

بررسی اثرات پارامترهای هندسی و مکانیکی توربین بادی محور افقی بر رفتار دینامیکی آن
در حالت آزاد و اجباری*
(یادداشت پژوهشی)

علیرضا شوشتری^(۱) کوروش هاشمی^(۲)

چکیده در این پژوهش از تئوری تیر جدارنازک، تغییر شکل نقطه دلخواهی از سازه توربین باد محور افقی استخراج و با روش اجزای محدود، روابط انرژی جنبشی و پتانسیل اجزای آن به دست آمده است. پاسخ میرای سازه در حالت ارتعاش اجباری یکبار تحت اثر نیروهای آیرودینامیکی، گریز از مرکز و اثر وزن و بار دیگر تحت تحریکات تکیه گاهی هارمونیک و اتفاقی به دست آمده است. از تئوری فوق، برنامه‌ای در نرم افزار متلب تهیه شده است که می‌تواند انواع سازه‌های توربین باد محور افقی را تحلیل نماید. تحلیل مدل‌های مختلفی از سازه اثر تغییرات طول، جنس، سرعت دورانی پره‌ها و سرعت وزش باد بر سازه مشخص کرده‌اند. مدل‌سازی و تحلیل برج سازه در نرم‌افزار انسیس نتایج پژوهش را تصدیق نموده است.

واژه‌های کلیدی سازه توربین باد محور افقی؛ تئوری تیر جدارنازک؛ تحریک هارمونیک؛ تحریک اتفاقی.

Investigation of the Effect of Geometrical and Mechanical Properties of Horizontal Wind Turbines on its Dynamic Behavior for Free and Forced Vibration Cases

A. Shooshtari

K. Hashemi

Abstract In this paper, using thin wall beam theory, at first the deflection of an arbitrary point of a horizontal wind turbine has been determined. Then, calculating potential and kinetic energy of wind turbine structure and using Lagrange equations, the equations of motion have been derived. Also, forced vibration of structures under various excitation such as aerodynamic forces, centrifugal effects, weight of elements and base excitation have been investigated. Finally, the effects of lengths, material and angular velocity of blades and wind speed on dynamic behavior of structure have been investigated. For validation, the tower of turbine has been modeled and analyzed in ANSYS software and good agreement between the obtained results and the proposed method has been observed.

Key Words Horizontal axis wind turbine; Thin walled beam theory; Harmonic actuation; random actuation.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۶/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. shooshta@basu.ac.ir

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقدمه

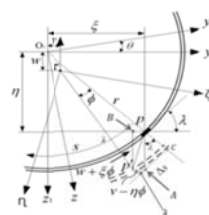
گرایش به استفاده از انرژی باد موجب شد، تا تحقیقات گسترده‌ای در زمینه سازه توربین باد و به‌خصوص طراحی دینامیکی آن انجام شود. چوپرا و دوگوندجی [1] پژوهشی را در زمینه معادلات غیرخطی حرکت پره توربین باد به انجام رسانده‌اند. در پژوهش دیگری مدلی سه‌بعدی از پره‌های توربین باد مذکور به روش اجزای محدود و تحت اثر نیروی‌های برا و پسا توسط چازلی [2] ارائه شد. یونسی و همکارانش [3] از مدل یک تیر سه‌بعدی برای مدل‌سازی پره‌ها استفاده کرده‌اند. بامگارت [4] تحلیل پره توربین باد را با استفاده از یک مدل ریاضی از پره توربین باد بر روی یک پایه صلب انجام داده است. مورتاگ و همکارانش [5] مسیری برای پیش‌بینی پاسخ اجباری توربین باد تحت اثر نیروی باد ساکن پیشنهاد نمودند. پارک و همکارانش [6] پژوهشی در زمینه ارتعاشات خطی توربین باد به‌منظور جلوگیری از پدیده رزونانس به‌انجام رسانده‌اند. باکسوانو و همکارانش [7] محاسبه پاسخ آبروالاستیک ایرفویل توربین باد دوبعدی را انجام داده‌اند. هوگدرن و همکارانش [8] پژوهشی به‌منظور بررسی پاسخ پره توربین باد در دو حالت گذرا و پایدار انجام داده‌اند. نهایتاً وانگ و همکارانش [9] سازه توربین باد محور افقی را به‌صورت دینامیکی تحلیل نموده‌اند.

در ابتدا با استفاده از مدل پژوهش وانگ و همکارانش [9] طرحی از سازه توربین باد شامل برج، دو پره و نیز جرمی متمرکز در نوک برج به‌منظور اعمال اثر موتور و اجزای داخلی آن بر سازه توربین باد، معرفی شده است. در این طرح با فرض تیر جدارنازک بودن برج و پره‌ها و سپس استفاده از تئوری تیرهای جدارنازک بردار جابه‌جایی نقطه دلخواهی از سازه به‌دست آمده است. با نسبت دادن سیستم‌های مختصات محلی به هر یک از اجزای سازه و استفاده از

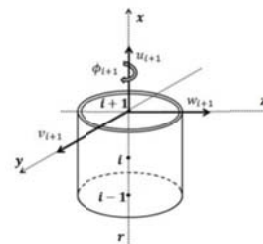
روش اجزای محدود و انتخاب المان‌هایی با چهار درجه آزادی برای پره‌ها و یک درجه آزادی برای برج، روابط انرژی جنبشی و پتانسیل آنها استخراج شده است. در گام بعدی اثر باد با سرعت ثابت، نیروی گریز از مرکز و وزن سازه با استفاده از روش کار مجازی به‌دست آمدند. با انتقال سیستم‌های مختصات محلی به سیستم مختصات عمومی سازه و استفاده از معادلات لاگرانژ، معادلات دیفرانسیل حرکت نامیرای سازه استخراج و با افزودن میرایی تناسبی به سازه مذکور معادلات دیفرانسیل حرکت میرای سازه توربین باد حاصل شده است. سپس پاسخ سازه برج تحت تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک اعمالی به پایه برج به‌دست آمده است. سپس به‌منظور بررسی لرزش‌های اتفاقی نظیر زلزله، سازه مذکور تحت پنج تحریک تکیه‌گاهی اتفاقی نیز تحلیل شده است. هم‌چنین برای بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی نظیر طول و جنس پره‌ها، سطح مقطع برج و نیز اثر نیروهای خارجی، مدل‌های متعددی از سازه توربین باد به روش مذکور تحلیل شده و نتایج حاصل از هر قسمت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش، سه مدل از برج سازه، با استفاده از تئوری پژوهش و به‌کمک نرم‌افزار انسیس تحلیل شده‌اند، که نتایج حاصل از این دو تحلیل کاملاً با یکدیگر تطابق داشته‌اند. لازم به ذکر است که تحلیل دینامیکی سازه توربین باد محور افقی در چهار راستای طولی، عرضی، جانبی و زاویه‌ای به‌همراه بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی، تحت تحریک ناشی از نیروهای آیرودینامیکی، نیروهای گریز از مرکز، اثر وزن و نیز تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک و اتفاقی برای اولین بار در این پژوهش به انجام رسیده است. از تئوری این پژوهش برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب تهیه شده است، که قابلیت تحلیل ارتعاشی انواع سازه‌های توربین باد محور افقی را فراهم می‌کند.

مدل سازی سازه توربین باد محور افقی

سینماتیک تیر جدارنازک. در شکل (۱) جابه جایی محیطی نقطه دلخواه P روی جداره تیر به اندازه Δs در راستای s و انتقال آن به نقطه P' ، که در آن v و w به ترتیب جابه جایی در راستای y_1 و z_1 می باشد، دیده می شود. به دلیل فرض جدارنازک و کشسان بودن سازه توربین باد، اثر تنش برشی ϵ_{xs} در تغییر شکل نهایی بسیار کوچک است و می توان از آن صرف نظر نمود.



شکل ۱ سطح مقطع تیر جدارنازک [9]



شکل ۲ المان تیر جدارنازک

با استفاده از شکل (۱) و تعریف تنش برشی ϵ_{xs} جابه جایی نقطه P یعنی ΔP به صورت رابطه (۱) به دست می آید [9].

$$\Delta P = D_1 \begin{Bmatrix} q \\ 1 \end{Bmatrix} + D_2 \begin{Bmatrix} q' \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن q بردار تغییر شکل و q' مشتق آن می باشد و به صورت رابطه (۲) تعریف می شوند.

$$q = \{u \quad v \quad w \quad \phi\}^T \quad (2 \text{ الف})$$

$$q' = \{u' \quad v' \quad w' \quad \phi'\}^T \quad (2 \text{ ب})$$

المان اجزا محدود. با استفاده از المان سه گره ای تیر جدارنازک مطابق شکل (۲) سازه مدل شده است. توابع شکل المان مذکور به صورت رابطه (۳) بیان می شوند [10].

$$h_1 = \frac{1}{2}(r^2 - r), \quad (3 \text{ الف})$$

$$h_2 = 1 - r^2 \quad (3 \text{ ب})$$

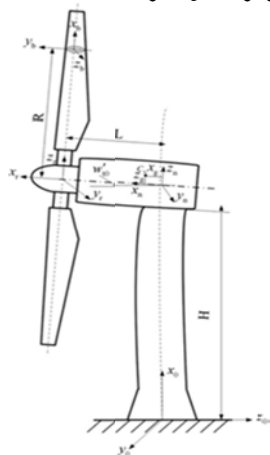
$$h_3 = \frac{1}{2}(r^2 + r) \quad (3 \text{ ج})$$

در نهایت الگوی تغییر شکل المان فوق (بردار q) به صورت رابطه (۴) حاصل می شود.

$$q = \sum_{i=1}^{n=3} h_i q_i^e = Hq^e \quad (4)$$

که در آن H ماتریس تابع شکل المان مذکور می باشد.

سیستم های مختصات مفروض بر سازه. مطابق شکل (۳) برای هر یک از اجزای توربین باد یک سیستم مختصات محلی در نظر گرفته شده است [9]. سیستم مختصات عمومی بر پایه برج توربین واقع است و $x_0 y_0 z_0$ نام دارد. سیستم مختصات $x_n y_n z_n$ به موتور و اجزای داخلی آن تعلق دارد. در مرکز شفت پروانه ها سیستم مختصات $x_r y_r z_r$ برای روتور فرض شده است. سیستم مختصات $x_b y_b z_b$ بر روی پره و در فاصله R از مرکز روتور قرار داده شده است.



شکل ۳ مدل سازه توربین باد محور افقی [9]

رابطه (۱۰) فرم ماتریسی آن می‌باشد؛ که در آن بردار جابه‌جایی کل $q = \{q_t \quad q_{b1} \quad \dots \quad q_{bn}\}^T$ سازه، $q_b = \{q_{b1} \quad q_{b2} \quad \dots \quad q_{bn}\}^T$ جابه‌جایی پره‌ها، بردار $q_t = \{w'_{tn_t} \quad w'_{t(n_t-1)} \quad \dots \quad w'_{t0}\}^T$ جابه‌جایی برج، $q_{tn_t} = \{w'_{tn_t}\}^T$ بردار جابه‌جایی گره n_t مبرج و بردار $q_{bn_b} = \{u_{bn_b} \quad v_{bn_b} \quad w_{bn_b} \quad \phi_{bn_b}\}^T$ جابه‌جایی گره n_b ام پره‌ها و ماتریس‌های $[M]$ و $[K]$ و $\{Q\}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی و نیروهای خارجی سازه می‌باشند.

تحلیل سازه توربین باد محور افقی

در این پژوهش سازه توربین بادی محور افقی، شامل برجی به طول ۳۴/۸۶۲ متر (۳۰ المان) و دو پره از مدل NREL S809 به طول ۲۱/۳۳۶ متر (۱۸ المان) مطابق جدول (۳-پ)، به‌عنوان مدل اصلی انتخاب شده است.

دیگر طرح‌های تحلیل شده در این پژوهش عبارتند از: طرح ۱: طرحی است که سطح مقطع برج آن نسبت به مدل اصلی با کاهش قطر خارجی سطح مقطع برج به اندازه ۰/۱۸ متر نسبت به طرح اصلی، کاهش یافته است. طرح ۲: طرحی است که سطح مقطع برج آن نسبت به مدل اصلی با کاهش قطر داخلی سطح مقطع برج به اندازه ۰/۱۹ متر نسبت به طرح اصلی، افزایش یافته است. طرح ۳ و طرح ۴: در این دو طرح طول پره‌های سازه توربین باد نسبت به طرح اصلی به ترتیب ۱۰ درصد کاهش و ۱۰ درصد افزایش یافته است. طرح ۵ و ۶: طرح‌هایی هستند که در آنها پره‌ها به ترتیب از جنس فولاد و آلومینیوم ساخته شده‌اند. توجه شود که اتصال برج، موتور و پره‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده است یعنی پره‌ها ساکن هستند. سپس اثر دوران پره‌ها به صورت نیروی خارجی به سازه اعمال گشته است.

انرژی جنبشی و پتانسیل پره‌ها، برج و موتور سازه. به‌کارگیری ماتریس انتقال کشسان T_f و ماتریس تبدیل مختصات T_r بردار موقعیت و جابه‌جایی پره را به ترتیب به صورت روابط (۶ و ۵) ایجاد می‌کند، [9, 11, 12].

$$P_b = T_f \cdot (B_1 \{q_b\} + B_2 \{q'_b\}) \quad (5)$$

$$\Delta P_b = \begin{Bmatrix} \Delta x_b \\ \Delta y_b \\ \Delta z_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{13} \end{Bmatrix} q_b + \begin{Bmatrix} S_{21} \\ S_{22} \\ S_{23} \end{Bmatrix} q'_b \quad (6)$$

به‌همین صورت بردار موقعیت برج P_t و موتور P_n به ترتیب از روابط (۷ و ۸) حاصل می‌شوند [9].

$$P_t = \begin{Bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \\ \Delta z_t \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w'_{t0} \eta_t \\ \xi_t \\ \eta_t \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$P_n = \begin{Bmatrix} z_g + H - w'_{t0} x_g \\ 0 \\ -w'_{t0} (z_g + H) - x_g \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

سپس با استفاده از روابط فوق انرژی جنبشی و پتانسیل اجزای توربین باد استخراج می‌شوند [9].

معادله دیفرانسیل حرکت سازه. معادله دیفرانسیل حرکت سازه براساس معادلات لاگرانژ به صورت رابطه (۹) به‌دست می‌آید.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = Q \quad (9-الف)$$

$$K = K_b + K_t + K_n \quad \text{و} \quad U = U_b + U_t \quad (9-ب)$$

$$[M]\ddot{q} + [K]q = \{Q\} \quad (10)$$

جدول ۱ فرکانس‌های طبیعی مدل اصلی (هرتز)

توضیح	طرح اصلی	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
فرکانس اولین خمش برج	۰/۵۸۷۸	۰/۴۵۸۱	۰/۵۱۱۱	۰/۶۶۶۵	۰/۶۸۵۱	۰/۱۹۲۲	۰/۵۳۴۴
فرکانس اول تغییر شکل طولی نا متقارن پره	۱۵/۶۷۲۵	۱۵/۶۷۲۵	۱۴/۲۴۷۷	۱۵/۶۷۲۵	۱۷/۴۱۳۹	۹۶/۶۳۵۱	۹۹/۱۴۷۷
فرکانس اول تغییر شکل طولی متقارن پره	۱۵/۶۷۸۵	۱۵/۶۷۸۵	۱۴/۲۵۲۲	۱۵/۶۷۸۵	۱۷/۴۲۲۳	۹۶/۶۲۶۶	۹۹/۱۲۵۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی نا متقارن عرضی پره	۴۱/۵۴۵۳	۴۱/۵۴۵۳	۳۷/۷۶۹۶	۴۱/۵۴۵۳	۴۶/۱۵۹۸	۷۷/۹۹۸۳	۷۷/۲۸۴۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی متقارن عرضی پره	۴۲/۰۵۹۱	۴۱/۰۵۹۰	۳۸/۱۸۴۴	۴۲/۰۵۹۱	۴۶/۱۱۰۵	۷۸/۳۳۶۲	۷۸/۱۸۷۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی نا متقارن جانبی پره	۲۲/۰۹۶۵	۲۲/۰۹۶۵	۲۰/۰۸۶۲	۲۲/۰۹۶۵	۲۴/۵۵۸۱	۴۱/۴۵۲۸	۴۱/۰۷۷۷
فرکانس اول تغییر شکل خمشی متقارن جانبی پره	۲۳/۰۹۵۷	۲۳/۰۹۵۵	۲۰/۸۸۱۳	۲۳/۰۹۵۹	۲۵/۸۴۵۶	۴۲/۰۷۵۵	۴۲/۷۹۰۰
فرکانس دوم تغییر شکل طولی نا متقارن پره	۳۱/۸۷۹۳	۳۱/۸۷۹۳	۲۸/۹۸۱۲	۳۱/۸۷۹۳	۳۵/۴۲۱۴	۱۹۶/۵۶۴۴	۲۰/۱/۶۷۵۳
فرکانس دوم تغییر شکل طولی متقارن پره	۳۱/۸۸۰۳	۳۱/۸۸۰۳	۲۸/۹۸۲۰	۳۱/۸۸۰۳	۳۵/۴۲۲۷	۱۹۶/۵۶۶۷	۲۰/۱/۶۸۳۷
فرکانس دوم تغییر شکل خمشی نا متقارن عرضی پره	۸۷/۲۲۵۸	۸۷/۲۲۵۸	۷۹/۳۰۶۵	۸۷/۲۲۵۸	۸۷/۲۲۵۸	۹۶/۱۶۷۷	۱۶۱/۰۷۹۳
فرکانس دوم تغییر شکل خمشی متقارن عرضی پره	۸۷/۴۶۷۷	۸۷/۴۶۷۷	۷۹/۵۱۴۹	۸۷/۴۶۷۷	۹۷/۱۸۷۵	۱۶۳/۱۴۶۵	۱۶۲/۰۷۹۳

جدول ۲ فرکانس حاصل از تئوری و نرم‌افزار انسیس (هرتز)

شرح	تئوری	انسیس	خطا٪
فرکانس طبیعی اول مدل اصلی	۵۱۴/۰۴۸	۵۲۸/۷۷	۲/۷۸۴۱
فرکانس طبیعی دوم مدل اصلی	۶۵۲/۵۹	۶۴۰/۹۴	۱/۸۱۶۷
فرکانس طبیعی اول طرح (الف)	۵۱۴/۸۱	۵۲۸/۹۲	۲/۶۶۷۷
فرکانس طبیعی دوم طرح (الف)	۶۵۶/۴۰	۶۴۱/۶۸	۲/۲۹۳۹
فرکانس طبیعی اول طرح (ب)	۵۰۲/۳۱	۵۲۰/۱۹	۳/۴۳۷۰
فرکانس طبیعی دوم طرح (ب)	۶۳۳/۲۲	۶۲۴/۱۷	۱/۴۴۶۷

جدول ۳ ضرایب تابع خودهمبستگی [17]

شرح لرزه ثبت شده	T_g (s)	ρ
سی دی ای مکزیکو	۳/۵۷	۰/۰۵۰
اس سی تی مکزیکو	۲/۰۴	۰/۰۴۵
وایتر نرو	۰/۳۲	۰/۱
نیسکوالی	۱/۲۲	۰/۰۷۰

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک نیرویی. با استفاده از روابط کار مجازی ناشی از نیروهای خارجی (مدل سازی نیروی باد در مرجع [9] موجود است) و نیز افزودن میرایی تناسبی به صورت رابطه (۱۲)، معادله دیفرانسیل حرکت سازه در حالت تحریک نیرویی به صورت رابطه (۱۳) ظاهر می گردد، که در آن α' و β' ضرایب ثابتی می باشند.

$$[C] = \alpha' [M] + \beta' [K] \quad (12)$$

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = \{Q\} \quad (13)$$

سازه تحت وزش باد با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پره ها (طرح اصلی) و سرعت دورانی ثابت پره ها در ۲۶/۸ دور بر دقیقه و افزایش سرعت وزش باد به مقادیر ۲۰ (طرح الف) و ۲۵ متر بر ثانیه طرح (طرح ب)، وزش باد با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه کاهش سرعت دورانی پره ها به مقادیر ۱۰/۷۲ دور بر دقیقه (طرح ج) و ۱۷/۸۶ دور بر دقیقه (طرح د) به روش آنالیز مودال تحلیل شده است.

شکل (۵) نشان می دهد که با افزایش طول پره و با افزایش سطح مقطع برج پاسخ میرا شده نوک برج کاهش یافته است.

همان طور که از شکل (۶) مشاهده می گردد تغییر در طول پره ها موجب افزایش جابه جایی نوک طولی پره شده است.

در شکل (۷) دیده می شود، مقدار تغییر شکل عرضی نوک پره تحت با افزایش طول پره ها افزایش یافته در حالی که با افزایش سطح مقطع برج مقدار تغییر شکل مذکور کاهش می یابد.

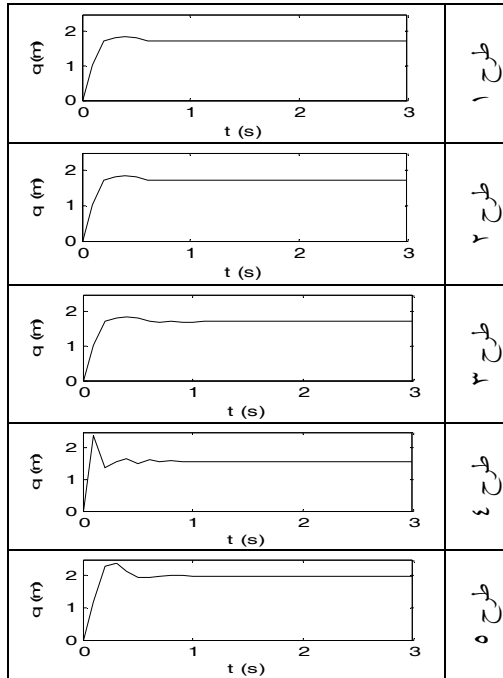
ارتعاش آزاد. به کمک روش مقادیر ویژه، فرکانس های طبیعی سازه، از حل معادله دیفرانسیل حرکت آزاد سازه که به صورت رابطه (۱۱) بیان می گردد، حاصل می شود.

$$[M]\ddot{q} + [K]q = 0 \quad (11)$$

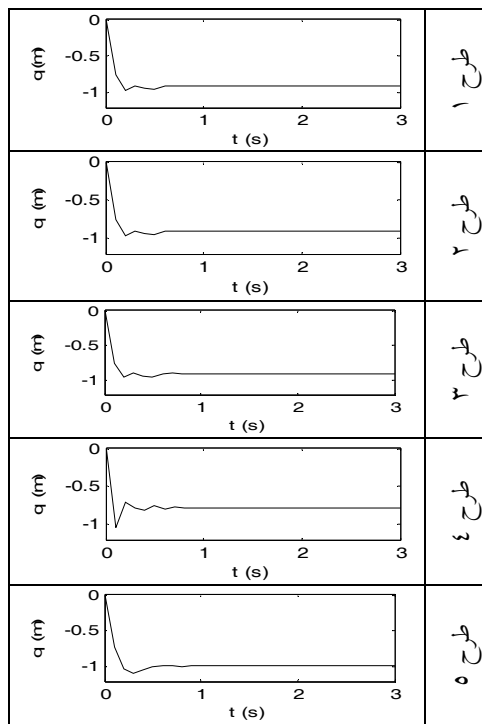
همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می گردد، با افزایش طول پره ها فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمشی برج، کاهش می یابد. این موضوع ناشی از افزایش جرم مؤثر در نوک برج می باشد. از طرفی با افزایش طول پره ها سایر فرکانس های طبیعی سازه کاهش یافته است. همچنین افزایش سطح مقطع برج موجب افزایش فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمشی برج شده در حالی که بر روی فرکانس های طبیعی پره ها اثر محسوسی نداشته است. تغییر جنس پره ها از کامپوزیت به فولاد و آلومینیوم فرکانس طبیعی اولین شکل مود خمشی برج را به علت افزایش وزن سازه، کاهش داده است، در حالی که سایر فرکانس های طبیعی را افزایش داده است.

اعتبارسنجی نتایج. در ادامه برج سازه توربین باد محور افقی در سه طرح مختلف که عبارت اند از: طرح اصلی، طرح (الف) مدلی با سطح مقطع افزایش یافته (با کاهش قطر داخلی برج به میزان ۰/۰۱۹ متر) و طرح (ب) مدلی که در آن ارتفاع برج به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته است، در نرم افزار انسیس مدل سازی و تحلیل شده است. از این تحلیل فرکانس های طبیعی برج و شکل مودهای آن به دست آمدند. سپس مدل های فوق الذکر با تئوری حاکم در این پژوهش نیز تحلیل شدند و دو فرکانس طبیعی اول و نیز شکل مود اول سازه استخراج گردیدند. نتایج مذکور در جدول (۲) ارائه شده اند.

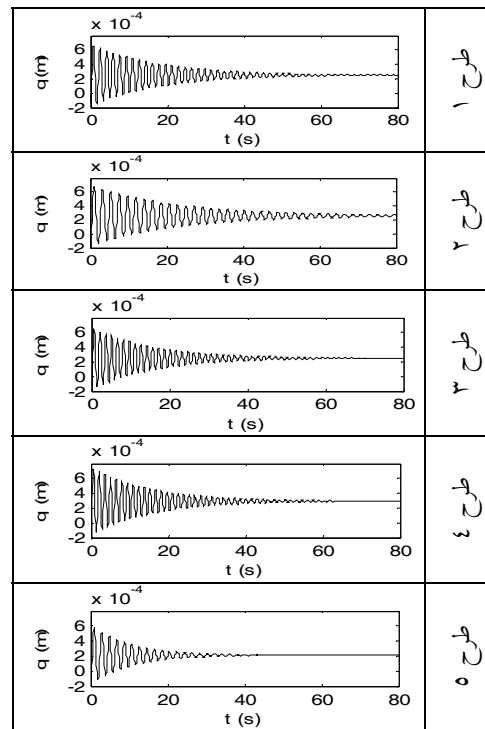
جابه‌جایی در اثر افزایش طول پره‌ها افزایش یافته است.



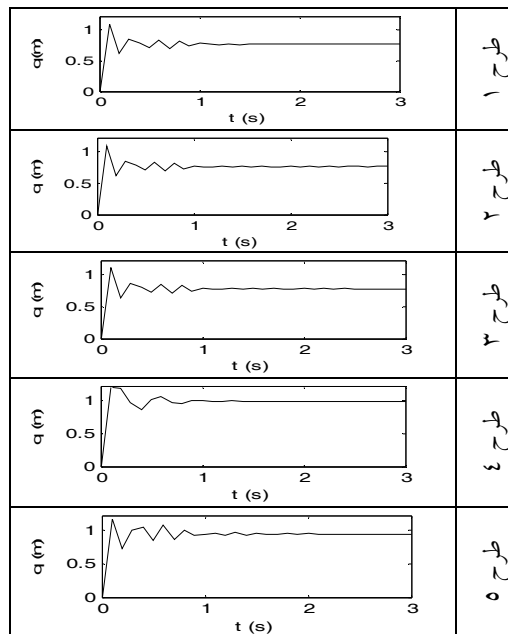
شکل ۷ تغییر شکل عرضی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پره‌ها



شکل ۸ تغییر شکل جانبی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پره‌ها

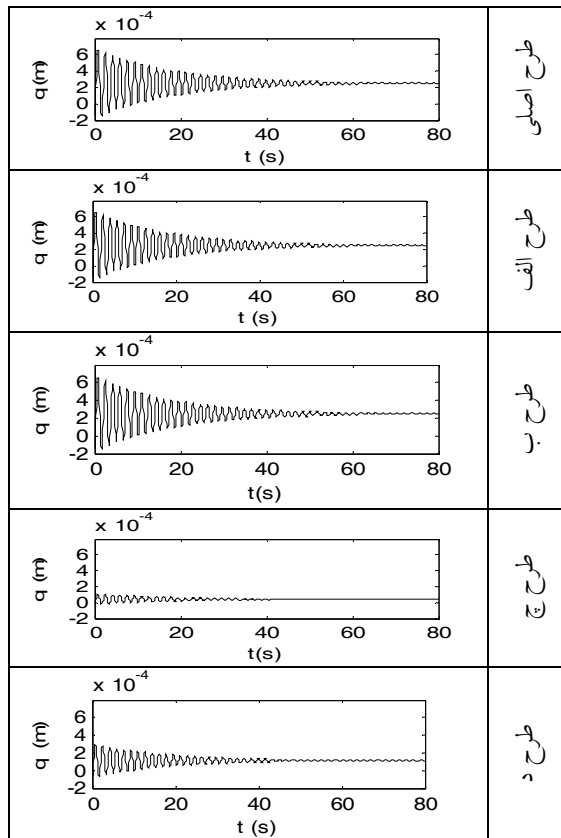


شکل ۹ تغییر شکل نوک برج تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پره‌ها

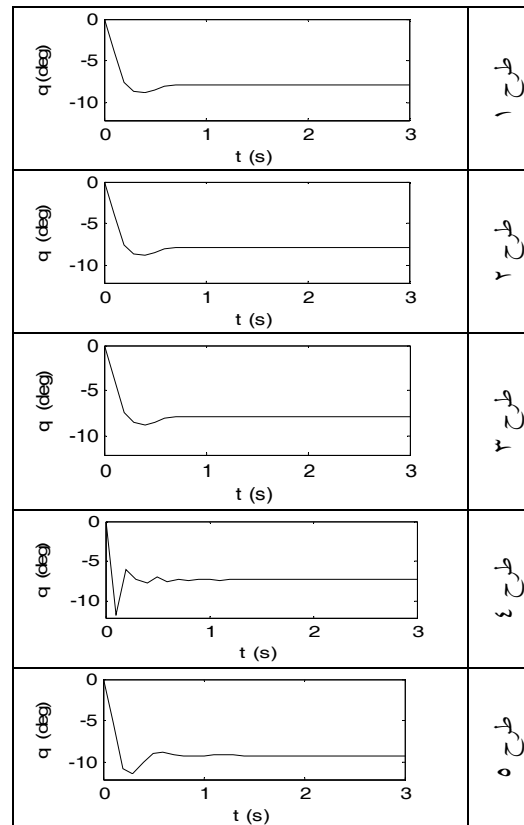


شکل ۱۰ تغییر شکل طولی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پره‌ها

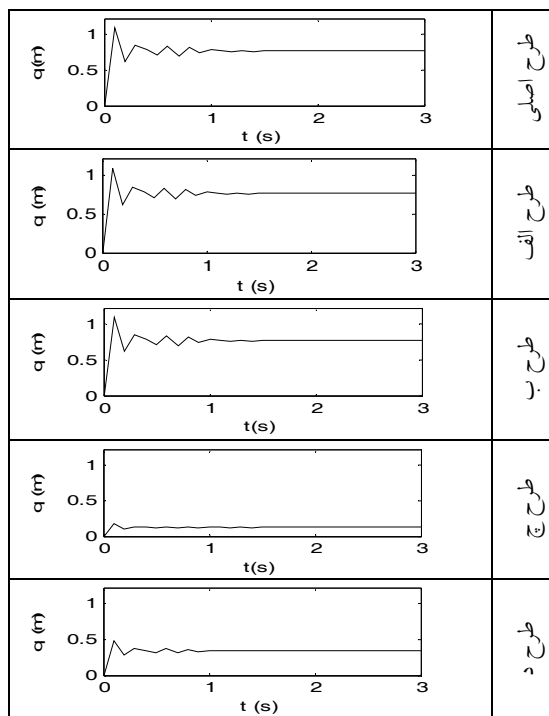
شکل (۸) نشان می‌دهد، افزایش سطح مقطع برج، در جابه‌جایی جانبی نوک پره بی‌اثر بوده و این



شکل ۱۰ تغییر شکل نوک برج در شرایط مختلف آیرودینامیکی



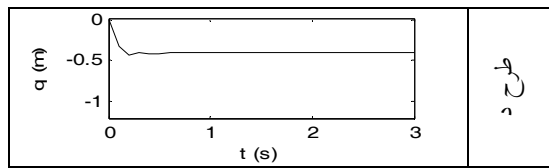
شکل ۹ تغییر شکل پیچشی نوک پره تحت سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۲۶/۸ دور بر دقیقه پرها



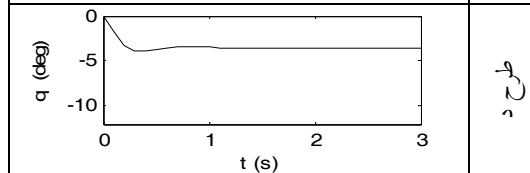
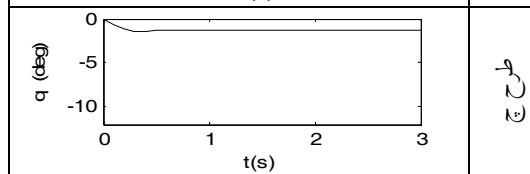
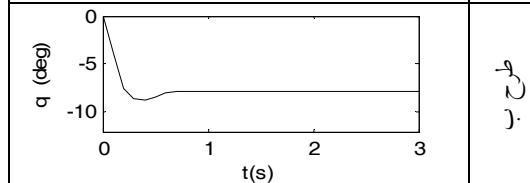
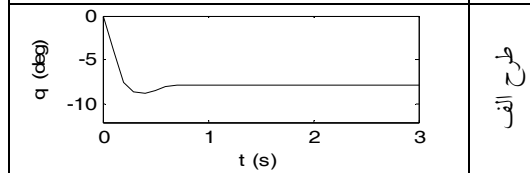
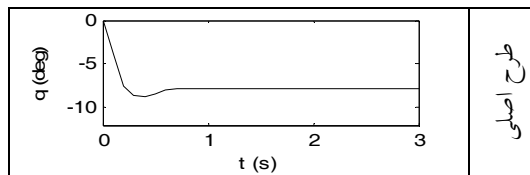
شکل ۱۱ تغییر شکل طولی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی

با توجه به شکل (۹) تغییر شکل پیچشی نوک پره در اثر افزایش سطح مقطع برج به میزان کمی کاهش یافته و با افزایش طول پرها این مقدار افزایش داشته است.

در ادامه پاسخ مدل سازه در شرایط مختلف نیرویی به دست آمده است. شکل‌های (۱۰-۱۴) بیان می‌کنند که تغییر پارامتر سرعت جریان آزاد (باد) اثر محسوسی بر روی پاسخ‌ها نداشته است. این در حالی است که در یک سرعت جریان آزاد (باد)، تغییر سرعت دورانی پره اثر بسیار محسوسی بر روی مقدار تغییر شکل سازه داشته است. کاهش سرعت دورانی پرها موجب کاهش شدیدی در مقدار تغییر شکل سازه شده است که بیانگر سهم بسیار زیاد نیروی گریز از مرکز در بردار نیروی مؤثر بر سازه می‌باشد. قابل ذکر است، همواره سرعت دوران پرها پارامتری بحرانی در سازه‌های توربین باد بوده است.



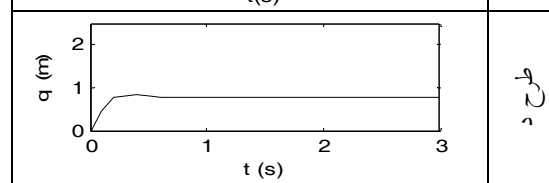
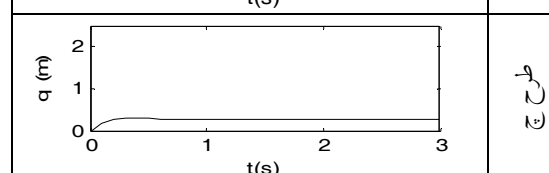
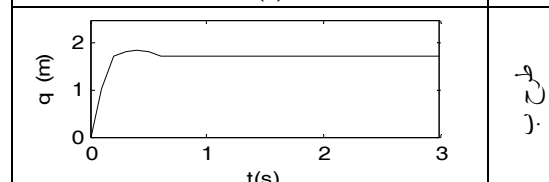
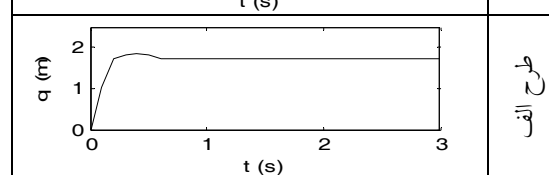
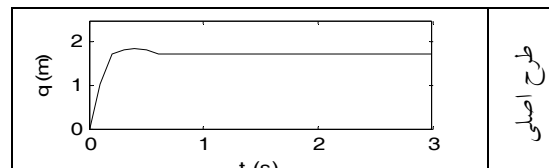
شکل ۱۳ تغییر شکل جانبی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی



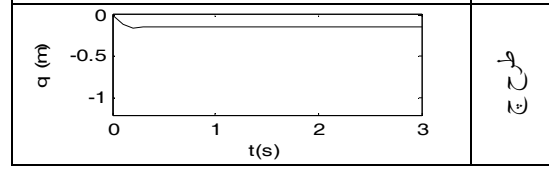
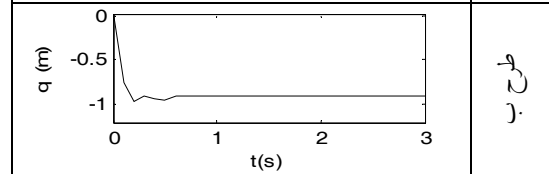
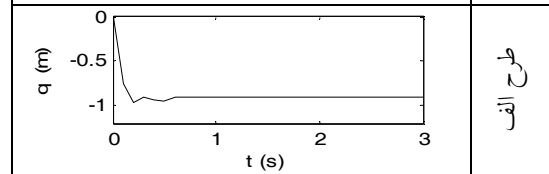
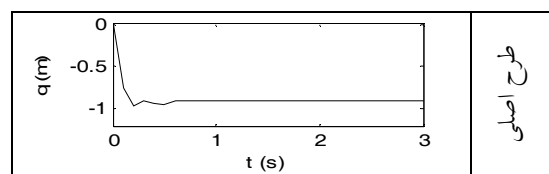
شکل ۱۴ تغییر شکل پیچشی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک. برای مدل‌سازی تحریک تکیه‌گاهی هارمونیک اعمالی بر سازه، تحریکی شتابی به صورت تابع کسینوسی مطابق رابطه (۱۴)، در راستای z_0 بر پایه برج اعمال می‌گردد، [14, 15].

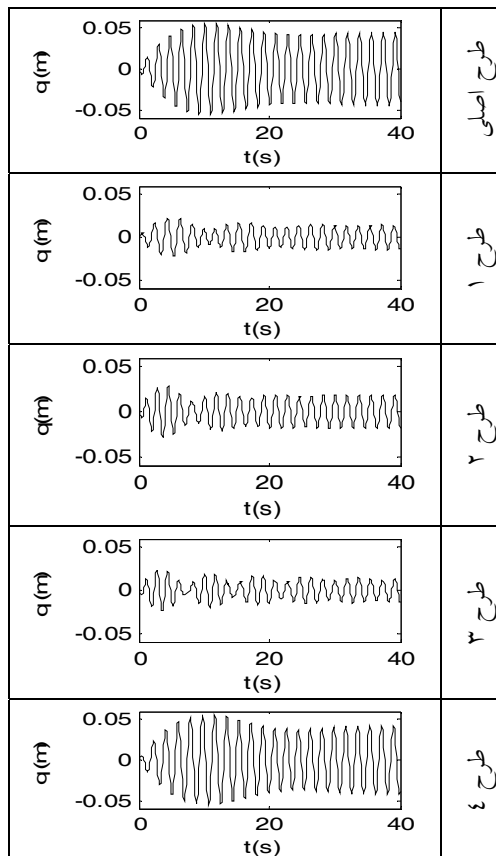
$$\ddot{y}_i = a_0 \cos(\omega t) \quad (14)$$



شکل ۱۲ تغییر شکل عرضی نوک پره در شرایط مختلف آیرودینامیکی



برج در مدل اصلی نزدیک می‌باشد، سازه به حالت تشدید رسیده و جابه‌جایی نوک برج در مدل اصلی به شدت افزایش یافته است. افزایش سطح مقطع برج موجب کاهش دامنه جابه‌جایی نوک برج شده است.



شکل ۱۶ تغییر شکل طولی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

با توجه به شکل (۱۶) قابل ذکر است که تغییر شکل طولی نوک پره، تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی در مقایسه با تغییر مکان نوک برج خیلی کمتر شده و کاهش طول پره‌ها موجب کاهش دامنه تغییر شکل طولی نوک پره شده است.

شکل (۱۷) و مقایسه آن با شکل (۱۶) بیان می‌کند تغییر مکان عرضی نوک پره تقریباً دو برابر تغییر شکل طولی آن است. از طرف دیگر کاهش طول پره نسبت به مدل اصلی تغییر شکل عرضی نوک پره به شدت کاهش داده است.

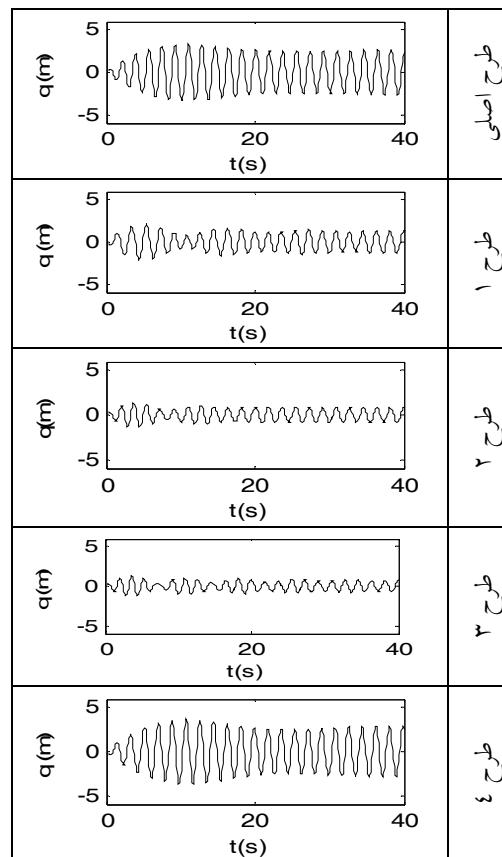
معادله دیفرانسیل حرکت به صورت رابطه (۱۵) تغییر می‌یابد.

$$[M]\ddot{q}_i + [C]\dot{q}_i + [K]q_i = M\ddot{y}_i \quad (15)$$

در ادامه با استفاده از آنالیز مودال و تبدیل‌های خطی معادله دیفرانسیل حرکت به صورت رابطه (۱۶) تغییر می‌یابد [16].

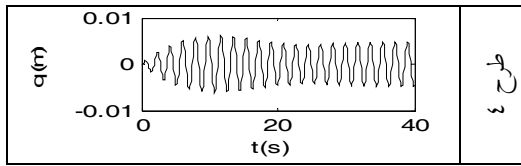
$$\{\ddot{\delta}_i\} + [2\xi\omega_n]\{\dot{\delta}_i\} + [\omega_n^2]\{\delta_i\} = ([u]^T M [u])^{-1} [u]^T M \{\ddot{y}_i\} \quad (16)$$

معادلات فوق حل و نتایج آن به صورت زیر حاصل شده است.

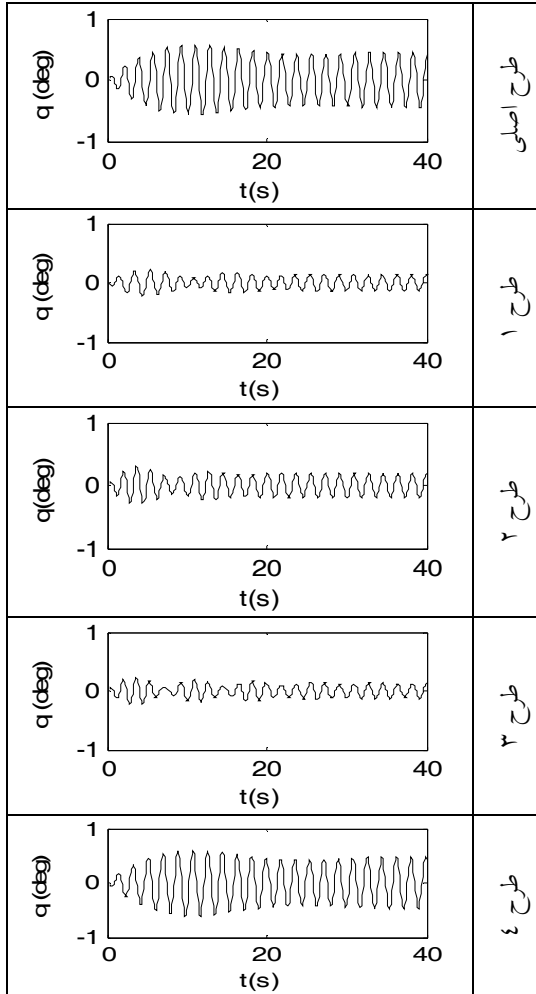


شکل ۱۵ تغییر شکل نوک برج در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

شکل (۱۵) جابه‌جایی نوک برج را بیان می‌کند. از آنجایی که فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی اول

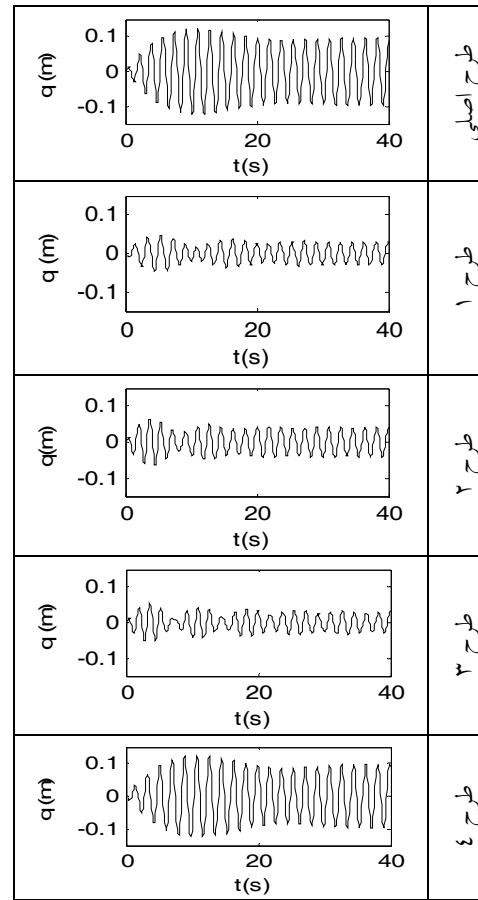


شکل ۱۸ تغییر شکل جانبی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

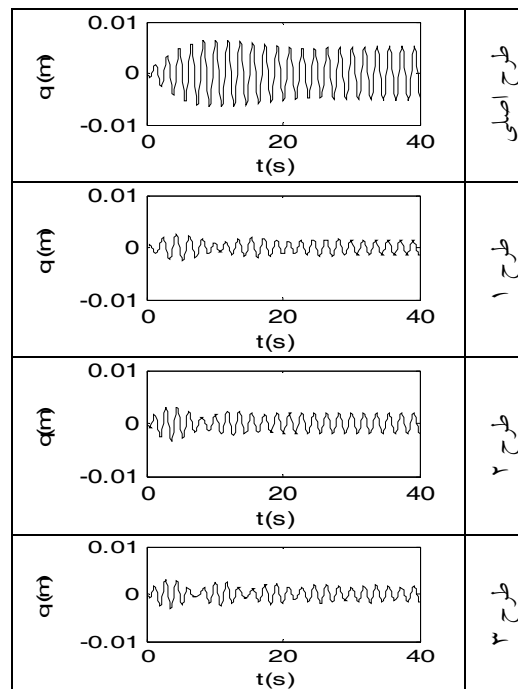


شکل ۱۹ تغییر شکل پیچشی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی

در شکل (۱۸) که دامنه نوسان جانبی نوک پره نشان داده شده است، قابل مشاهده است که تغییر در سطح مقطع برج و نیز کاهش طول پره‌ها کاهش دامنه تغییر شکل جانبی نوک پره را در بر داشته است.



شکل ۱۷ تغییر شکل عرضی نوک پره در مدل‌های مختلف تحت تحریک هارمونیک تکیه‌گاهی



$$R_{qi}(\tau) = \frac{1}{2\pi} ([u]_i \int_{-\infty}^{+\infty} [M]_m^{-1} [H^*(\omega)] [S_f(\omega)] [H(\omega)] [M]_m e^{i\omega\tau} d\omega [u]_i^T) \quad (20)$$

در نهایت با صفر قرار دادن τ در رابطه (20)، میانگین مربعی پاسخ در مود i ام به صورت رابطه (21) به دست می آید.

$$R_{qi}(0) = \frac{1}{2\pi} ([u]_i \int_{-\infty}^{+\infty} [M]_m^{-1} [H^*(\omega)] [S_f(\omega)] [H(\omega)] [M]_m d\omega [u]_i^T) \quad (21)$$

بدین صورت سیستم تحت تحریکات اتفاقی بررسی می گردد.

در ادامه مدل اصلی سازه توربین باد محور افقی تحت پنج تحریک اتفاقی قرار داده شده و پاسخ های آن استخراج شده است. این تحریکات عبارت اند از: نویز سفید، لرزه ثبت شده در مرکز سی دی ای مکزیکو سال ۱۹۸۵، لرزه ثبت شده در مرکز اس سی تی مکزیکو سال ۱۹۸۵، لرزه ثبت شده در مرکز وایترنو سال ۱۹۸۷ و لرزه ثبت شده در مرکز نیسکوالی سال ۲۰۰۱. توابع خود همبستگی لرزه های مذکور به صورت رابطه (22) مدل سازی و استفاده شده اند و توابع چگالی طیفی خود همبستگی تحریک سازه به دست آمده است [17].

$$R_y(\tau) = e^{-\rho(2\pi(\frac{\tau}{T_s}))} \cos(2\pi \frac{\tau}{T_s}) \quad (22)$$

ضرایب مجهول در رابطه فوق در جدول (3) آمده است.

سپس با استفاده از توابع چگالی طیفی خود همبستگی به عنوان تحریک سازه و استفاده از روابط ذکر شده، سیستم تحت تحریکات فوق تحلیل شده و میانگین مربعی پاسخ سازه به صورت جدول (4) تهیه شده است.

در شکل (19) تغییر شکل پیچشی نوک پره رسم شده است و بیانگر آن است که کاهش طول پره ها و تغییر سطح مقطع برج موجب کاهش دامنه تغییر شکل پیچشی نوک پره سازه توربین باد گشته است.

ارتعاش اجباری میرا تحت تحریک تکیه گاهی اتفاقی. در ارتعاشات اتفاقی با در دست داشتن تابع مختلط فرکانسی به تحلیل سیستم پرداخته می شود. بدین منظور تحریکی نمایی مطابق رابطه (17) بر سیستم اعمال می گردد [14].

$$y_i = a_0 e^{i\omega t} \quad (17)$$

سپس پاسخ سازه به صورت ضریبی از تابع تحریک و با تأخیر زمانی ψ در نظر گرفته شود، آن گاه رابطه بین تابع پاسخ δ و تابع تحریک به صورت رابطه (18) بیان می گردد.

$$\delta_0 e^{i\omega t} = H(\omega) a_0 e^{i\omega t} \quad (18)$$

که در آن $H(\omega)$ تابع مختلط فرکانسی سیستم می باشد، که در سیستم های چند درجه آزادی به فرم ماتریسی می باشد.

در ارتعاشات اتفاقی سیستم های چند درجه آزادی با در دست داشتن تابع چگالی طیفی تحریک به فرم $[S_f(\omega)]$ ، می توان تابع چگالی طیفی مودال شده تحریک $[S_f(\omega)]$ را به صورت رابطه (19) پیش بینی نمود.

$$[S_f(\omega)] = [u]^T [S_F(\omega)] [u] \quad (19)$$

با استفاده از رابطه (19) که ماتریس چگالی طیفی مودال شده تحریک بیان شده است و نیز به کارگیری ماتریس جرم قطری شده سیستم $[M]_m$ ، تابع خود همبستگی پاسخ سیستم در مود i ام به صورت رابطه (20) به دست می آید.

جدول ۴ میانگین مربعی پاسخ مدل اصلی به تحریکات اتفاقی (واحد متر مربع)

جابه‌جایی	نویز سفید	سی دی ای مکزیکو	اس سی تی مکزیکو	نیسکوالی	وایتر نرو
جابه‌جایی نوک برج	۳۱۸/۲۲۹۰	۸/۷۶۲۷ e(-۴)	۱/۵۰۵۳ e(-۴)	۱/۴۶۶۸ e(-۴)	۶/۴۹۸۳ e(-۶)
جابه‌جایی طولی نوک پره	۲۴۰/۵۲۲۸	۶/۹۲۶۲ e(-۴)	۱/۱۸۲۲ e(-۴)	۱/۱۵۱۹ e(-۴)	۵/۱۰۳۲ e(-۶)
جابه‌جایی عرضی نوک پره	۳۰۷/۲۰۳۹	۸/۱۸۹۰ e(-۴)	۱/۴۱۲۷ e(-۴)	۱/۳۷۶۶ e(-۴)	۶/۰۹۸۶ e(-۶)
جابه‌جایی جانبی نوک پره	۲۶۹/۵۳۹۴	۶/۷۳۱۵ e(-۴)	۱/۱۷۴۱ e(-۴)	۱/۱۴۴۰ e(-۴)	۵/۰۶۸۳ e(-۶)
جابه‌جایی پیچشی نوک پره	۲۸۳/۹۴۰۷	۷/۶۹۹۹ e(-۴)	۱/۳۲۵۶ e(-۴)	۱/۲۹۱۰ e(-۴)	۵/۷۲۲۵ e(-۶)

شده است. از طرفی افزایش چگالی پره‌ها منجر به افزایش جرم مؤثر در بالای برج شده که این امر فرکانس طبیعی اول سازه را به شدت کاهش می‌دهد. افزایش طول پره‌ها موجب کاهش مقدار دامنه پاسخ نوک برج، افزایش مقدار پاسخ عرضی نوک پره‌ها و افزایش اندازه پاسخ جانبی نوک پره‌ها تحت تحریکات نیرویی شده است. افزایش سطح مقطع برج موجب کاهش جابه‌جایی نوک برج و تغییر شکل عرضی پره‌ها شده، درحالی که بر تغییر شکل جانبی نوک پره‌ها تحت تحریکات نیروی تقریباً بی‌اثر بوده است.

اثر تغییر سرعت جریان آزاد باد بر روی سازه ناچیز بوده است. این در حالی است که تغییر سرعت دورانی پره‌ها اثر بسیار زیادی بر پاسخ سازه داشته و افزایش آن مقدار پاسخ سازه را به شدت افزایش می‌دهد.

در مدل اصلی، مدل با طول افزایش یافته پره‌ها که فرکانس‌های طبیعی اول سازه در آنها نزدیک به فرکانس تابع تحریک هارمونیک بوده‌اند، پدیده تشدید به‌طور واضح در پاسخ نوک برج ظهور کرده است.

در تحریکات تکیه‌گاهی اتفاقی ناشی از لرزش‌های تکیه‌گاهی عوامل متعددی نظیر مدت زمان تحریک، شدت تحریک، دامنه و میزان تغییر جهت تحریک در یک بازه زمانی، نقش مهمی در مقدار میانگین مربعی پاسخ سازه دارند.

جدول (۴) بیان می‌کند، میزان میانگین مربعی پاسخ سازه نسبت به تحریک اتفاقی حاصل از لرزش در مرکز سی دی ای مکزیکو بیشترین مقدار را دارا است. این مقدار به ترتیب تحت تحریک به لرزش در مرکز سی دی ای مکزیکو، اس سی تی مکزیکو، نیسکوالی و وایتر نرو کاهش یافته است. در مقدار میانگین مربعی پاسخ علاوه بر مدت زمان لرزش تکیه‌گاه، عواملی نظیر شدت و تعداد دفعات تغییر جهت راستای تحریک و مقدار دامنه تحریک، نیز می‌توانند مؤثر باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش دینامیک سازه توربین باد محور افقی با استفاده از تئوری تیر جدارنازک و به کمک روش اجزای محدود بررسی شده که شامل تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری سازه توربین باد و بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی بوده است. در نهایت این پژوهش منجر به ایجاد برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب شد، که قابلیت تحلیل هر نوع توربین باد محور افقی را دارا است. نتایج حاصل از تحلیل به شرح زیر است.

افزایش طول پره موجب کاهش فرکانس‌های طبیعی سازه و افزایش سطح مقطع برج موجب افزایش فرکانس طبیعی اول سازه شده و بر روی فرکانس‌های طبیعی پره‌ها اثر محسوسی نداشته است. به‌علاوه افزایش مدول الاستیسیته، مدول برشی و چگالی مواد سازنده پره‌ها موجب افزایش فرکانس‌های طبیعی پره‌ها

کشسان		فهرست علائم و نشانه‌ها	
ماتریس انتقال صلب	T_r	کار مجازی نیروی برا و پسا	dP, dT
ماتریس انتقال از سیستم مختصات پره	T_{br}	طول المان	l^e
به سیستم مختصات روتور		مختصات سطح مقطع تیر جدارنازک	$ox_1y_1z_1$
ماتریس انتقال از سیستم مختصات روتور به سیستم مختصات موتور	T_{rn}	بردار جابه‌جایی و مشتق آن	q, q'
ماتریس انتقال از سیستم مختصات موتور به سیستم مختصات روتور	T_{no}	بردار جابه‌جایی پره و برج	q_b, q_t
ماتریس انتقال از سیستم مختصات روتور به سیستم مختصات برج		تغییر شکل تیر در راستاهای	u, v, w
کرنش برشی تیر جدارنازک	ϵ_{xs}	x_1, y_1, z_1	
مختصه نقطه P در سیستم مختصات سطح مقطع	η, ξ	ارتفاع برج	H
سیستم مختصات سطح مقطع تیر جدارنازک پس از تحمل تغییر شکل	$\eta\xi\chi\tau$	ماتریس توابع شکل المان‌ها و مشتقات آن	H, H_1, H_2
کشسان		ماتریس تابع مختلط فرکانسی	$H(\omega)$
زاویه دوران صلب	φ	فاصله از محور برج تا صفحه دوران روتور	L
		جرم کلی در مد r ام	M_r
		تابع چگالی طیفی تحریک	$S_F(\omega)$
		ماتریس انتقال تغییر شکل جسم	T_f

مراجع

1. Chopra, I. and Dugundji, J., "Nonlinear dynamic reponse of wind turbine blade", *Journal of sound and vibration*, Vol. 63(2): pp. 265-286, (1997).
2. El Chazly, N.M., "Static and dynamic analysis of wind turbine blades using the finite element method", *Computers & Structures*, Vol. 48(2): pp. 273-290, (1993).
3. Younsi, R., El Batany, I., Tritsch, J., Naji, H. and Landjerit, B., "Dynamic study of wind turbine blade with horizontal axis", *Eur. J. Mech. A/Solids*, Vol. 20: pp. 241-252, (2001).
4. Baumgart, A., "A mathematical model for wind turbine blades", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251(1):pp. 1-12, (2002).
5. Murtagh, P.J., Basu, B. and Broderick, B.M., "Along wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading", *Engineering Structures*, Vol. 27: pp. 1209-1219, (2005).
6. Park, J.H., Park, H.Y., Jeong, S.Y., Lee, S., Shin, Y.H., and Park, J.P., "Linear vibration analysis of rotating wind turbine blade", *Current Applied Physics*, Vol. 10: pp. S332-S334, (2009).
7. Baxevanou, C.A., Chaviaropoulos, P.K., Voutsinas, S.G., and Vlachos, N.S., "Evaluation study of a navier stokes CFD aeroelastic model of wind turbine airfoils in classical flutter", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 96: pp. 1425-1443, (2008).
8. Hoogedoorn, E., Jacobs, G.B., and Beyene, A., "Aero elastic behavior of a flexible blade for wind turbine application: A 2D computational study", *Energy*, Vol. 35: pp. 778-785, (2010).

9. Wang, J., Qin D. and lim, T.C., "Dynamic analysis of horizontal axis wind turbine by thin walled beam theory", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 3565-3586, (2010).
10. Liu. G.R. and Quek. S.S., "*The finite element method a practical course*", Butterworth-Heinemann, London, England, (2003).
11. Shabana, Ahmed A., "*Dynamics of multi-body system*", Cambridge University Press, New York, USA (2005).
12. Radcliffe, C.W. and Sush, H., "*Kinematics and Mechanisms Design*", John Wiley & Sons Inc, New Jersey, USA, (1987).
13. Potter M., Wiggert D., "*Fluid mechanics*", The McGraw-Hill Company, Michigan, US (1976).
14. Newland, D.E., "*An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis*", John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, (1975).
15. Lutes, D.L. and Sarkani, S.H., "*Random vibrations analysis of structural and mechanical systems*", Elsevier, Washington, USA (2004).
۱۶. مکانیک، ابوالقاسم، "ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای با کاربردهای کامپیوتری"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۸۲).
17. Saragoni, G.R. and Ruiz, S., "Free vibration of soils during large earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29:pp. 1-16, (2009).
18. Dowell, E.H. and Hodges, D.H., "Nonlinear equation of motion for the elastic bending and torsion of twisted non-uniform rotor blades", NASA TN-7818. (1974).
19. Somers, D.M., Design and experimental results for the S809 Airfoil., NREL/SR-440-6918, 199۹