به ابعاد ۲۰ در ۲۰ متر با پخ ۵ متر در گوشه ها و با ضخامت ۲/۵ متر در وسط و ۱/۵ متر در کناره ها و یک پدستال به ارتفاع یک متر با قطر ۶ متر در مرکز آن قرار دارد. با فرضیات فوق، کل حجم بتن بالغ بر ۷۱۷ مترمکعب که وزن آن ۱۷۲۰ تن را دارا می باشد. بتن مصرفی در فونداسیون زیر سازه دارای مقاومت ۴۰ مگاپاسکال، جرم حجمی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ ۲۰ گیگا پاسکال و نسبت پواسون ۰/۱۷ می باشد. برای تعریف اتصال فونداسیون به خاک زیر آن، از دو رفتار اصطکاکی استفاده شده است. رفتار اول یک رفتار اصطکاکی با عنوان رفتار نرمال و از نوع اتصال سخت. این اتصال بدین معناست که خاک و فونداسیون از یکدیگر عبور نمی کنند. رفتار دوم یک رفتار اصطکاکی با عنوان رفتار مماسی با ضریب اصطکاک ۰/۴۴۵ بین پی و خاک می باشد که از رابطه (۱) محاسبه شده است (Gatmiri, 1996). محدوده ضریب اصطکاک برای خاک و بتن بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۵ است.

$$\tan\left(\frac{2}{3}\varphi\right) = \tan\left(\frac{2}{3}36\right) = 0.445228 \approx 0.445 \quad (1)$$

جدول (۳): مشخصات لایه های خاک ساختگاه توربین بادی.

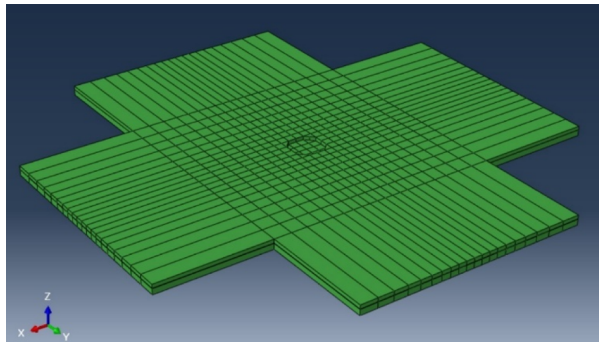
شرح	عمق (متر)	تفوذ استاندارد (عدد)	مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)	چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	دانسیته خشک و طبیعی (گرم بر سانتی مترمربع)	ضریب پواسون
سیلت و ماسه + مقداری رس	۰/۴-۲/۵	۸۳	۵۰۷	۰/۸	۱۳	۱/۶۱-۱/۷۴	۰/۴
شن ماسه ای + مقداری سیلت رسی	۶-۲/۶	۱۰۰≥	۸۲۱	۰/۰۵	۳۶	۱/۹۸	۰/۳
سنگ بستر	≥ ۶	-	۲۳۵۰۰-۵۳۰۰۰	-	-	-	-

لذا برای عمق ۲/۵ متر مقدار ۴۲۹۱۲ پاسکال و برای عمق ۶ متر برابر ۱۱۶۵۴۳ پاسکال در نظر گرفته شده است.

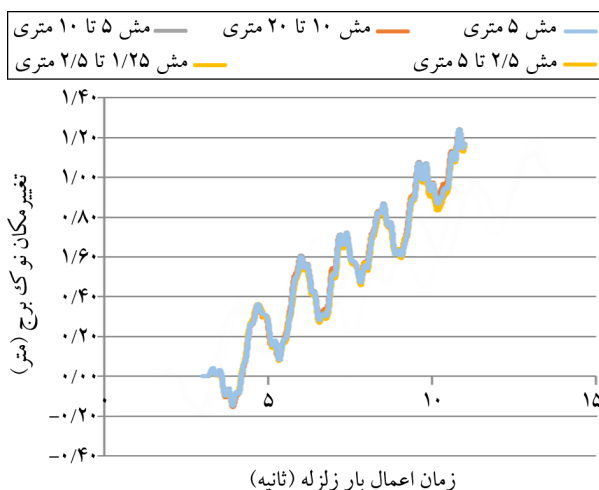
مقدار (k)، ضریب فشار جانبی سکون خاک برای خاک‌های مختلف از رابطه (۴) به دست می‌آید (Gatmiri, 1996). لذا مقدار این ضریب برای نمونه خاک مورد مطالعه در این پژوهش ۰/۷۷۵ برای لایه اول و ۰/۴۱۲ برای لایه دوم می‌باشد.

$$k = 1 - \sin\phi \quad (۴)$$

برای انتخاب مش مناسب، مش‌بندی‌های متغیر ۱۰-۲۰ و ۲۰-۱۰ و ۲/۵-۵ و ۱/۲۵-۲/۵ و مش ثابت ۵ متر مقایسه و در نهایت مش متغیر ۵ الی ۱۰ متر انتخاب گردیده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).



شکل (۱۴): مش‌بندی لایه‌های خاک.



شکل (۱۵): مقایسه حالات مختلف مش‌بندی خاک توریین بادی.

۴- صحت‌سنجی

با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS آنالیز مودال برج توریین بادی انجام شد که نتایج ۹ مود اول به شرح جدول (۵) به دست آمد:

بر اساس مطالعات ژئوتکنیک از آزمایش تست درون‌چاهی، مقادیر سرعت موج برشی در عمق‌های مختلف به شرح جدول (۴) می‌باشد:

جدول (۴): نتایج تست درون‌چاهی خاک ساختمانی توریین بادی.

عمق (متر)	سرعت امواج طولی (متر بر ثانیه)	سرعت امواج عرضی (متر بر ثانیه)	ضریب پواسون
۱/۵	۷۱۵	۲۹۵	۰/۳۹۸
۳	۸۳۹	۳۶۰	۰/۳۸۸
۴/۵	۱۱۴۹	۵۳۶	۰/۳۶۱
۶	۱۲۵۹	۵۶۴	۰/۳۷۴

زاویه اتساع بر حسب درجه به کار گرفته می‌شود. صرف‌نظر از لایه‌های بسیار پیش‌تحکیم یافته، خاک‌های رسی مقدار کمی اتساع نشان می‌دهند ($\psi = 0$). اتساع ماسه به دو عامل چگالی و زاویه اصطکاک وابسته است که از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد (Gatmiri, 1996). برای مقادیر $\phi < 30^\circ$ اگرچه زاویه اتساع همواره صفر است اما یک مقدار منفی کوچک برای (ψ) در ماسه‌های بسیار شل واقعی است. در این مطالعه مقدار زاویه اتساع برای لایه اول صفر و برای لایه دوم شش درجه منظور شده است.

$$\psi = \phi - 30 \quad (۲)$$

ابعاد خاک ۱۴۰ در ۱۴۰ متر در نظر گرفته شده است و لذا مرزهای جاذب در امتداد المان‌های محدود انتهایی و به صورت تک المان طولی نامحدود (Infinite) در هر چهار وجه پی و به طول ۷۰ متر تعریف شده‌اند. برای تعریف آن در مازول job در بخش job manager یک write input گرفته می‌شود و در word شماره المان‌های مرز جاذب به صورت نامحدود تعریف گردیده‌اند (Cin3D8R).

مقدار فشار ژئواستاتیکی از رابطه (۳) به دست می‌آید (Gatmiri, 1996).

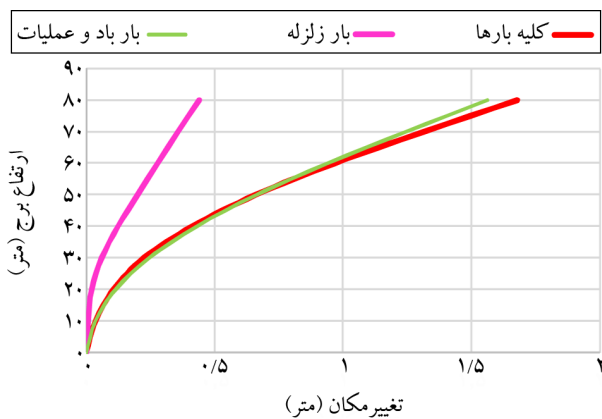
$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (۳)$$

که در آن (ρ) جرم حجمی خاک، (g) شتاب ثقل زمین و (h) ارتفاع خاک می‌باشد. در سطح خاک، فشار ژئواستاتیک، برابر با صفر و با افزایش عمق خاک این فشار به تدریج افزایش می‌یابد.

جدول (۵): ۹ فرکانس اول طبیعی برج.

شماره مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
فرکانس طبیعی برج	۰/۸۸۸۱۴	۰/۸۹۹۳۴	۰/۶۴۶۰	۳/۶۵۷۵	۴/۲۲۷۰	۴/۲۵۰۵	۴/۶۸۰۷	۴/۶۸۴۰	۶/۰۲۵۵

گفت در نظر گرفتن بار زلزله در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه، میزان حداکثر جابه‌جایی نوک برج را از ۱/۵۵۱۱ متر به ۱/۶۴۴۹ متر تبدیل نموده است که نشان از افزایش ۷ درصدی تغییر مکان نوک برج بر اثر در نظر گرفتن بار زلزله می‌باشد.


شکل (۱۶): حداکثر تغییر مکان برآیند برج در ارتفاعات مختلف.

۵-۲- حداکثر تنش معادل در ارتفاع برج

همان گونه که مشاهده می‌شود (شکل ۱۷) نمودار تنش در ارتفاع برج هنگامی که بار زلزله اعمال می‌شود به‌طور متوسط معادل ۶۰ درصد مقداری است که بار باد و عملیات اعمال می‌شود. هنگام اعمال کلیه بارها (بار باد و عملیات و بار زلزله) تنش معادل از پایه با مقدار حدود ۹۰ مگاپاسکال شروع و در ارتفاع ۲۰ متری برج به میزان ۱۴۰ مگاپاسکال رسیده و از آنجا شروع به کم شدن می‌کند تا در ارتفاع ۳۰ متری بالغ بر ۱۲۶ مگاپاسکال و از آنجا تا ارتفاع ۵۰ متری رو به افزایش است تا اینکه مقدار حداکثر خود را بالغ بر ۱۵۰ مگاپاسکال در این ارتفاع ثبت می‌نماید و از آن ارتفاع به بالا این تنش کاهش پیدا می‌نماید که کمترین مقدار در نوک برج و در ارتفاع ۸۰ متری به ۳۸ مگاپاسکال می‌رسد. اثر زلزله در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه در تراز ۵۰ متری برج (تراز حداکثر تنش معادل) باعث افزایش ۳۶ درصدی تنش گردیده است.

زمان تناوب اصلی (مود اول) برج توربین بادی به‌دست آمده از آنالیز مودال با زمان تناوب اصلی به‌دست آمده از فرمول ارائه شده در پیوست ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۳ ایران جهت پاندول‌های وارونه مقایسه گردید (BHRC, 2005) و همان‌گونه که مشاهده می‌شود اختلاف زمان تناوب از رابطه (۵) و رابطه (۶) در حدود یک درصد می‌باشد.

زمان تناوب اصلی (مود اول) از جدول (۴) عبارت است

از:

$$T = \frac{1}{0.88814} = 1.126 \text{ sec} \quad (5)$$

زمان تناوب اصلی نوسان جرم متمرکز در انتهای طره بر اساس

پیوست ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران عبارت است از:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P'}{g} \times \frac{l^3}{3EI}} = 2\pi \sqrt{\frac{187 \text{ ton}}{9.81 \text{ m/s}^2} \times \frac{80^3 \text{ m}^3}{3 \left(21414041 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) (4.78 \text{ m}^4)}} = 1.20 \text{ sec} \quad (6)$$

$$P' = P + \frac{33}{140} ql = 145 \text{ ton} + \frac{33}{140} 177 \text{ ton} = 187 \text{ ton} \quad (7)$$

P = وزن جرم متمرکز؛ q = وزن واحد طول طره؛ l = طول طره؛

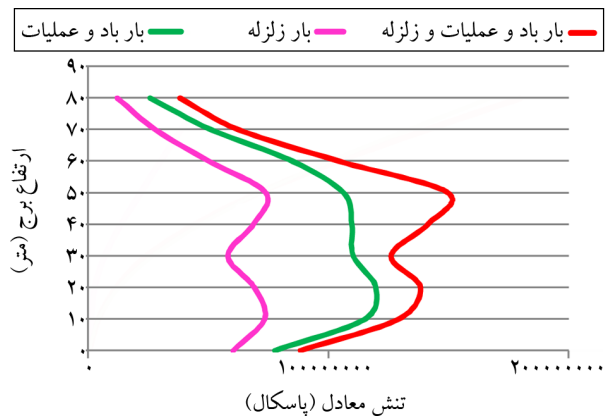
g = شتاب ثقل؛ E = مدول ارتجاعی و I = ممان اینرسی مقطع

۵- نتایج

۵-۱- حداکثر تغییر مکان برآیند در ارتفاع برج

حداکثر تغییر مکان در نوک برج (شکل ۱۶) اتفاق افتاده است که در حالت بار زلزله ۴۳۹۳/۰ متر و در حالت بار باد و عملیات ۱/۵۶۰۷ متر و در حالتی که بار باد و عملیات و زلزله توأم وارد می‌شود معادل ۱/۶۷۷۴ متر می‌باشد، بر این اساس حداکثر تغییر مکان ایجاد شده بر اثر بار زلزله در نوک برج حدود ۲۸ درصد بار باد و عملیات با سرعت ۱۱ متر بر ثانیه بوده است. همچنین می‌توان

دیده می‌شود، تغییر مکان نسبی برج است که عمدتاً به دلیل اثر مستقیم باد ایجاد شده است. تا ثانیه ۳۰م هرچه از روی فونداسیون به سمت ترازهای بالاتر برج می‌رویم تغییر مکان‌ها نوسانات بیشتری دارند و از ثانیه ۳۰م به بعد، به دلیل قطع نیروی زلزله، نوسانات تغییر مکان کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند و هرچه از تراز روی فونداسیون به سمت نوک برج می‌رویم این نوسانات و مقادیر حداکثر آن، افزایش پیدا می‌کند.



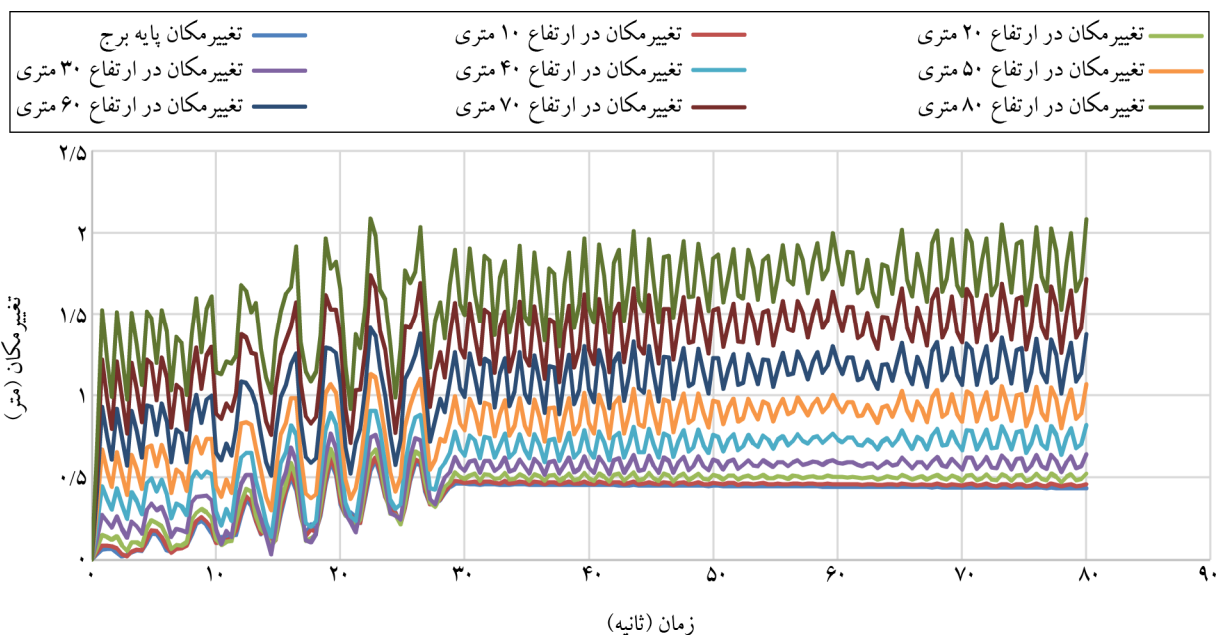
شکل (۱۲): حداکثر تنش معادل (میزس) در ارتفاع برج برای حالت بارهای مختلف.

۴-۵- تنش معادل در ارتفاعات مختلف برج در طول زمان

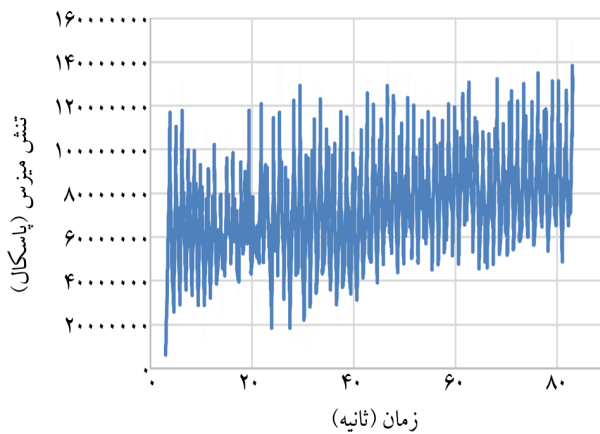
حداکثر تنش معادل در ارتفاع ۵۰ متری برج، در ثانیه ۱۹/۳۹۸ و هنگام حضور کلیه نیروها به میزان ۱۵۰ مگا پاسکال بالغ گردید. البته در ارتفاع ۲۰ متری نیز یک پیک با تنشی در حدود ۱۳۸ مگاپاسکال شاهد بودیم. با مشاهده نمودارهای تنش در ارتفاعات مختلف شکل‌های (۱۹) تا (۲۷)، مشخص می‌شود که حد فاصل ثانیه ۱۵ الی ۲۵، در ارتفاع ۳۰ متر به بالا یک پیک تجربه شده است و این در حالی است که هر دو نیروی باد و زلزله حضور دارند. درحالی‌که تا قبل از ارتفاع ۳۰ متری حداکثر تنش در ثانیه‌های آخر و هنگام حضور فقط نیروهای باد افتاده است. به خوبی مشاهده می‌شود که هرچه به سمت ترازهای بالای برج می‌رویم

۳-۵- تغییر مکان کلی برج در طول زمان در ارتفاعات مختلف برج

در شکل (۱۸) ۳۰ ثانیه اول که هم نیروی باد و هم نیروی زلزله داریم، هرچه بالاتر می‌رویم، تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابند و در ثانیه ۳۰م یک کاهش به دلیل قطع نیروی زلزله اتفاق می‌افتد و در نهایت بیشترین تغییر مکان نسبی در نوک برج بیشتر از ۲ متر، در ثانیه ۸۰م تجربه می‌شود. در ۳۰ ثانیه اول به دلیل وجود تغییر مکان خاک ناشی از زلزله، مجموع تغییر مکان خاک و تغییر مکان نسبی برج را داریم، اما از ثانیه ۳۰ به بعد هرچه تغییر مکان در برج

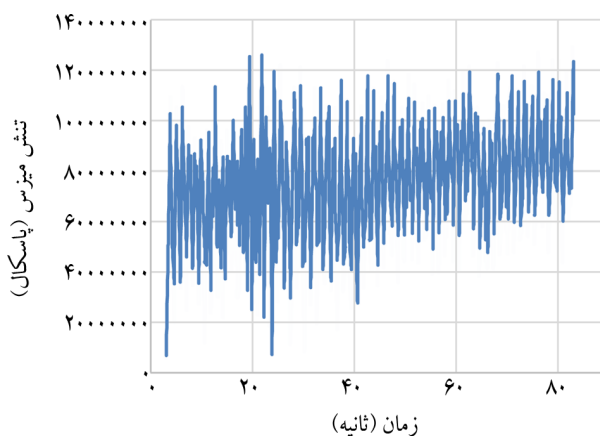


شکل (۱۸): نمودارهای تغییر مکان کلی در ارتفاعات مختلف برج بر حسب زمان.



شکل (۲۱): حداکثر تنش معادل در تراز ۲۰ متری

در شکل (۲۲)، تراز ۳۰ متری برج بیشترین نوسان تنش از ثانیه ۱۷ الی ۲۰ اتفاق افتاده است و حداکثر تنش، در ثانیه ۲۲ و به میزان ۱۲۶ مگاپاسکال رسیده است. هرچه به سمت ثانیه‌های آخر می‌رویم دامنه نوسانات کاهش پیدا می‌کند و در ثانیه ۸۰ ام تنش حداکثر به ۱۲۳ مگاپاسکال می‌رسد.



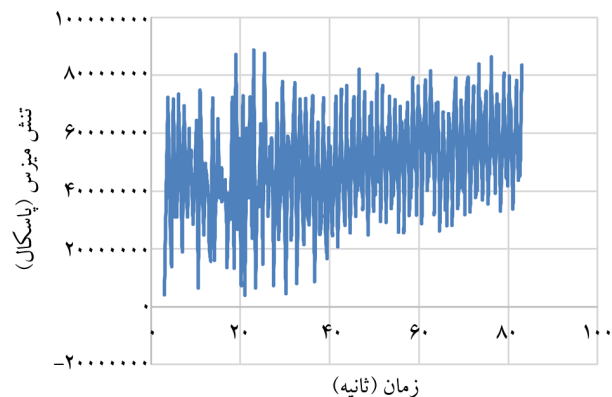
شکل (۲۲): حداکثر تنش معادل در تراز ۳۰ متری.

در شکل‌های (۲۳) و (۲۴)، دو تراز ۴۰ و ۵۰ متری برج رفتار مشابهی نسبت به هم دارند، به طوری که دامنه نوسانات از ابتدا تا ثانیه ۲۴ ام افزایشی و از آن به بعد تا آخر، دامنه نوسانات کاهش پیدا نموده است. در تراز ۴۰ متری حداکثر تنش در ثانیه ۱۹/۴۰ به میزان ۱۴۰ مگاپاسکال و در تراز ۵۰ متری نیز در ثانیه ۱۹/۴۰ و به میزان ۱۵۰ مگاپاسکال بالغ گردیده است. در ثانیه ۸۳ ام در تراز ۴۰ متری، تنش ۱۲۵ مگاپاسکال و در تراز ۵۰ متری تنش ۱۳۰ مگاپاسکال تجربه شده است.

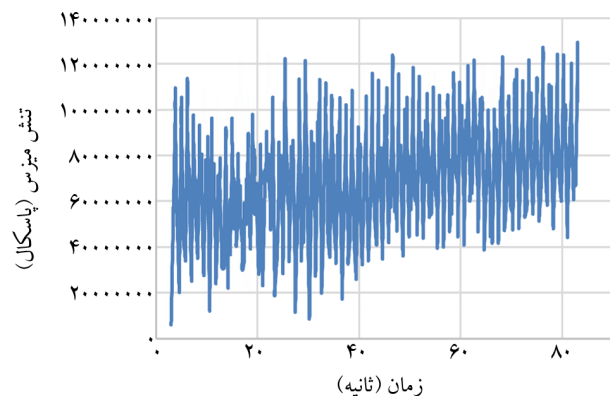
از شدت نمودار تنش در زمان پایانی اعمال نیروی باد، شدت تنش‌ها بیشتر کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه در ۳۰ ثانیه اول، نیروی زلزله قطع می‌شود، بیانگر این نکته است که تنش معادل در ارتفاعات بالای برج تأثیرپذیری بیشتری از نیروی زلزله دریافت نموده است.

با توجه به شکل (۱۹)، تنش معادل در تراز صفر، مشاهده می‌شود حداکثر تنش در ثانیه ۲۳ ام و حدود ۸۷ مگاپاسکال بالغ می‌گردد و در محدوده ثانیه ۱۵ بیشترین نوسان وجود دارد و به تدریج از شدت نوسان و میزان حداکثر تنش میزس کم شده و در نهایت به حدود ۸۲ مگاپاسکال در ثانیه ۸۰ ام می‌رسد.

با توجه به شکل‌های (۲۰) و (۲۱)، در تراز ۱۰ و ۲۰ متری برج، حداکثر تنش در تراز ۱۰ متری در ثانیه ۸۳ ام و بالغ بر ۱۳۰ مگاپاسکال و در تراز ۲۰ متری در ثانیه ۸۳ ام و بالغ بر ۱۳۸ مگاپاسکال می‌باشد؛ و دامنه نوسانات از تراز ۱۰ تا ۲۰ در حال کم شدن است ولی تنش حداکثر نسبت به تراز پایه افزایش پیدا نموده است.



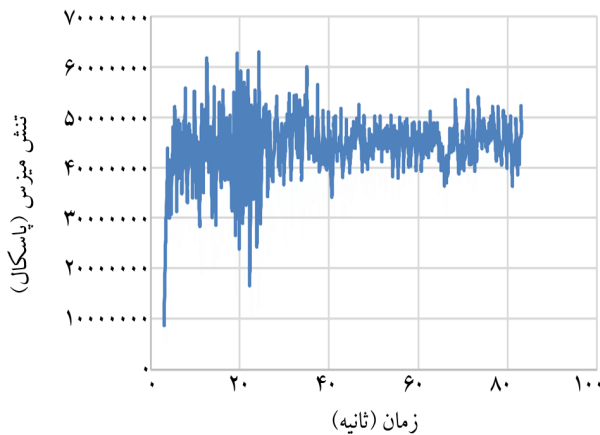
شکل (۱۹): حداکثر تنش معادل در تراز صفر.



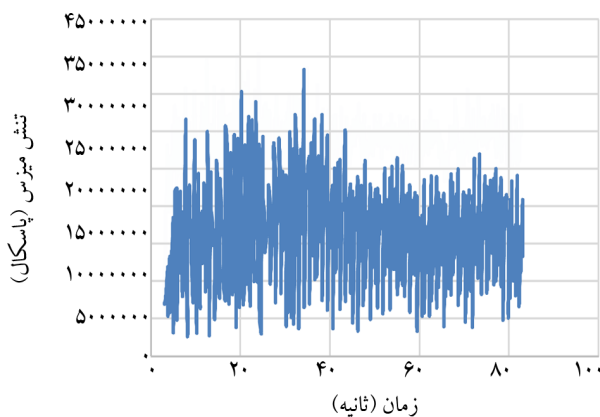
شکل (۲۰): حداکثر تنش معادل در تراز ۱۰ متری.

بیشترین نوسان و مقدار تنش در تراز ۶۰ متری برج، بین ثانیه ۱۹ ام الی ۲۴ ام اتفاق افتاده است که در این زمان هم باد و هم زلزله حضور داشته‌اند.

در شکل (۲۶) تراز ۷۰ متری برج، حداکثر تنش در ثانیه ۱۹/۴۰ بالغ بر ۶۳ مگاپاسکال گردیده است. از ثانیه صفر تا ثانیه ۲۴ ام دامنه نوسانات افزایش داشته و از آن به بعد تا آخر (ثانیه ۸۳ ام) این دامنه کاهش داشته است و در ثانیه ۸۳ ام، تنش بالغ بر ۵۲ مگاپاسکال شده است. این نمودار نشان می‌دهد که حداکثر تنش در زمان حضور نیروی زلزله و باد اتفاق افتاده است.

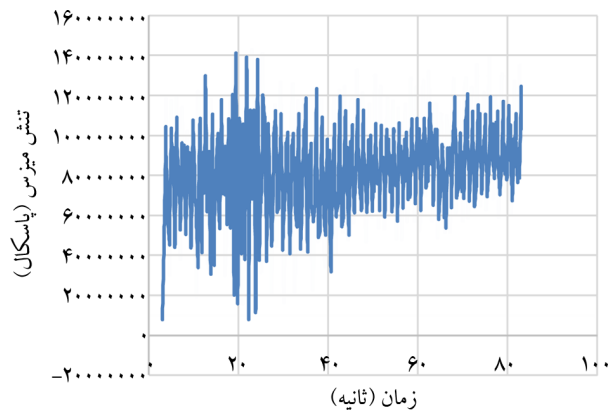


شکل (۲۶): حداکثر تنش معادل در تراز ۷۰ متری.

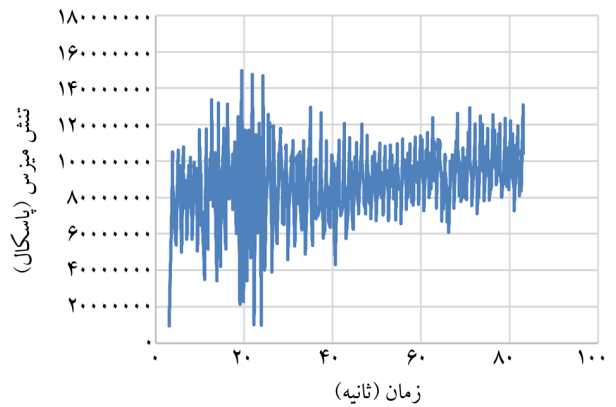


شکل (۲۷): حداکثر تنش معادل در تراز ۸۰ متری.

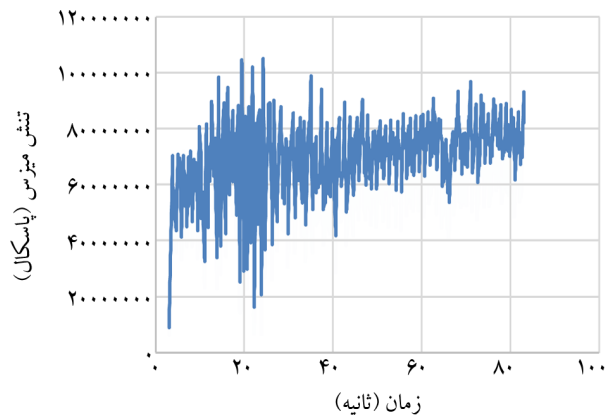
در شکل (۲۷) تراز ۸۰ متری برج، حداکثر آن در ثانیه ۳۴ بالغ بر ۳۸ مگاپاسکال گردیده است. دامنه نوسانات تا ثانیه ۳۴ افزایش و از آن به بعد کاهش داشته است. بیشترین تنش در زمان حضور باد و زلزله توأم، ایجاد شده است.



شکل (۲۳): حداکثر تنش معادل در تراز ۴۰ متری.



شکل (۲۴): حداکثر تنش معادل در تراز ۵۰ متری.



شکل (۲۵): حداکثر تنش معادل در تراز ۶۰ متری.

در شکل (۲۵)، تنش در تراز ۶۰ متر مشاهده می‌شود، دامنه نوسانات تا ثانیه ۲۴ ام افزایش و پس از آن تا آخر کاهش پیدا نموده است. حداکثر تنش در ثانیه ۲۴/۱۹ بالغ بر ۱۰۵ مگاپاسکال گردیده است، پس از آن میزان حداکثر تنش کاهش پیدا نموده و در ثانیه ۸۳ ام به ۹۲ مگاپاسکال رسیده است.

۶- نتیجه گیری

است در صورتی که حداکثر تنش معادل در تراز ۵۰ متری در زمان حضور باد و زلزله اتفاق افتاده است.

در این مطالعه شبیه سازی باد اغتشاشی برای سرعت اسمی ۱۱ متر بر ثانیه بار باد با استفاده از نرم افزار TurbSim انجام و پس از مدل سازی آیرودینامیک و دینامیک پره توربین و توربین بادی ۲ مگاوات ملی ایران با برج فولادی پوسته ای به ارتفاع ۸۰ متر و قطر روتور ۱۰۳ متر در نرم افزار FAST، محاسبه بارهای باد و بارهای عملیاتی در بالای برج با استفاده از این نرم افزار، در مدت ۸۰ ثانیه به دست آمده است و سپس رکورد زلزله به دست آمده از مطالعات تحلیل خطر با زمان ۳۰ ثانیه، با استفاده از نرم افزار DeepSoil و مشخصات خاک به روی بستر سنگی برده شده است، سپس با مدل سازی نمونه واقعی و کاربردی توربین بادی ۲ مگاوات ملی ایران شامل: برج و پی و خاک دو لایه با ضخامت ۶ متر، در نرم افزار ABAQUS و لحاظ نمودن اثر اندرکنش خاک و سازه، بارهای باد و عملیات به دست آمده از خروجی نرم افزار FAST به بالای برج وارد شد و رکورد زلزله از خروجی نرم افزار DeepSoil به بستر سنگی داده شد و در نهایت مدل مزبور از روش المان محدود در نرم افزار ABAQUS، به صورت دینامیکی آنالیز گردید و نتایج زیر به دست آمد:

۱. اثر بار زلزله در میزان تنش معادل محسوس بود ولی در تغییر مکان ها از حساسیت کمتری برخوردار بود.
۲. نمودارهای دینامیکی تغییر مکان نشان دادند، دامنه نوسانات و میزان آن در هنگام حضور نیروی زلزله به همراه باد نسبت به حضور باد تنها، مقادیر بیشتری را شامل می شود و از زمان خاتمه یافتن زلزله دامنه نوسانات تغییر مکان، روند کاهشی را تا انتهای زمان اعمال بار باد داشت.
۳. در نمودارهای دینامیکی تنش فون میزس در حالت بار ۱۱ متر بر ثانیه، مشاهده شد، دامنه نوسانات و میزان حداکثر تنش در زمان حضور نیروی زلزله و باد و حدوداً تا ثانیه ۲۴ ام افزایشی و پس از آن کاهشی است. حداکثر تنش فون میزس دارای مقادیر بیشتری در تراز ۲۰ و ۵۰ بود که سهم نیروی زلزله در آن حدوداً ۳۶ درصد بوده است.
۴. حداکثر تنش معادل در تراز ۲۰ متری بر اثر نیروی باد بوده

مراجع

- Anderson, C. (2020). *Wind turbines: Theory and practice*. Cambridge University Press.
- Austin, S., & Jerath, S. (2017). Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 323-331.
- BHRC. (2005). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard no. 2800-05 (Third edition), Iran (in Persian)*. Building and Housing Research Center.
- Díaz, O., & Suárez, L. (2014). Seismic analysis of wind turbines. *Earthquake Spectra*, 30(2), 743-765.
- Esmaili, V., Mohtashami, E., Salehi-Ahmadabad, M., & Shoostari, A. (2016). A comparison between equivalent static and time-history approaches in seismic analysis of wind turbines. *9th National Congress on Civil Engineering*. Mashhad, Iran.
- Gatmiri, B. (1996). *Guide to the Analysis of Soil-Structure Dynamic Interaction and Its Effects on the Dynamic Response of the Structure, Iran (in Persian)*.
- Gesualdo, A., Guadagnuolo, M., & Penta, F. (2018). Dynamic shear behaviour of truss towers for wind turbines. *International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, 1141*. Moscow, Russian Federation. doi:10.1088/1742-6596/1141/1/012078.
- Ghaemmaghami, A., Mercan, O., & Kianoush, R. (2016). Seismic soil-structure interaction analysis of wind turbines in frequency domain: Seismic soil-structure interaction analysis of wind turbines. *Wind Energy*, 125-142.
- Harte, M., Basu, B., & Nielsen, S. (2012). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 45, 509-518. doi:https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.041
- Huo, T., Tong, L., & Zhang, Y. (2018). Dynamic response analysis of wind turbine tubular towers under long-period ground motions with the consideration of soil-structure interaction. *Advanced Steel Construction*,

combination of seismic and aerodynamic loads. *Renewable Energy*, 117, 1122-1134.

Zhao, X., & Maisser, P. (2006). Seismic response analysis of wind turbine towers including soil-structure interaction. *Journal of Multi-Body Dynamics*, 220(1), 53-61.

Zhu, C., & Li, Y. (2018). Reliability analysis of wind turbines. *Stability Control & Reliable Performance of Wind Turbines*, 169-186.

227-250.

Katsanos, E., Thöns, S., & Georgakis, C.T. (2016). Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review. *Wind Energy*, 19(11), 2113-2133. doi: <https://doi.org/10.1002/we.1968>.

Li, W., Huang, J., & Du, Y. (2019). Dynamic response analysis of wind turbines under long-period ground motions. In Y.W. Zhou, *Data Mining in Structural Dynamic Analysis*, 65-84. Singapore: Springer.

Ming Yang Smart Energy (n.d.). Retrieved from <http://www.myse.com.cn>.

Prowell, I. (2011). *An Experimental and Numerical Study of Wind Turbine Seismic Behavior*. San Diego: University of California.

Sermet, F., Ensar Yigit, M., Ergun, S., & Hokelekli, E. (2020). Dynamic analysis of different type of wind turbine towers under wind. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 3(3), 204-215.

Shah, H.J., & Desai, A.K. (2022). Comparison of monopole and hybrid wind turbine tower response for seismic loading under operational conditions. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 10(7), 2557-2575.

Smith, V., & Mahmoud, H. (2016). Multihazard assessment of wind turbine towers under simultaneous application of wind, operation, and seismic loads. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(6).

STS CO. (2011). *Soil Mechanics Report, Iran (in Persian)*.

Wiser, R., Millstein, D., Bolinger, M., Jeong, S., & Mills, A. (2021). The hidden value of large-rotor, tall-tower wind turbines in the United States. *Wind Engineering*, 45(4), 857-871. doi: 10.1177/0309524X20933949

Witcher, D. (2005). Seismic analysis of wind turbines in the time domain. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 8(1), 81-91.

Wolf, J.P., & Deeks, A.J. (2004). *Foundation Vibration Analysis: A Strength of Materials Approach*. Elsevier.

Yuan, C., Chen, J., Li, J., & Xu, Q. (2017). Fragility analysis of large-scale wind turbines under the

Numerical and Comparative Investigation of Dynamic and Seismic Behavior of Wind Turbine Towers by Finite Element Method

Shahram Tavakkoli Farimani¹, Nemat Hassani^{2*}, Hamid Mohammadnezhad³ and Aidin Gaznavi⁴

1. M.Sc. Graduate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: N_hassani@sbu.ac.ir
3. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Renewable Energy Research Group, Power Research Institute, Tehran, Iran

Turning to clean energy is inevitable, among which wind energy is one of the most common and available. The use of wind energy due to its known advantages over other renewable energies has caused the technology of wind turbines to grow more, and this has led to the increase in the capacity of wind turbines and the commercialization of larger sizes. By increasing the capacity of wind turbines, the size of the rotor and consequently the height of the tower necessarily increase. Therefore, the design of wind turbine towers more goes complex day by day, and must be done specifically on a case-by-case basis. For this purpose, wind turbines should be modeled completely with all details. One of the most expensive parts of wind turbines is its tower. Considering the whole applied forces and design criteria and fatigue base on the regulations and guidelines is necessary to achieve a safe performance. In addition to these factors, in seismic prone areas the dynamic earthquake forces should be considered in analysis and design of towers. Therefore, in this study, we have tried to study the seismic behavior of a real tower model in comparison with other dynamic forces, in order to obtain the amount and manner of effect of each force. Standards generally specify design load combinations for ultimate load and fatigue load analyses. The speed of 11 m/s is the speed at which, according to the power generation diagram of the studied turbine, the speed of the turbine reaches its maximum power, and it is assumed that the turbine will be installed in a site where the wind will be at this speed most of the time, and the probability of earthquake occurrence at this speed is more than other modes.

Therefore, considering the emphasis on considering the earthquake force in seismic areas along with other forces acting on the wind turbine in the new versions of the regulations in this field, and the seismicity of Iran, a comparative analysis of seismic load with other forces acting on the wind turbine based on Standard GL, chapter 4, Table 4.3.2 for turbulent wind of 11 m/s, in the state of zero deviation angle for the 2 MW national wind turbine of Iran, with an 80-meter steel tower and a 55-meter 3-bladed rotor, in a complete and practical model, with the modeling of the steel tower structure and concrete foundation and soil layers in the case construction. The comment has been analyzed and investigated by the dynamic finite element numerical method using Abaqus software. Considering the location of this wind turbine, with soil layers 6 meters deep, the maximum change in the location of the tip of the tower by considering the seismic load increased by about 7%, but the significant increase in the equivalent stress at the height of 50 meters of the tower, despite the low depth of soil layers. The lack of significant acceleration of the earthquake from the rock bed to the earth's surface was obtained, amounting to 36%. Therefore, the necessity for simultaneous consideration of earthquake load along with the wind load was well concluded.

Keywords: Wind Turbines, Dynamic Analysis, Seismic Behavior, Soil-Structure Interaction.