

## ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Effectiveness of viscous damper on vibrations control of full -height lattice tower under wave and wind excitations in time-domain

Marzeye Emami<sup>1</sup>, Reza Dezvareh<sup>2,\*</sup>, Seyed amin Mousavi<sup>3</sup>

1 . MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2 . Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3. Assistant Professor, The Science and Technology Park of University of Tehran, Tehran, Iran

## ARTICLE INFO

**Article History:**

Received: 04/10/2021

Revised: 02/01/2022

Accepted: 16/01/2022

**Keywords:**

Vibrations control  
Viscous damper  
Wind turbine  
time-domain

\*Corresponding author:

[rdezvareh@nit.ac.ir](mailto:rdezvareh@nit.ac.ir)

orcid :0000-0002-4330-2194

doi:10.52547/joc.13.51.1

doi: 20.1001.1.15621057.1401.13.51.1.4

## ABSTRACT

**Background and Objectives:** as the expansion of offshore wind farms in the world and offshore wind turbines to generate electricity, it is significant to consideration the support structures of wind turbines and also to improve their productivity by considering the irregular and accidental conditions of offshore areas. In this study, the efficiency of viscous dampers, that known as one of the passive control methods in vibrations control system of structures as well as offshore platforms, in improving the response of full-height lattice tower for an offshore wind turbine in the time-domain analysis is investigated. For this purpose, several dampers are used diagonally on the platform and also along the legs to determine its best efficiency.

**Methods:** The structure, which is the platform of a 5 MW wind turbine in the North Sea, was modeled using Fast, Abaqus, and Sap2000 software, as well as the Simulink model was used to solve the equations of motion and determine the response of the lattice tower structure, which was considered as a shear model. structural responses were calculated using time-domain analysis and under wave and wind excitations. The Kaimal and Pierson-Moskowitz spectrum were used to apply the wind and wave forces, The wave-induced hydrodynamic forces were calculated based on the airy linear wave theory and the wind-induced aerodynamic forces were calculated based on the blade element momentum theory.

**Findings:** Based on the structure responses in different sea states and considering the condition with a significant wave height of 1.99354 meters and wind speed of 12 meters per second, which has led to the most vibrations in the structure, The results obtained from the responses of the structure equipped with viscous dampers show that if the diagonal brace elements at certain elevations are removed from the structure and the viscous dampers are replaced diagonally, the structure vibrations have not been reduced significantly and the drift of the structure where the viscous damper is located has increased compared to the structure without the damper, so that in one case which equipped with dampers The RMS displacement of the wind turbine Nacelle has increased to 19% compared to structures without dampers, while the results show that considering viscous dampers vertically and along the legs of lattice tower, the wind turbine Nacelle level displacement has been significantly reduced compared to the model without dampers.

**Conclusion:** Due to the geometry and cantilever behavior of the full-height lattice tower in which the relative displacement of the floors is due to the structure rotation, by viscous dampers placement diagonally in which reduces the rigidity of the platform structure due to the removed brace elements do not have been seen a significant effect on energy dissipation, while by the viscous damper placement along the legs of the structure, a greater effect have been observed on energy dissipation and vibration control of this structure. The use of various types of systems in vibration control to improving the response of the full-height lattice tower structure that support the structure of wind turbine can be investigated in future research.



NUMBER OF TABLES

3



NUMBER OF FIGURES

13



NUMBER OF REFERENCES

19

## مقاله پژوهشی

## تأثیر میراگر ویسکوز در کنترل ارتعاشات برج مشبک تمام‌قد تحت نیروهای موج و باد در حوزه‌ی زمان

مرضیه امامی<sup>۱</sup>، رضا دزواره رسانی<sup>۲\*</sup>، سید امین موسوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار، پارک علم و فناوری دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶

## واژگان کلیدی:

کنترل ارتعاشات

میراگر ویسکوز

توربین بادی

حوزه زمان

**پیشینه و اهداف:** با گسترش مزارع باد فراساحلی در جهان و توربین‌های بادی فراساحلی به منظور تولید انرژی برق، توجه به سازه‌های نگهدارنده‌ی توربین‌های بادی و همچنین بهبود بهره‌وری آن‌ها با در نظر گرفتن شرایط نامنظم و تصادفی مناطق فراساحلی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه کارایی میراگر ویسکوز که به عنوان یکی از روش‌های کنترلی غیر فعال در کنترل ارتعاشات سازه‌های موجود و همچنین سکوه‌های دریایی شناخته شده است، در بهبود پاسخ یک برج مشبک تمام‌قد توربین بادی دریایی با استفاده از تحلیل در حوزه‌ی زمان بررسی می‌شود. بدین منظور از چندین جانمایی میراگر به صورت قطری و در امتداد پایه‌های سکو، به منظور تعیین بیشترین کارایی آن استفاده شده است.

**روش‌ها:** سازه‌ی مورد بررسی که سکوی یک توربین بادی 5 MW در دریای شمال است، با استفاده از نرم‌افزارهای Fast، Sap2000 و Abaqus مدل‌سازی شده و همچنین از مدل Simulink برای حل معادلات حرکت و تعیین پاسخ سازه‌ی برج مشبک که به صورت یک مدل برشی در نظر گرفته شد استفاده شده است، پاسخ‌های سازه با استفاده از آنالیزهای در حوزه زمان و تحت تحریکات توأم موج و باد محاسبه شدند. به منظور اعمال نیروهای ناشی از باد و موج به ترتیب از طیف Kaimal و Pierson- moskowitz استفاده شده است، نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از موج بر اساس تئوری موج خطی ایری و نیروهای آیرودینامیکی ناشی از باد براساس تئوری حرکت عنصر تیغه محاسبه شدند.

**یافته‌ها:** بر اساس پاسخ‌های سازه در شرایط مختلف دریایی و با در نظر گرفتن حالتی از دریا با ارتفاع موج مشخصه ۱/۹۹۳۵۴ متر و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه که منجر به بیشترین ارتعاشات در سازه مورد نظر شده است، نتایج به دست آمده از پاسخ سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوز نشان می‌دهد که در صورتی که المان‌های فرعی قطری در ترازهای مشخصی از سازه حذف شدند و میراگر ویسکوز به صورت قطری جایگزین آن‌ها شده است ارتعاشات سازه کاهش قابل توجهی نداشته است و جابجایی نسبی ترازهایی از سازه که میراگر ویسکوز در آنجا قرار گرفته شده در مقایسه با سازه‌ی بدون میراگر افزایش یافته است، به صورتی که جذر میانگین مربعات جابجایی تراز قرار گیری ناسل توربین بادی در یکی از مدل‌های سازه مجهز به میراگر در مقایسه با سازه بدون میراگر تا ۱۹٪ افزایش یافته است، در حالی که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با در نظر گرفتن میراگرهای ویسکوز به صورت قائم و در امتداد پایه‌های سکوی توربین بادی، جابجایی تراز قرار گیری ناسل توربین بادی کاهش قابل توجهی در مقایسه با مدل بدون میراگر داشته است.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به هندسه و رفتار طره‌ای سازه‌ی برج مشبک تمام‌قد که جابجایی نسبی طبقات در آن ناشی از دوران سازه است، با جانمایی میراگرهای ویسکوز به صورت قطری که با کاهش سختی سازه‌ی سکو به دلیل حذف المان‌های فرعی قطری همراه است میراگرها در استهلاک انرژی عملکرد مطلوبی نداشتند در صورتی که با جانمایی میراگر در راستای پایه‌های سازه تأثیر بیشتری در استهلاک انرژی و کنترل ارتعاشات این سازه مشاهده شد. به کارگیری انواع مختلفی از سیستم‌های کنترل ارتعاشات در بهبود پاسخ سازه‌ی برج مشبک تمام‌قد که سازه‌ی نگهدارنده‌ی توربین بادی است می‌تواند مورد پژوهش‌های آتی قرار گیرد.

\*نویسنده مسئول

[rdzvareh@nit.ac.ir](mailto:rdzvareh@nit.ac.ir)

000-0002-4330-2194

doi:10.52547/joc.13.51.1

doi:

20.1001.1.15621057.1401.13.51.1.4

## مقدمه

بررسی کردند. در این تحقیق توربین بادی 5-MW در کد آیرو-هیدرو-سروو-الاستیک مدل‌سازی شد. برای اجرای تکنیک‌های کنترلی ابزار شبیه‌سازی کد Fast توسعه داده شد. نتایج این تحقیق تأثیر مثبت TMD بر کاهش ارتعاشات و کاهش بیشتر دامنه‌ی ارتعاشات ایجاد شده در سازه‌ی بارج را نشان داده است. موسوی و همکارانش [۴] در تحقیقی تأثیر سیستم میراگر ستون مایع-گاز تنظیم شده (TLCD<sup>3</sup>) را بر ارتعاشات یک سکوی جکت فراساحلی بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داده است که عملکرد TLCD در کاهش RMS<sup>4</sup> پاسخ‌های سازه تنها به محتوای فرکانسی شتاب زمین بستگی دارد، در صورتی که توانایی آن در کاهش حداکثر پاسخ سازه به محتوای فرکانسی و آرایش پالس شتاب زمین بستگی دارد. Stewart و همکارانش [۵] از سیستم کنترلی غیر فعال TMD برای بررسی بارهای وارد بر تکیه‌گاه مونوپایل یک توربین بادی فراساحلی که تحت ناهماهنگی‌های موج-باد قرار داشتند استفاده کردند. نتایج این تحقیق کاهش بار خستگی در وجه پشت سازه، در حدود ۴٪-۶٪ و بارهای جانبی حدود ۴۰٪ را نشان داده است. Menash و همکارانش [۶] به بررسی بهبود قابلیت اطمینان سیستم توربین بادی با استفاده از TLCD پرداختند، نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد استفاده از سیستم TLCD منجر به کاهش قابل توجهی در جابجایی و گشتاور خمشی در برج توربین شده است. Dinch و Basu [۷] در مطالعه‌ی کارایی MTMD<sup>5</sup> ها را در کنترل سازه‌ی ناسل<sup>6</sup> و برج توربین‌های بادی شناور بررسی کردند نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد MTMD در کاهش ارتعاشات کارایی قابل توجهی دارند حکم آبدادی و همکارانش [۸] در مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ای سازه‌ی توربین بادی فراساحلی پایه کششی شناور مجهز به یک سیستم کنترلی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از یک TMD به منظور کنترل ارتعاشات استفاده شد. مطابق نتایج بدست آمده بکارگیری میراگر با کاهش ارتعاشات منجر به بهبود رفتار ارتعاشی توربین بادی در تمام درجات آزادی شده است. همچنین با کاهش حداکثر میزان جابجایی‌ها و نیز گشتاور پای برج به دلیل حضور این میراگر عمر خستگی سازه نیز افزایش یافته است. دزواره و همکارانش [۹] در پژوهشی از سیستم کنترلی TLCD در کاهش ارتعاشات یک سازه‌ی جکت توربین بادی فراساحلی پرداختند. نتایج این مطالعه تأثیر میراگرها در کاهش ۴۵٪ و ۵۱٪ در انحراف از معیار استاندارد پاسخ جابجایی و حداکثر شتاب در محل ناسل توربین را نشان داده است. Buckley و همکارانش [۱۰] به بررسی ارتعاشات یک توربین بادی فراساحلی با بکاربردن TLCD و در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پرداختند.

شرایط زندگی در نتیجه‌ی افزایش جمعیت جهان به طرز قابل توجهی تغییر خواهد کرد و چالش‌ها و فناوری‌های جدیدی در پیش دارد. با توجه به نیاز همیشگی ملت‌ها به انرژی و گسترده‌ی کاربرد آن، استفاده از سیستم‌هایی جدید برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در این میان توربین‌های بادی دریایی (OWT<sup>1</sup>) که از فناوری‌های جدید در مقیاس بزرگ به حساب می‌آیند با توجه به مزیت‌هایی که دارند می‌توانند منبع مناسبی برای تولید برق و انرژی‌های پاک باشند. آنجا که این سیستم‌ها در مناطق دور از ساحل بکار می‌روند با توجه به سرعت بالای باد، تلاطم و برش باد پایین‌تر در این نواحی و وجود مناطق گسترده می‌توانند برای پروژه‌های بزرگ و استفاده از توربین‌های بزرگ‌تر برای تولید انرژی بیشتر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گیرند. همچنین با در نظر گرفتن شرایط دریایی در مناطق فراساحل، امواج با ارتفاع و انرژی بیشتر، بارگذاری‌های دینامیکی و تصادفی محیط دریا این سازه‌ها باید از مقاومت و عمر مناسبی برخوردار باشند و پاسخ‌های ارتعاشات و شتاب سازه نسبت به نیروهای محرک خارجی از روش‌های مناسبی کاهش یابد. به طور کلی استفاده از روش‌هایی که انرژی وارد بر سازه را تقلیل دهد منجر به کاهش پاسخ سازه می‌شود. استفاده از سیستم‌های کنترل ارتعاشات که با توجه به عملکردشان به سیستم‌های فعال، غیر فعال، نیمه فعال و مرکب تقسیم بندی می‌شوند روش مناسبی برای بهبود رفتار سازه می‌باشد. از روش‌هایی رایج در سیستم‌های کنترلی غیر فعال استفاده از میراگرها می‌باشد. تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی کنترل ارتعاشات سازه‌های دریایی و سکوه‌های مشبک فراساحلی در چندین سال اخیر صورت گرفته است. Wu و Lee [۱] مطالعاتی در زمینه‌ی کنترل ارتعاشات سکوی دریایی با استفاده از میراگر ویسکوالاستیک انجام دادند، در این مطالعه نیروی موج بر اساس تئوری استوکس مرتبه پنجم محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داده است ارتعاشات سازه‌ی سکوی دریایی با بکارگیری میراگر ویسکوالاستیک تا ۵۰٪ کاهش یافته است. Ma و همکارانش [۲] در مطالعه‌ی به بررسی کنترل ارتعاشات یک سکوی جکت فراساحلی با استفاده از میراگر جرمی پرداختند. در این تحقیق ارتعاشات سازه در هر ۲ راستای افقی و قائم به کمک ۲ میراگری که در هر راستا قرار گرفتند بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داده است به منظور بهبود عملکرد میراگر پارامترهایی از جمله نسبت جرم‌ها، نسبت میرایی و نسبت فرکانس‌ها تأثیر گذارند. Lackner و همکارانش [۳] از یک روش کنترل ارتعاشات غیرفعال به منظور کاهش لرزش-های ایجاد شده در توربین بادی دریایی استفاده نمودند، آن‌ها تأثیر استفاده از یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD<sup>2</sup>) بر ارتعاشات ایجاد شده در ۲ سازه‌ی بارج و مونوپایل توربین بادی را

3. Tuned Liquid Column Gas Damper  
4. Root Mean Square  
5. Multiple Tuned Mass Damper  
6. Nacelle

1. Offshore Wind Turbine  
2. Tuned Mass Damper

سازه،  $x(m)$  ارتعاش سازه،  $\dot{x}(m/s)$  سرعت سازه و  $\ddot{x}(m/s^2)$  شتاب سازه می‌باشند.

$$F = F_H + F_A \quad (2)$$

در این معادله  $F_A(N)$  نیروی آیرودینامیکی و  $F_H(N)$  نیروی هیدرودینامیکی تعریف می‌شوند. برای تعیین نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از امواج از معادله‌ی موريسون طبق رابطه (3) استفاده شده است، از آنجا که با استفاده از مدل Simulink اندرکنش بین آب و سازه در محاسبات معادلات حرکت در نظر گرفته می‌شود، در معادله‌ی موريسون سرعت و شتاب نسبی ذرات آب و سازه‌ی توربین بادی لحاظ می‌شود [12].

$$\{F_H\} = \frac{1}{2} \rho C_D [A] (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| + \rho C_I [V] \dot{u} - \rho (C_I - 1) [V] \ddot{x} \quad (3)$$

$\rho(kg/m^3)$  چگالی آب،  $C_D$  ضریب درگ<sup>7</sup>،  $A(m^2)$  سطح اعضا در راستای عمود بر جهت انتشار موج،  $u(m/s)$  بردار سرعت افقی ذرات آب،  $\dot{x}(m/s)$  بردار سرعت افقی سازه،  $C_I$  ضریب اینرسی<sup>8</sup>،  $V(m^3)$  حجم اعضا در راستای عمود بر جهت انتشار موج،  $\dot{u}(m/s^2)$  بردار شتاب افقی ذرات آب و  $\ddot{x}(m/s^2)$  بردار شتاب افقی سازه معرفی می‌شوند. در این پژوهش تحلیل سازه در حوزه‌ی زمانی انجام شده است و بدین منظور از سری زمانی تراز سطح آب که با استفاده از دستور تبدیل سریع معکوس فوریه از طیف Pierson-moskowitz به دست می‌آید برای تعیین سرعت و شتاب ذرات آب استفاده شده است.

$$S(f)_{P-M} = \frac{5}{16 T_p^4 f^5} \exp\left(-\frac{5}{4} (f T_p)^{-4}\right) \quad (4)$$

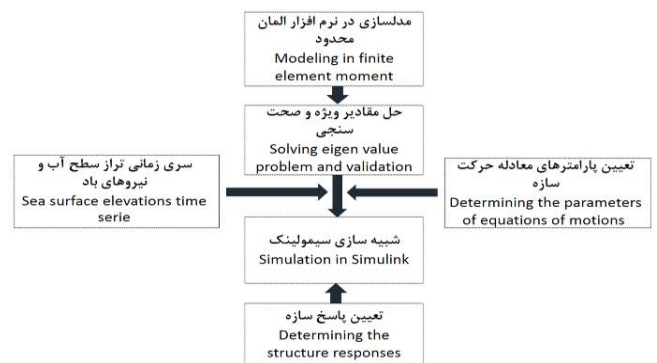
در رابطه طیف Pierson-moskowitz که برای توصیف شرایط دریایی نامنظم و تصادفی بکار می‌رود،  $H_s(m)$  ارتفاع موج مشخصه،  $T_p(s)$  پرپود پیک موج و  $f(s^{-1})$  فرکانس تعریف می‌شوند. نیروهای آیرودینامیکی تحت 3 عامل اصلی سرعت باد، برش باد و اثرات توربولانس هستند. اثر برش باد که وابسته به میانگین سرعت باد می‌باشد بر اساس پروفایل قانون انرژی و بر طبق معادلات (5) و (6) تعریف می‌شوند:

$$V_{w,z} = V_{w,r} \cdot \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_r}{z_0})} \quad (5)$$

$$V_{w,z} = V_{w,r} \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha_{shear}} \quad (6)$$

در این معادلات  $V_{w,z}(m/s)$  سرعت متوسط باد در ارتفاع  $z$ ،  $V_{w,r}(m/s)$  سرعت متوسط باد در ارتفاع  $z_r$ ،  $z_r(m)$  ارتفاع مبنا،

در این بررسی نقش مؤثر اندرکنش خاک-سازه در طراحی TLCD به منظور کنترل ارتعاشات برج توربین بادی مشاهده شد همچنین نتایج نشان داده است که تعیین جرم بهینه و هماهنگی TLCD با فرکانس طبیعی برج توربین بادی در عملکرد مناسب این میراگر نقش بسزایی دارند. در این پژوهش از سیستم کنترل غیر فعال با استفاده از میراگر ویسکوز خطی به منظور بهبود رفتار و کنترل ارتعاشات سازه‌ی برج مشبک توربین بادی فراساحلی استفاده شده است. جعفری و دزواره [11] با استفاده از آنالیز باد-موج افزایشی به بررسی عملکرد سکوی توربین فراساحلی پرداختند، در این مطالعه امواج نامنظم کوتاه مدت به صورت موج نو مفید شده در نظر گرفته شدند، نتایج نشان دادند که پاسخ برج توربین بیشتر تحت تأثیر باد و پاسخ سکوی توربین بیشتر متأثر از نیروهای امواج است. هدف از این پژوهش بررسی کارایی میراگر ویسکوز در بهبود ارتعاشات سازه‌ی توربین بادی فراساحلی و تعیین بهینه‌ترین جانمایی میراگر در کنترل ارتعاشات این سازه است. سازه‌ی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزارهای Fast، Sap و Abaqus مدل‌سازی شده و پس از صحت‌سنجی از شبیه‌سازی مدل، آنالیز تاریخی‌چهی زمانی و حل معادلات حرکت سازه به کمک شبیه‌سازی مدل برشی در Simulink انجام شده است. در شکل (1) فلوجارتی از کل مراحل نشان داده شده است



شکل 1: فلوجارت کل مراحل تحقیق تعیین

## روش پژوهش

### 1. پارامترهای معادلات حرکت

تعیین پاسخ ارتعاشات سازه‌ی توربین بادی در مدل Simulink با استفاده از حل معادلات حرکت دینامیکی انجام می‌شود. طبق رابطه (1) که مربوط به معادله‌ی حرکت دینامیکی سازه‌ی OWT است، نیروهای خارجی مطابق رابطه (2) ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی وارد بر توربین بادی می‌باشند.

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F \quad (1)$$

در این معادله  $M$  ماتریس جرم سازه،  $C$  ماتریس میرایی سازه‌ای،  $K$  ماتریس سختی اعضای سازه‌ای،  $F(N)$  نیروهای خارجی وارد بر

7. Drag  
8. Inertia

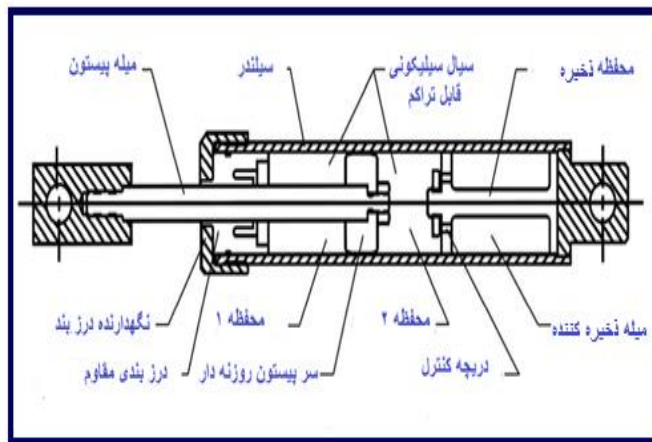
طبق رابطه ۱، برای حل معادله حرکت دینامیکی سازه لازم است ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه محاسبه شوند. مطابق با تعریف تئوریک نرمی سازه که برابر با میزان جابجایی سازه به ازای بار واحد است، ماتریس سختی سازه ی با N درجه آزادی از معکوس ماتریس نرمی سازه محاسبه می‌شود. همچنین پس از تعیین ماتریس جرم سازه، ماتریس میرایی سازه با استفاده از روابط مربوط به میرایی رایله<sup>۱۱</sup> مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (10)$$

در این رابطه M ماتریس جرم و K ماتریس سختی هستند،  $a_0(\text{sec}^{-1})$  و  $a_1(\text{s})$  ضرایب میرایی رایله تعریف می‌شوند.

## ۲. میراگر ویسکوز

در این تحقیق از سیستم کنترل غیر فعال با استفاده از میراگر ویسکوز خطی استفاده شده‌است. در این نوع سیستم‌ها با بهبود عملکرد و رفتار دینامیکی سازه از طریق جذب انرژی، میرایی سازه افزایش می‌یابد. از آنجا که این سیستم‌ها نیازی به منبع محرک خارجی ندارند به طور گسترده‌تری مورد توجه قرار می‌گیرند. این میراگرها سیستمی مشابه با کمک‌فنرها دارند و از مستهلک کننده‌های انرژی وابسته به سرعت معرفی می‌شوند. این نوع میراگر از یک استوانه‌ی فلزی تشکیل شده است که درون آن حاوی سیالی ویسکوز است. با اعمال تحریکات خارجی به سازه سیال ویسکوز درون میراگر بین پیستون و محفظه‌ی میراگر جابجا می‌شود در نتیجه انرژی مکانیکی به انرژی حرارتی تبدیل شده و ارتعاشات سازه کاهش می‌یابد. شکل (۳) تصویری از ساختار میراگر ویسکوز را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار میراگر ویسکوز

$z_0(\text{m})$  طول زبری سطح و  $\alpha_{\text{shear}}$  ضریب قانون انرژی می‌باشند. با توجه به اینکه سرعت واقعی باد در هر موقعیت زمانی و در جهات اطراف تحت تأثیر توربولانس، با میانگین سرعت متفاوت است، برای در نظر گرفتن این پدیده علاوه بر تاریخچه زمانی سرعت باد، می‌توان از تابع چگالی طیف که در واقع چگونگی توزیع انرژی توربولانس باد در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد نیز استفاده کرد. در این تحقیق شدت توربولانس باد با استفاده از طیف Keimal که مطابق رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود، لحاظ شده است.

$$S_{Kaimal}(f) = \frac{\sigma_v^2 4L_v/V_w}{(1+6fL_v/V_w)^{5/3}} \quad (7)$$

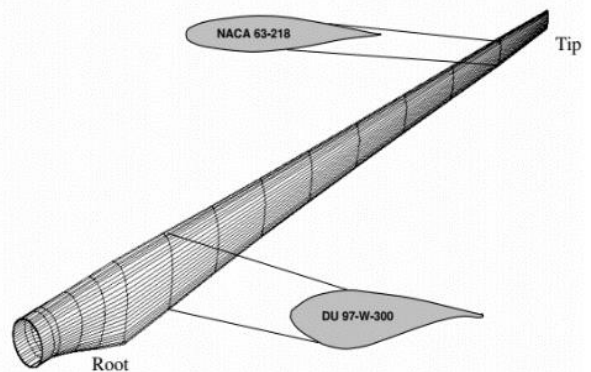
در این رابطه،  $\sigma_v(\text{m/s})$  انحراف استاندارد سرعت باد،  $L_v(\text{m})$  مقیاس طولی،  $V_w(\text{m/s})$  سرعت متوسط باد و  $f(\text{Hz})$  فرکانس می‌باشند. روابط مربوط به محاسبه‌ی نیروهای هیدرودینامیکی که بر اساس اندرکنش بین پره‌های توربین بادی و جریان باد محاسبه می‌شوند، مطابق با تئوری حرکت عنصر تیغه [۱۳]، به کمک ۲ مؤلفه‌ی لیفت<sup>۹</sup> و درگ تعریف می‌شوند. بر اساس فرضیات این تئوری که پره‌های توربین را متشکل از یک سری ایرفویل<sup>۱۰</sup> در نظر می‌گیرد، عملکرد آیرودینامیکی وارد بر پره‌های توربین در نهایت توسط این مقاطع عرضی از پره‌های توربین تعریف می‌شوند. نیروی کل عمود بر صفحه‌ی روتور که صفحه‌ی چرخش پره‌های توربین در نظر گرفته می‌شود مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$T = \int B P_N dr \quad (8)$$

در این رابطه B تعداد پره‌های توربین بادی،  $P_N(\text{N/m})$  نیروی عمود بر صفحه‌ی روتور بر واحد طول که مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود و  $r(\text{m})$  فاصله‌ی بین ایرفویل و مرکز روتور می‌باشند.

$$P_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (9)$$

$L(\text{N/m})$  نیروی لیفت،  $D(\text{N/m})$  نیروی درگ و  $\phi(\text{deg})$  زاویه‌ی بین سرعت نسبی و صفحه‌ی روتور می‌باشند [۱۴].



شکل ۲: پره‌ی روتور توربین بادی و ایرفویل‌های تشکیل دهنده [۴]

11. Rayleigh

9. Lift

10. Airfoil



استفاده از کد مطلب در جدول (۱) مشخص شده است. این نتایج صحت مدل سازی را نشان می دهد.

جدول ۱: مشخصات توربین بادی و صحت سنجی نتایج ارتعاش آزاد

مقدار	مشخصه
۰/۰۱۴۶ m	ضخامت پایه توربین
۰/۶۸ m	قطر پایه توربین
۰/۰۰۵۸۶ m	ضخامت اعضای فرعی
۰/۲۷۲ m	قطر اعضای فرعی
۳۵۰ Ton	جرم توربین
۹۰ m	ارتفاع hub بالای سطح متوسط دریا
۰/۳۶۸ Hz	فرکانس مد اول سازه مدل سازی شده
۰/۴۰۵ Hz	فرکانس مد اول سازه در مرجع

برای تعیین پاسخ سازه و بررسی عملکرد میراگر در کنترل ارتعاشات، از مدل Simulink برای حل معادلات حرکت استفاده شد. به منظور تعیین ماتریس میرایی ناشی از میراگر از نسبت میرایی هدف ۱۰٪ و با فرض میرایی ذاتی ۲٪ سازه استفاده شد، سری زمانی نیروهای آیرودینامیکی ناشی از باد از نرم افزار Fast و با در نظر گرفتن طیف باد کیمال از طریق ساب روتین AeroDyn محاسبه شدند، همچنین سری زمانی تراز سطح آب برای تعیین نیروهای ناشی از امواج با کمک طیف Pierson-moskowitz محاسبه و به عنوان داده های ورودی مدل Simulink تعیین شدند. با تعیین پارامترهای مورد نیاز برای معادله حرکت، سازه ی برج مشبک در Simulink مدل سازی شده و پاسخ ارتعاشات سازه در مدل های سازه ای با و بدون میراگر بدست می آیند. با توجه به اینکه ۲۰ حالت مختلف از شرایط دریایی برای منطقه ی مطالعاتی در نظر گرفته شده است، برای در نظر گرفتن بیشترین کارایی و عملکرد میراگر از پاسخ بالاترین تراز سازه که محل قرارگیری ناسل توربین بادی است تحت بحرانی ترین حالت دریایی استفاده می شود، که بدین منظور بحرانی ترین حالت دریایی با سرعت باد ۱۲ (m/s) و ارتفاع موج مشخصه ۱/۹۹۳۵۴ (m/s) تعیین شده است.

جدول ۲: مشخصات مدل های مختلف سازه مجهز به میراگر

Model	$C_A$	$K_S$ (KN/mm)	$T_S$ (s)
Model 1	۱۷/۱۵	۲۲۹/۱	۲/۹۴
Model 2	۱۶/۲۵	۲۲۸/۰۵	۲/۷۹
Model 3	۱۶/۲۴	۲۲۷/۳۸	۲/۸
Model 4	۱۶/۰۲	۲۲۶/۹۹	۲/۷۷
Model 5	۱۵/۵۵	۲۲۳/۸۵	۲/۷۳

ماتریس میرایی سازه با اضافه کردن میراگر ویسکوز مطابقت رابطه (۱۱) تغییر می کند.

$$[C_m] = [C] + [C_d] \quad (11)$$

در این رابطه  $[C]$  ماتریس میرایی ذاتی سازه و  $[C_d]$  ماتریس میرایی ناشی از اضافه شدن میراگر ویسکوز است. به منظور تعیین ماتریس میرایی میراگر، ضریب میرایی میراگرهای الحاقی به سیستم طبق رابطه (۱۲) که با در نظر گرفتن سختی ثابت برای سازه تعریف شده اند محاسبه می شود [۱۷ و ۱۸]. بر اساس این رابطه با در نظر گرفتن یک نسبت میرایی به عنوان میرایی هدف که در واقع میرایی مورد انتظار با اضافه شدن میراگرها به سیستم تعریف می شود، ضریب میرایی میراگرهای ویسکوز مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$C_A = \frac{(\xi^* - \xi) T_S K_S}{\pi} \quad (12)$$

در این رابطه  $\xi^*$  نسبت میرایی هدف،  $\xi$  نسبت میرایی ذاتی سازه،  $T_S$  (s) پریود اصلی سازه،  $K_S$  (N/m) مجموع سختی طبقات و  $C_A$  (N.s/m) ضریب میرایی هدف با وجود میراگر تعریف می شود. با توجه به اینکه یکی از روش های تعیین نسبت میرایی سازه مطابق رابطه (۱۳)، استفاده از نتایج ارتعاش آزاد سیستم می باشد [۱۹]، بنابراین می توان نسبت میرایی معادل یک سازه ی مجهز به میراگر را با استفاده از نتایج ارتعاش آزاد سازه ی مجهز به میراگر را محاسبه و معادل با نسبت میرایی ذاتی سازه در نظر گرفت.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (13)$$

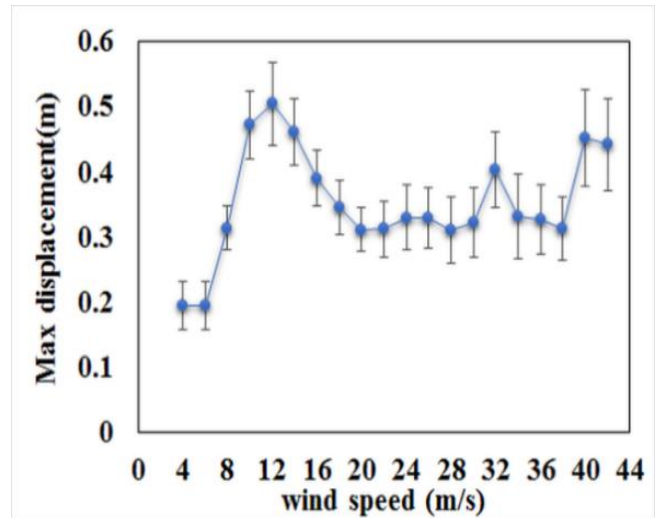
در این معادله،  $i$  شماره پیک اول و  $j$  شماره پیک می باشد  $u_i$  (m) جابجایی سیستم در پیک  $i$  ام و  $u_{i+j}$  (m) جابجایی در پیک  $j + i$  م را نشان می دهد.

## نتایج و بحث

در این تحقیق پس از مدل سازی سازه ی برج مشبک تمام قد با ارتفاع ۱۲۵ m در نرم افزارهای Sap و Abaqus، ماتریس های جرم و سختی محاسبه شدند. در تعیین ماتریس سختی تنها از درجات آزادی انتقالی استفاده شده است و سازه ی مورد نظر به صورت یک مدل برشی در نظر گرفته شد. در مدل سازی این سیستم، جرم توربین به عنوان یک جرم متمرکز در محل قرارگیری ناسل در نظر گرفته شد. عمق منطقه ی مورد مطالعه ۳۵ متر و شرایط دریایی خاص این منطقه در دریای شمال تحت ۲۰ حالت مختلف است [۲۰]. در جدول (۱) مشخصات این سازه و توربین بادی NREL-5MW تعیین شده است. با آنالیز مقادیر ویژه ی ارتعاش آزاد سازه ی مورد نظر، فرکانس های طبیعی سازه و مدهای ارتعاشی تعیین شدند. همچنین نتایج آنالیز مقادیر ویژه ی ارتعاش آزاد این سیستم با

قطری مهاربندی داشته باشد. عملاً با حذف مهاربندها سختی سازه کاهش یافته و سازه نرم‌تر شده است و کاهش سختی منجر به افزایش جابجایی شده است، هر چند با اضافه شدن میراگرها و افزایش میرایی سازه، شتاب وارده کاهش یافته است. در شکل (۱۰) نمونه‌ای از سری زمانی شتاب وارد به تراز ناسل در دو سازه‌ی بدون میراگر و Model 1 نشان داده شده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد این نوع سازه رفتار طرّهای نشان می‌دهد بدین صورت که دریفت هر طبقه ناشی از دوران آن طبقه بوده و تحت تأثیر تغییر شکل برشی آن قرار ندارد. در این نوع چیدمان‌ها میراگرها تحت تغییر مکان کمی قرار گرفته و بنابراین در استهلاک انرژی عملکرد مطلوبی ندارند.

زمانی نیروهای آیرودینامیکی ناشی از باد از نرم‌افزار Fast و با در

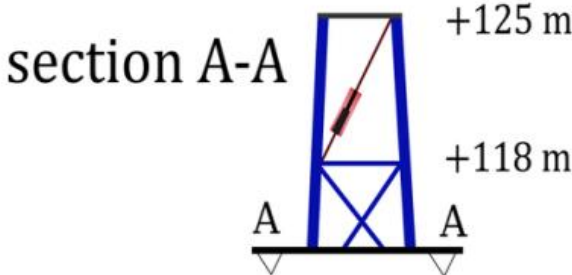


شکل ۴: ماکزیمم و انحراف استاندارد جابجایی تراز ناسل توربین

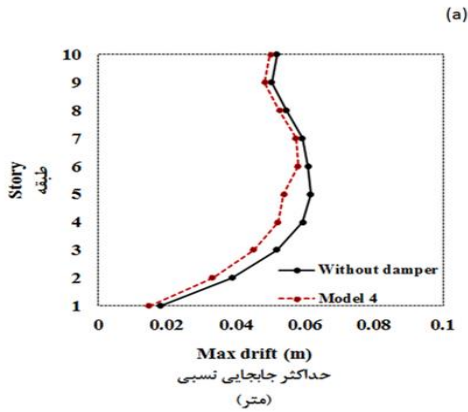
در این حالت مطابق شکل (۴) بیشترین ارتعاش تراز ناسل به ماکزیمم مقدار رسیده است. به منظور بررسی تأثیر میراگر و تعیین بهترین جانمایی و چیدمان میراگر در عملکرد کنترلی آن از چندین جانمایی به صورت قطری استفاده شد. به این ترتیب در برنامه Sap اعضای فرعی در ترازهای تعیین شده در راستای x حذف شدند و میراگر جایگزین می‌شود. سپس پارامترهای مورد نیاز رابطه (۱۲) در مدل‌های سازه با میراگر تعیین شدند.

جدول (۲) مشخصات سازه با در نظر گرفتن چیدمان‌های مختلف میراگر تعریف شده است. در شکل‌های (۵)، (۶)، (۷)، (۸) و (۹) نتایج ماکزیمم دریفت ترازهای سازه‌های مجهز به میراگر تحت شرایط دریایی با سرعت باد ۱۲ (m/s) و ارتفاع موج مشخصه ۱/۹۹۳۵۴ مشخص شدند. در این شکل‌ها جانمایی میراگر در هر مدل نشان داده شده است.

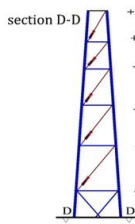
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در چیدمان‌های مختلف میراگر، ماکزیمم دریفت ترازهایی که با حذف مهاربندها، میراگر در آنجا قرار گرفته است در مقایسه با سازه‌ی بدون میراگر افزایش یافته است و یا کاهش قابل توجهی نداشته است، همچنین جابجایی ترازهای سازه‌ها نسبت به مدل اصلی کاهش قابل قبولی نداشته است، بدین منظور از RMS به عنوان معیار مناسبی برای محاسبه کارایی و تأثیر میراگر استفاده شده است. این نتایج در جدول (۳) نشان داده شده اند. از آنجا که برای استفاده از میراگر در این نوع چیدمان‌ها نیاز به حذف مهاربندهای سازه در تراز مورد نظر در هر مدل بوده است، مدل سازه‌ای تغییر کرده و میراگر قطری نمی‌تواند رفتاری مشابه با المان



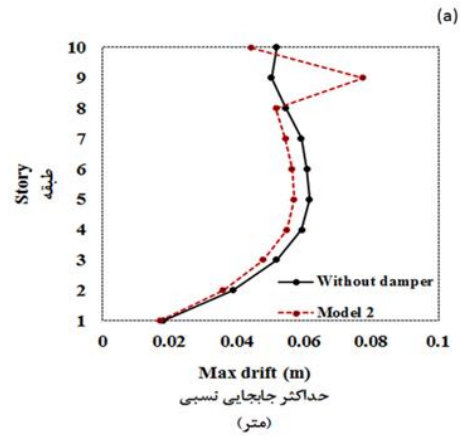
شکل ۵: (a) ماکزیمم دریفت در سازه‌ی بدون میراگر و Model 1، (b) جانمایی میراگر در Model 1



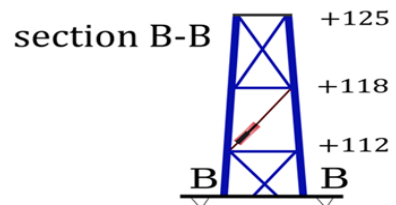
(b)



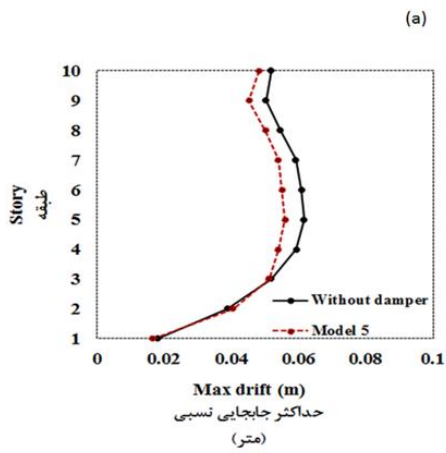
شکل ۸: (a) ماکزیمم دریفت در سازه‌ی بدون میراگر و Model 4، (b) جانمایی میراگر در Model 4



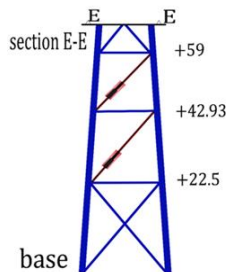
(b)



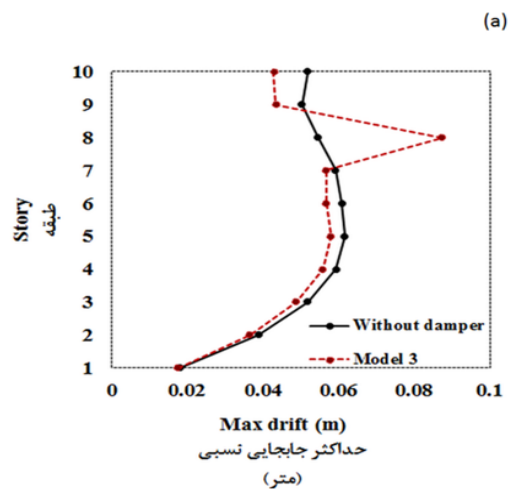
شکل ۶: (a) ماکزیمم دریفت در سازه‌ی بدون میراگر و Model 2، (b) جانمایی میراگر در Model 2



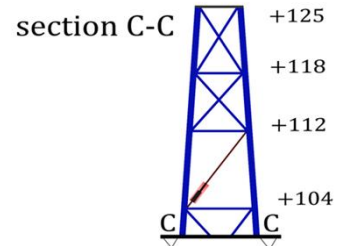
(b)



شکل ۹: (a) ماکزیمم دریفت در سازه‌ی بدون میراگر و Model 5، (b) جانمایی میراگر در Model 5

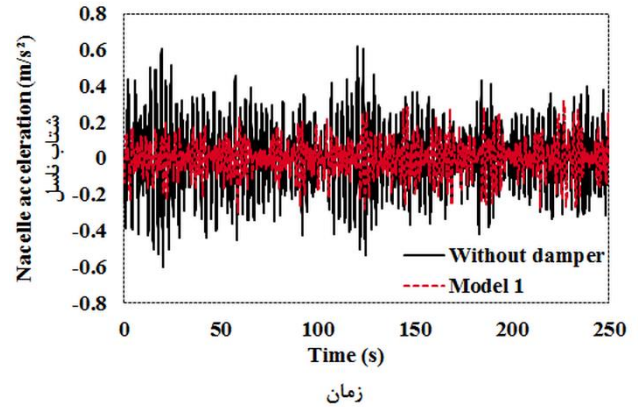
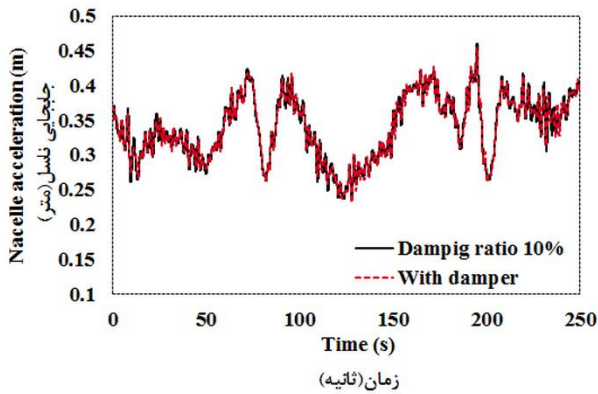


(b)



شکل ۷: (a) ماکزیمم دریفت در سازه‌ی بدون میراگر و Model 3، (b) جانمایی میراگر در Model 3

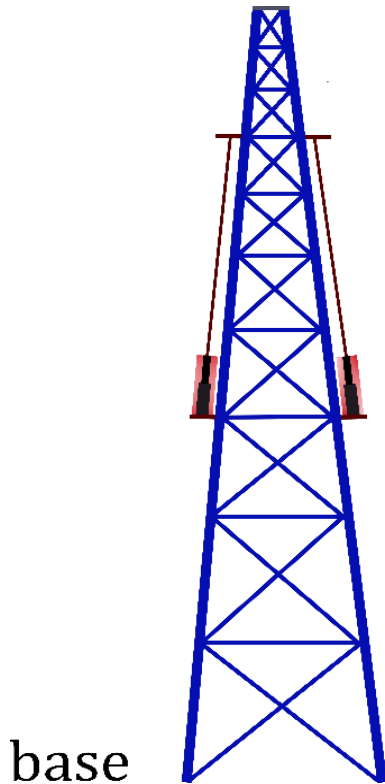




شکل ۱۰: شتاب تراز ناسل توربین در مدل بدون میراگر و model 1

شکل ۱۱: جابجایی تراز ناسل در مدل مجهز به میراگر و مدل با میرایی معادل

با تعیین ماتریس میرایی برای Model 6 پاسخ هر ۲ سازه‌ی با و بدون میراگر مقایسه شدند. در شکل (۱۲) جانمایی میراگر در این مدل و شکل (۱۳) پاسخ جابجایی تراز ناسل تحت شرایط دریایی با سرعت باد ۱۲ (m/s) و ارتفاع موج مشخصه (m) ۱/۹۹۳۵۴ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است این چیدمان میراگر تأثیر و کارایی بیشتری در کاهش ارتعاشات سازه داشته است به طوری که انحراف از استاندارد جابجایی تراز ناسل تحت این حالت دریایی ۲۴٪ کاهش یافته است.



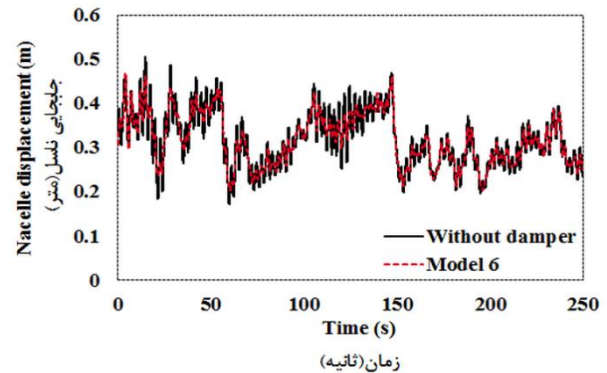
شکل ۱۲: جانمایی میراگر در model 6

در Model 6 که جانمایی دیگری از میراگر ویسکوز است، میراگرها به صورت قائم و در امتداد اعضای اصلی قرار داده شده اند. با توجه به اینکه نسبت میرایی هدف ۱۰٪ در نظر گرفته شد، در نرم-افزار پس از مدل‌سازی ۴ میراگر در امتداد پایه‌های سازه و با استفاده از نتایج ارتعاش آزاد و روش سعی و خطا، ضریب میرایی استفاده از نتایج ارتعاش آزاد و روش سعی و خطا، ضریب میرایی (۱۱) برای هر میراگر در نظر گرفته شد. در شکل (۱۱) تطابق پاسخ سازه با ۴ میراگر و سازه با نسبت میرایی ۱۰٪ را تحت نیروی باد با سرعت ۱۲ (m/s) نشان می‌دهد. به عبارتی با این چیدمان از میراگرها و با ضریب در نظر گرفته شده، نسبت میرایی سازه با میرایی هدف تطابق دارد. در نتیجه برای حل معادلات حرکت Model 6 از نسبت میرایی جدید برای تعیین ماتریس میرایی استفاده شده است.

جدول ۳: درصد کاهش RMS جابجایی در مدل بدون میراگر و مدل‌های مجهز به میراگر

	Model 1	Model2	Model 3	Model 4	Model 5
Story 10	-۱۹/۶	-۶/۵	-۶/۶۶	-۳/۹۲	-۰/۲۸
Story 9	-۰/۴۲	-۸/۲۹	-۸/۹۸	-۳/۴۷	-۰/۴۸
Story8	۰/۵۶	-۰/۰۴	-۱۱/۳۶	-۳/۰۴	-۰/۷۸
Story7	۰/۴۱	۰/۵	-۰/۰۹	-۲/۳۰	-۱/۱۸
Story6	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۶	-۰/۹۸	-۱/۸۰
Story5	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۷۶	-۲/۹۱
Story4	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۴۷	-۵/۰۴
Story3	۰/۴۵	۰/۵۹	۰/۴۵	۰/۵۹	-۸/۹
Story 2	۰/۵۸	۰/۸۷	۰/۵۸	۰/۸۷	-۸/۱
Story 1	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۴	۱/۸۸	۳/۷۷

- [2] Ma R, Zhang H, Zhao D. Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform. Mar. struct. 2010; 23(4):434-43.
- [3] Lackner MA, Rotea MA. Passive structural control of offshore wind turbines. Wind energy. 2011; 14(3):373-88.
- [4] Mousavi SA, Zahrai SM, Bargi K. Optimum geometry of tuned liquid column-gas damper for control of offshore jacket platform vibrations under seismic excitation. Earthquake Eng. Eng. Vibr. 2012; 11(4):579-92.
- [5] Stewart GM, Lackner MA. The impact of passive tuned mass dampers and wind-wave misalignment on offshore wind turbine loads. Eng. Struct. 2014; 73:54-61.
- [6] Mensah AF, Dueñas-Osorio L. Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCDS). Struct. Saf. 2014; 47:78-86.
- [7] Dinh VN, Basu B. Passive control of floating offshore wind turbine nacelle and spar vibrations by multiple tuned mass dampers. Struct. Control Health Monit. 2015; 22(1):152-76.
- [8] Hokmabady H, Mojtahedi A, Lotfollahi Yaghin MA. Structural Control and Fatigue Analysis of Offshore TLP Wind Turbine Using TMD. Marine Engineering. 2016; 11(22):39-50.(Persian)
- [9] Dezvareh R, Bargi K, Mousavi SA. Control of wind/wave-induced vibrations of jacket-type offshore wind turbines through tuned liquid column gas dampers. Struct. Infrastruct. Eng. 2016; 12(3):312-26.
- [10] Buckley T, Watson P, Cahill P, Jaksic V, Pakrashi V. Mitigating the structural vibrations of wind turbines using tuned liquid column damper considering soil-structure interaction. Renewable energy. 2018; 120:322-41.
- [11] Jafari A, Dezvareh R. Performance based assessment of offshore wind turbine platform using the constrained new wave method. joc. 2020; 11 (43) :71-80. (Persian)
- [12] Dean RG, Dalrymple RA. Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific Publishing Company. Singapore; 1991.



شکل ۱۳: جابجایی تراز ناسل در مدل بدون میراگر و Model 6

### نتیجه گیری

در این تحقیق کارایی میراگرهای ویسکوز در کاهش ارتعاشات یک سازه توربین بادی با در نظر گرفتن چندین جانمایی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده از آنجا که در چیدمان قطری میراگرها اعضای فرعی مهاربندی سازه که ابعاد قابل توجهی دارند حذف می-شوند، سختی سازه کاهش پیدا کرده و جابجایی و دررفت ترازهای مربوطه نسبت به سازه‌ی بدون میراگر افزایش می‌یابد. هرچند با وجود میراگر که منجر به افزایش میرایی به سازه می‌شود، شتاب کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه رفتار این سازه به صورت طره‌ای بوده و به صورت برشی رفتار نمی‌کند و جابجایی و دررفت طبقات تحت دوران طبقات به صورت یک جسم صلب قرار دارد، چیدمان میراگر به صورت قطری تأثیر قابل توجهی در ارتعاشات این سازه ندارد چرا که در این حالت جابجایی کمتری به میراگرها وارد می‌شود و در استهلاک انرژی نقش زیادی ندارند، در حالی که در صورت استفاده از میراگرها به صورت قائم و در امتداد پایه‌ها جابجایی بیشتری به میراگر اعمال شده و در نتیجه نیروی میرایی بیشتری نیز به وجود می‌آید و در استهلاک انرژی و کنترل ارتعاشات این سازه تأثیر بیشتری دارد.

### مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله نویسندگان سهم یکسانی داشتند. تمرکز اصلی نویسندگان سوم بر بخش ارتعاشات و نویسندگان دوم بر بخش تئوری امواج و باد بوده است. نویسندگان اول بر مدل‌سازی و روش پژوهش پرداخته است

### تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

### منابع

- [1] Lee HH, Wu RJ. Vibration mitigation of structures in the marine environment. Ocean eng. 1996; 23(8):741-59.

- [13] Letcher TM. Wind energy engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines. Academic Press. london; 2017.
- [14] Hansen MO. Aerodynamics of Wind Turbines. Earthscan. London; 2008. Van Der Tempel J. *Design of support structures for offshore wind turbines* [dissertation]. Delft, Holland: Delft University of Technology; 2006
- [15] Taylor DP, Katz I. Seismic Protection with Fluid Viscous Dampers for the Torre Mayor. North Tonawanda: Taylor Devices, Inc. 2004.
- [16] Mousavi SA, Ghorbani-Tanha AK. Optimum placement and characteristics of velocity-dependent dampers under seismic excitation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2012; 11(3): 403-14.
- [17] Cimellaro GP, Retamales R. Optimal softening and damping design for buildings. *Struct. Control Health Monit*. 2007; 14(6): 831-57.
- [18] Chopra AK. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 1995.
- [19] Long H, Moe G. Preliminary design of bottom-fixed lattice offshore wind turbine towers in the fatigue limit state by the frequency domain method. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2012; 134(3)

## AUTHOR(S) BIOSKETCHES

**Emami, M.**, MSc Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.



**Dezvareh, R.**, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

✉ [rdezvareh@nit.ac.ir](mailto:rdezvareh@nit.ac.ir)

0000-0002-4330-2194

**Mousavi, A.**, Assistant Professor, The Science and Technology Park of University of Tehran, Tehran, Iran.



این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:

## HOW TO CITE THIS ARTICLE



dor: 20.1001.1.15621057.1401.13.51.1.4

<http://doi.org/10.52547/joc.13.51.1>

<http://joc.inio.ac.ir/article-1-1690-fa.html>

<https://orcid.org/0000-0002-4330-2194>

## COPYRIGHTS



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.