

Experimental Investigation of Aeroelastic Behavior of a Shallow II-Shaped Bridge Deck during Construction Stage

Mehdi Izak mohammadi * , Saeed Reza Sabaghyazdi 

Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: In this study, the aeroelastic behavior of a shallow II-shaped deck section of a long-span cable-supported bridge was experimentally investigated in both completed and construction-stage configurations using an elastically mounted sectional model in a wind tunnel. During the construction stage, the deck functions as a cantilever system with reduced effective stiffness and modified boundary conditions, which can significantly affect its aeroelastic stability. The scaled model was allowed to oscillate in two degrees of freedom, namely vertical translation and torsional rotation. Wind tunnel tests were conducted within a wind velocity range of 3.27 to 7.72 m/s and under various initial angles of attack. The primary objective was to evaluate the influence of structural configuration changes on the static divergence threshold and dynamic oscillation amplitudes. The results indicated that, in the construction-stage condition, static torsional and vertical responses increased by approximately 6% and 10%, respectively, compared with the completed configuration. Furthermore, the dynamic oscillation amplitudes in torsion and vertical motion increased by about 8.5% and 5.5%, respectively. In certain angles of attack, the onset of instability occurred at lower wind velocities during the construction stage, indicating a shift in the aeroelastic stability boundary due to stiffness reduction and altered boundary conditions. The findings demonstrate that direct extrapolation of the completed-state aeroelastic behavior to the construction stage may result in unconservative stability evaluation. Therefore, dedicated aeroelastic modeling is recommended to ensure safe design of long-span bridges during erection stages.

Review History:

Received: Jul. 31, 2025
Revised: Apr. 11, 2026
Accepted: Jun. 21, 2026
Available Online: Aug. 04, 2026

Keywords:

Aeroelasticity
Construction Stage
Cable-Supported Bridge
Torsional Divergence
Wind Tunnel Testing

1- Introduction

Wind-induced aeroelastic instability is one of the governing design criteria for long-span bridges[1]. Bridge decks with shallow II-shaped sections are particularly sensitive to aerodynamic excitation due to their geometric characteristics and relatively low torsional stiffness[2]. The aeroelastic response of such decks depends on the interaction between aerodynamic forces, structural stiffness, damping, and boundary conditions[3]. Although many studies have investigated the aeroelastic behavior of completed bridges[4], the construction stage has received less attention[5]. During construction, the structural system may experience reduced stiffness, asymmetric support conditions, and temporary mass distribution, which can significantly affect aeroelastic stability[6].

In this study, the aeroelastic behavior of a shallow

II-section bridge deck is experimentally investigated in a wind tunnel using an elastic sectional model. Two structural states are considered: the complete bridge configuration and the under-construction configuration. The objective is to evaluate how structural changes during construction

influence torsional response, vertical response, and oscillation amplitudes under different wind speeds and angles of attack.

2- Experimental Methodology

Wind tunnel tests were conducted using an elastic sectional model representing a shallow II-section bridge deck. Two structural configurations were examined, as illustrated in Fig1.

The experiments were performed at five angles of attack $\alpha = (0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ)$

and wind speeds ranging from

$U = 3.27 \text{ m/s to } 7.72 \text{ m/s}$

The aerodynamic loading is related to the dynamic pressure

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

*Corresponding author's email: Mehdiizakmohammadi76@gmail.

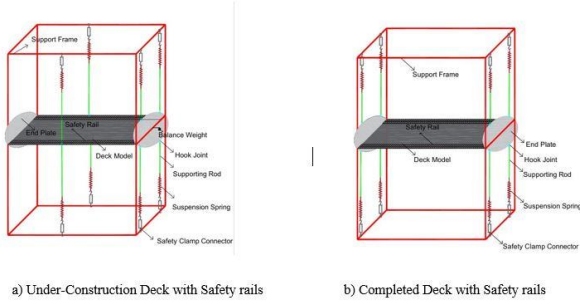


Fig. 1. Elastic sectional model configurations: complete bridge and under construction bridge.

where ρ is the air density and V is the wind velocity.

The lift force and pitching moment acting on the bridge deck can be expressed as

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_M \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_L \quad (3)$$

where B is the deck width, and C_L and C_M are the lift and pitching moment coefficients.

Assuming linear structural behavior, the static responses are given by

$$h = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2 B C_L}{K_h} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2 B^2 C_m}{K_\theta} \quad (5)$$

where h is the vertical displacement, θ is the torsional rotation, and K_h and K_θ denote the vertical and torsional stiffness, respectively. The measured responses included torsional rotation, vertical displacement, and oscillation amplitudes in both directions. The overall experimental uncertainty was estimated to be approximately $\pm 3\%$.

3- Results and Discussion

The aeroelastic responses obtained from the wind tunnel experiments are presented in Fig2 Fig3 and Fig4. The comparison of torsional rotations for the two configurations is shown in Fig 5. The results indicate that the under-construction configuration exhibits larger torsional rotations than the

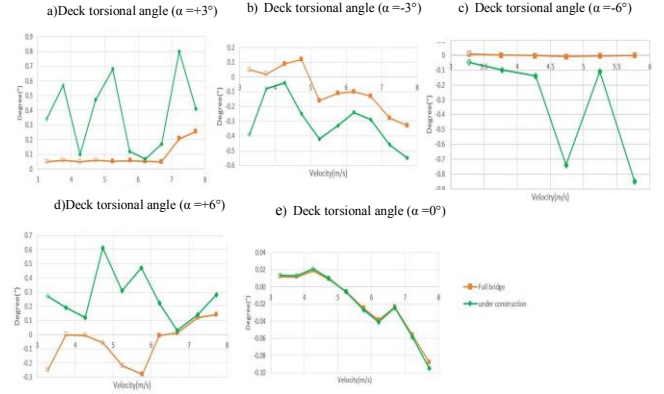


Fig. 2. Comparison of torsional rotation for the two structural configurations.

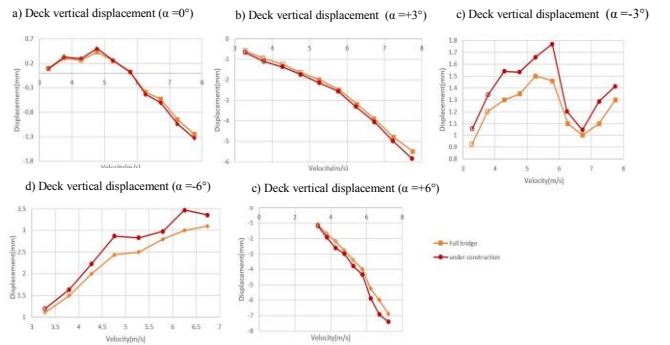


Fig. 3. Comparison of vertical displacement for the two structural configurations.

complete bridge configuration, particularly at higher wind speeds. This behavior is mainly attributed to the reduction in effective torsional stiffness and the change in boundary conditions during construction.

The vertical displacement results are presented in Fig3. Similar to the torsional response, the under-construction configuration generally shows larger vertical displacements over the tested wind speed range, confirming that the temporary structural system is more susceptible to aerodynamic excitation.

The torsional oscillation amplitudes are compared in Fig4. The experimental results demonstrate that the oscillation amplitude in the under-construction configuration is approximately 8.5% larger than that of the complete bridge configuration. This increase indicates stronger aeroelastic coupling due to reduced stiffness and modified structural constraints.

The influence of the angle of attack is also significant.

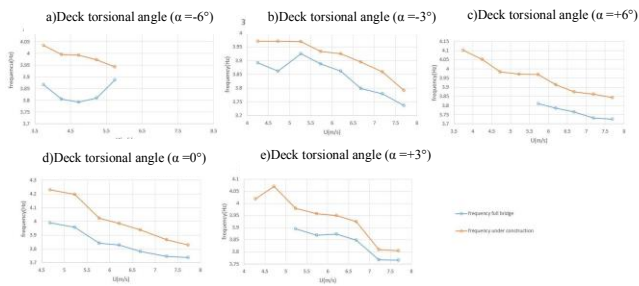


Fig. 4. Comparison of torsional oscillation amplitudes.

Variations in aerodynamic coefficients near the instability region cause noticeable changes in structural response. As wind speed increases, aerodynamic energy transfer to the structure intensifies, leading to a gradual growth in oscillation amplitude and possible development of limit cycle oscillations (LCO). The results highlight that the aeroelastic stability of the bridge deck evolves throughout the construction process. Structural modifications during construction alter stiffness distribution and boundary conditions, thereby shifting the aeroelastic stability boundary.

4- Conclusions

This study experimentally investigated the aeroelastic behavior of a shallow Π -section bridge deck in two structural states: the complete bridge configuration and the under-construction configuration. Wind tunnel tests were conducted at five angles of attack (0° , $\pm 3^\circ$, $\pm 6^\circ$) and wind speeds between 3.27 and 7.72 m/s. The results show that the under-construction configuration exhibits larger aeroelastic

responses than the complete bridge. In the static response, torsional rotation and vertical displacement increased by approximately 6% and 10%, respectively. In the dynamic response, torsional and vertical oscillation amplitudes increased by about 8.5% and 5.5%, respectively. In addition, the onset of instability occurred at lower wind speeds in the under-construction configuration, indicating a reduction in the aeroelastic stability margin during construction. Therefore, aeroelastic evaluation should consider multiple structural stages during bridge construction rather than only the final bridge configuration in order to ensure adequate safety against wind-induced instabilities.

References

- [1] Z.T. Zhang, Ge, Y.J., Aeroelastic stability of long-span bridge decks. *Engineering Structures*, Engineering Structures, 211 (2020) 110415.
- [2] Y. Tang, Hua, X.G., Chen, Z.Q., Experimental investigation of flutter characteristics of shallow Π section at postcritical regime. , *Journal of Fluids and Structures*, 88, (2019.) 275–291.
- [3] C. Hu, Zhou, Z., , Aeroelastic instability of cable-supported bridges., *Wind and Structures* 31 (4) (2020.) 289–302.
- [4] Y.L. Xu, Guo, W.H., Experimental investigation on torsional divergence of bridge decks., *Engineering Structures*, 233, (2021.) 111892.
- [5] X. Zhao, Zhang, Z.T., Construction-stage aeroelastic assessment of long-span bridges., *Journal of Bridge Engineering*, 27 (3), (2022.) 04022005.
- [6] J. Wang, Hua, X.G., Ge, Y.J., Influence of stiffness reduction on aeroelastic stability of bridge decks., *Engineering Structures*, 252, (2022.) 113644.



ارزیابی آزمایشگاهی پایداری آبروالاستیک عرشه II-شکل پل کابلی دهانه بلند در حال ساخت: مطالعه تونل باد وابسته به پیکربندی سازه‌ای

مهدی ایزک محمدی^{*}، سعیدرضا صباغ یزدی^{ID}

گروه مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳

کلمات کلیدی:

آبروالاستیسیته
در حال ساخت
پل کابلی دهانه بلند
واگرایی پیچشی
آزمایش تونل باد

خلاصه: در این پژوهش، رفتار آبروالاستیک یک مقطع کم عمق II-شکل متعلق به عرشه پل کابلی دهانه بلند در دو پیکربندی «کامل» و «در حال ساخت» به صورت آزمایش مقطع الاستیک در تونل باد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به آن که در مرحله ساخت، عرشه به صورت طره‌ای و با کاهش سختی مؤثر و تغییر شرایط مرزی عمل می‌کند، ارزیابی مستقل پایداری آبروالاستیک آن ضروری است. مدل مقیاس شده با دو درجه آزادی قائم و پیچشی نصب شد و آزمایش‌ها در بازه سرعت باد ۳/۲۷ تا ۷/۷۲ متر بر ثانیه و تحت زوایای مختلف حمله اولیه انجام گرفت. هدف اصلی پژوهش، بررسی اثر تغییر پیکربندی سازه‌ای بر مرز واگرایی استاتیکی و دامنه پاسخ دینامیکی بود. نتایج نشان داد که در پیکربندی مرحله ساخت، پاسخ استاتیکی پیچشی و قائم به ترتیب حدود ۶٪ و ۱۰٪ افزایش یافته است. همچنین دامنه نوسانات دینامیکی پیچشی و قائم به ترتیب حدود ۸/۵٪ و ۵/۵٪ بیشتر از حالت کامل اندازه‌گیری شد. در برخی زوایای حمله، آستانه شروع ناپایداری در سرعت‌های پایین‌تری نسبت به پیکربندی کامل رخ داد که بیانگر جابجایی مرز پایداری آبروالاستیک در اثر کاهش سختی و تغییر شرایط مرزی است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تعمیم رفتار حالت بهره‌برداری به مرحله ساخت می‌تواند منجر به برآورد غیرمحافظه کارانه مرز پایداری شود؛ بنابراین انجام مدل‌سازی اختصاصی آبروالاستیک در این مرحله برای طراحی ایمن پل‌های دهانه بلند توصیه می‌شود.

۱- مقدمه

آبروالاستیسیته به مطالعه اندرکنش متقابل میان رفتار الاستیک سازه و نیروهای آبرودینامیکی اطلاق می‌شود که در آن پاسخ سازه تابعی از کوپلینگ سازه-جریان است. ناپایداری‌های آبروالاستیک عرشه پل‌های دهانه بلند عمدتاً در قالب واگرایی پیچشی (آبروالاستیسیته استاتیکی) و فلاتر یا نوسانات خودتحریک (آبروالاستیسیته دینامیکی) بروز می‌کنند [۱-۳]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پایداری آبروالاستیک عرشه‌های کم عمق به شدت به سختی پیچشی مؤثر، نسبت جرم و شرایط مرزی وابسته است [۴-۶].

پل‌های کابلی دهانه بلند به دلیل نسبت سختی به وزن پایین و دهانه‌های بزرگ، در برابر تحریکات باد حساس هستند [۷-۹]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی رفتار آبروالاستیک عرشه‌های جعبه‌ای و II-شکل را در حالت بهره‌برداری کامل بررسی کرده‌اند و مرزهای واگرایی و فلاتر را به صورت تجربی و عددی تعیین نموده‌اند [۱۰-۱۳]. با این حال،

تمرکز اغلب این مطالعات بر پیکربندی نهایی سازه بوده و مرحله ساخت، که در آن عرشه به صورت طره‌ای و با شرایط مرزی موقت عمل می‌کند، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴].

در مرحله ساخت، کاهش سختی خمشی و پیچشی مؤثر، نبود پیوستگی کامل سیستم کابلی و توزیع نامتقارن جرم می‌تواند مشخصات دینامیکی سازه را تغییر دهد [۱۵-۱۷]. مطالعات تحلیلی اخیر نشان داده‌اند که تغییر سختی پیچشی می‌تواند منجر به جابجایی مرز واگرایی استاتیکی شود [۱۸] و کاهش میرایی مؤثر ممکن است آستانه فلاتر را تحت تأثیر قرار دهد [۱۹، ۲۰]. با این وجود، داده‌های تجربی مقایسه‌ای که رفتار عرشه در دو پیکربندی «کامل» و «در حال ساخت» را تحت شرایط نصب دینامیکی یکسان بررسی کرده باشند، بسیار محدود است [۲۱].

برخی پژوهش‌های عددی به بررسی رفتار عرشه در مراحل مختلف ساخت پرداخته‌اند، اما اعتبارسنجی آزمایشگاهی این نتایج کمتر گزارش شده است [۲۲، ۲۳]. همچنین گزارش شده است که حساسیت پاسخ آبروالاستیک

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: MehdiIzakmohammadi76@gmail.com



پایداری آیرولاستیک عرشه بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار دهد.

۲- مدل سازی در تونل باد

۲-۱- مشخصات تونل باد

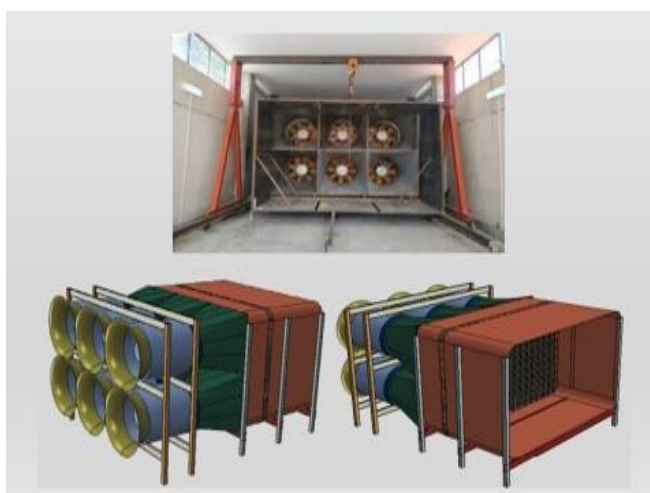
آزمایش ها در تونل باد لایه مرزی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد. این تونل از نوع مدار باز بوده و دارای مقطع آزمون به ابعاد $4/3$ متر طول و $2/9$ متر ارتفاع می باشد. شدت آشفته گی جریان در مقطع آزمون کمتر از $0/5$ درصد بوده که شرایط جریان یکنواخت (جریان صاف) را برای انجام آزمایش مقطع دوبعدی فراهم می کند. انتخاب جریان صاف بمنظور بررسی رفتار پایه ای آیرولاستیک مقطع و حذف اثرات ثانویه ناشی از آشفته گی محیطی صورت گرفته است تا مرز ناپایداری ذاتی مقطع بصورت دقیق تری قابل ارزیابی باشد.

۲-۲- مشخصات مدل مقطع

مدل مورد استفاده، مقطع کم عمق II- شکل با طول $1/54$ متر و نسبت عرض به عمق برابر با ۱۰ می باشد. این نسبت در محدوده متداول عرشه های کم عمق پل های کابلی دهانه بلند قرار دارد و بعنوان یک مقطع نماینده برای بررسی رفتار آیرولاستیک انتخاب شده است.

مدل از آلیاژ آلومینیوم ساخته شده تا:

- سختی کافی برای جلوگیری از تغییر شکل موضعی فراهم شود.
- رفتار کلی مقطع بصورت صلب در راستای طولی حفظ گردد.



شکل ۱. نمایی از تونل باد استفاده شده در این تحقیق.

Fig. 1. View of the wind tunnel used in this research.

به زاویه حمله جریان در مقاطع کم عمق می تواند در شرایط کاهش سختی تشدید شود [۲۴، ۲۵].

از سوی دیگر، مقررات بارگذاری باد، سرعت مبنای آماری را تعریف می کنند اما دستورالعمل مشخصی برای اصلاح مرز پایداری آیرولاستیک عرشه پل در مرحله ساخت ارائه نمی دهند. بنابراین تعمیم مستقیم رفتار حالت کامل به مرحله ساخت نیازمند بررسی تجربی و کمی می باشد [۲۶، ۲۷]. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آزمایشگاهی رفتار آیرولاستیک یک مقطع کم عمق II- شکل متعلق به عرشه پل کابلی دهانه بلند در دو پیکربندی «کامل» و «در حال ساخت» انجام شده است. مدل مقطع الاستیک با دو درجه آزادی قائم و پیچشی در تونل باد آزمایش شده و اثر تغییر پیکربندی سازه ای بر:

آستانه واگرایی پیچشی استاتیکی،

دامنه پاسخ دینامیکی پیچشی و قائم،

وابستگی مرز ناپایداری به زاویه حمله جریان باد،

بصورت کمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می تواند

در درک بهتر پایداری آیرولاستیک عرشه در مرحله ساخت و لزوم ارزیابی اختصاصی آن در طراحی پل های دهانه بلند مؤثر باشد.

با وجود پژوهش های گسترده درباره رفتار آیرولاستیک عرشه پل ها، بیشتر مطالعات موجود عمدتاً بر پیکربندی نهایی و کامل پل تمرکز داشته اند، در حالی که پاسخ آیرولاستیک در مرحله ساخت توجه بسیار کمتری دریافت کرده است. با این حال، در طول مرحله ساخت، تغییرات در سختی سازه، توزیع جرم و شرایط تکیه گاهی می تواند بطور قابل توجهی بر پایداری آیرولاستیک عرشه پل تأثیر بگذارد. در این پژوهش، ویژگی های رفتار آیرولاستیک یک عرشه پل کم عمق با استفاده از آزمایش تونل باد و تحت دو پیکربندی سازه ای مختلف که نمایانگر پل کامل و مرحله ساخت هستند مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. با تغییر آرایش فنرها و توزیع سختی در سیستم آزمایش تونل باد، پاسخ های پیچشی و قائم عرشه بطور سیستماتیک مقایسه شده اند. نتایج این مطالعه چارچوبی تجربی برای ارزیابی تأثیر پیکربندی های موقت سازه ای بر رفتار آیرولاستیک عرشه ارائه می دهد و امکان مقایسه مستقیم پاسخ های دینامیکی در دو وضعیت سازه ای متفاوت را فراهم می کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین بر روی مقاطع کم عمق II- شکل که عمدتاً رفتار آیرولاستیک را در یک پیکربندی سازه ای ثابت بررسی کرده اند، این پژوهش بطور خاص بر نقش تغییر پیکربندی سازه در طول فرآیند ساخت تمرکز دارد و تلاش می کند اثر این تغییرات را بر شرایط

خارج از صفحات انتهایی به قسمت مرکزی مدل بخش جلوگیری شود، که شرایط جریان دو بعدی را برای مدل مقطعی که تحت نوسان دامنه بزرگ قرار می گیرد، تضمین می کند. پارامترهای اصلی مدل در جدول (۱) ذکر شده است.

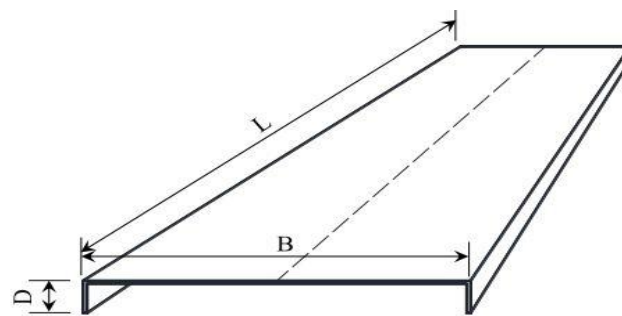
۲-۳- سیستم نصب الاستیک

مدل بصورت الاستیک و با استفاده از هشت فنر مارپیچ نصب شد که امکان حرکت در دو درجه آزادی قائم و پیچشی را فراهم می کند. سختی اسمی هر فنر ۴۰۰ نیوتن بر متر بوده و حداکثر تغییر طول آن ۸۰۰ میلی متر است.

هدف از این آرایش، شبیه سازی رفتار مقطع الاستیک با دو مود غالب قائم و پیچشی و بررسی اندرکنش آن با جریان باد می باشد.

در این تحقیق، دو پیکربندی سازه ای مورد بررسی قرار گرفت:

۱. پیکربندی کامل: آرایش متقارن فنرها و توزیع یکنواخت جرم
۲. پیکربندی در حال ساخت: جابجایی چهار فنر به بخش مرکزی و آزادسازی یک سمت مقطع بمنظور شبیه سازی شرایط طره ای و کاهش سختی مؤثر



شکل ۲. شکل نمادین عرشه ساخته شده در این تحقیق.

Fig. 2. Schematic of the deck fabricated in this research.

ضخامت بدنه ۴ میلی متر در نظر گرفته شده که سختی خمشی موضعی کافی ایجاد می کند و از اثرات پوسته ای ناخواسته جلوگیری می نماید. دو صفحه انتهایی بیضی شکل بزرگ ساخته شده از آلومینیم با ضخامت ۲ میلی متر، با حداکثر ارتفاع ۱۰ برابر بزرگتر از عمق مدل و حداکثر عرض ۳ برابر بیشتر از عرض مدل، در انتهای مدل نصب شده است تا از جریان هوای



شکل ۳. مقطع مدل الاستیک در تونل باد.

Fig. 3. Elastic model section in the wind tunnel.

جدول ۱. ابعاد مقطع II ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

Table 1. Dimensions of the II-section fabricated at K.N. Toosi University of Technology laboratory.

پارامتر	مقدار (متر)
طول	۱/۵۴
عرض	۰/۴
ضخامت	۰/۰۴

۲-۵- تحلیل عدم قطعیت آزمایش ها

در آزمایش های تونل باد، عدم قطعیت اندازه گیری می تواند از منابع مختلفی ناشی شود که مهم ترین آن ها شامل نوسانات سرعت جریان در تونل باد، دقت ابزارهای اندازه گیری جابجایی و تغییرزاویه پیچشی، و خطاهای مربوط به ثبت و پردازش داده ها است. بمنظور ارزیابی میزان اطمینان پذیری نتایج آزمایشگاهی، یک تحلیل عدم قطعیت با در نظر گرفتن منابع اصلی خطا انجام شد. بر اساس استاندارد ASME PTC 19.1، عدم قطعیت ترکیبی منابع مستقل خطا با استفاده از روش جمع مربعات ریشه ای (Root Sum Square - RSS) محاسبه می شود:

$$U = \sqrt{(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2)} \quad (2)$$

که در آن:

U عدم قطعیت کل اندازه گیری

U_i عدم قطعیت مربوط به هر منبع خطا

با توجه به مشخصات تجهیزات اندازه گیری و شرایط عملکرد تونل باد، منابع اصلی عدم قطعیت و مقدار تقریبی آن ها بصورت زیر در نظر گرفته شد: با استفاده از روش RSS، عدم قطعیت کلی بصورت زیر محاسبه می شود:

$$U = \sqrt{2^2 + 2^2 + 1^2}$$

$$U = \sqrt{9}$$

$$U = 3\%$$

با یکسان نگه داشتن سختی اسمی فنرها در هر دو حالت، اثر تغییر شرایط مرزی و توزیع جرم بطور مستقل بررسی شده است.

۲-۴- فرضیات مدل سازی و معیارهای ارزیابی ناپایداری

مدل بصورت مقطع الاستیک دوبعدی در نظر گرفته شده و تمرکز پژوهش بر مقایسه نسبی مرز پایداری آیروالاستیک بین دو پیکربندی سازه ای است. سرعت کاهش یافته بصورت زیر تعریف می شود:

$$v_r = \frac{v}{f_B} \quad (1)$$

که در آن:

- سرعت جریان باد
 - فرکانس طبیعی مود مورد بررسی
 - عرض مقطع عرشه
- می باشد.

آستانه واگرایی استاتیکی بعنوان سرعتی تعریف شده است که پس از آن تغییر زاویه پیچشی یا جابجایی قائم بدون بازگشت به تعادل افزایش یابد. ناپایداری دینامیکی نیز زمانی در نظر گرفته شده است که نوسانات پایدار با دامنه محدود حول وضعیت تعادل شکل گیرد.

هدف اصلی آزمایش ها تعیین جابجایی مرز پایداری بین دو پیکربندی کامل و در حال ساخت بوده است، نه بازتولید دقیق رفتار مقیاس کامل سازه.

جدول ۲. مقدار اندازه گیری شده عدم قطعیت اندازه گیری ها.

Table 2. Measured value of the uncertainty of measurements.

منبع عدم قطعیت	مقدار عدم قطعیت (%)
سرعت باد	۲
جابجایی مدل	۲
دقت تجهیزات و سیستم ثبت داده	۱

در حالت تعادل استاتیکی، این گشتاور با سختی پیچشی سازه متعادل می‌شود:

$$K_{\theta}\theta = M_a \quad (5)$$

بنابراین زاویه پیچش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2 B^2 C_m}{K_{\theta}} \quad (6)$$

این رابطه نشان می‌دهد زاویه پیچش با مجذور سرعت باد افزایش می‌یابد و بصورت معکوس با سختی پیچشی سیستم متناسب است. بنابراین کاهش سختی پیچشی در مرحله ساخت می‌تواند باعث افزایش پاسخ پیچشی سازه شود.

همچنین برای جابجایی قائم، نیروی برا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 B C_L \quad (7)$$

که در آن C_L ضریب برا است. تعادل سازه‌ای در راستای قائم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$K_h h = F_L \quad (8)$$

که در نتیجه جابجایی قائم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2 B C_L}{K_h} \quad (9)$$

این رابطه نشان می‌دهد که جابجایی قائم نیز با مجذور سرعت باد افزایش یافته و با کاهش سختی قائم سیستم افزایش می‌یابد. این روابط مبنای فیزیکی برای تفسیر نتایج تجربی ارائه شده در بخش نتایج هستند.

بنابراین عدم قطعیت کلی مرتبط با پاسخ‌های آیروالاستیک اندازه‌گیری شده در این آزمایش‌ها حدود $\pm 3\%$ برآورد می‌شود.

برای پارامترهای پاسخ آیروالاستیک مانند جابجایی قائم (y) و تغییرزاویه پیچشی (θ)، انتشار عدم قطعیت اندازه‌گیری نیز می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\delta \theta}{\theta}\right)^2} \quad (3)$$

که در آن:

R پاسخ آیروالاستیک اندازه‌گیری شده

V سرعت باد

y جابجایی قائم

θ تغییرزاویه پیچشی

نتایج نشان می‌دهد که سطح عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها نسبت به اختلاف‌های مشاهده شده بین پیکربندی پل کامل و درحال ساخت کوچک است. بنابراین تغییرات مشاهده شده در پاسخ‌های آیروالاستیک عمدتاً ناشی از تغییر در سختی سازه و شرایط تکیه‌گاهی بوده و ناشی از خطاهای اندازه‌گیری نیست.

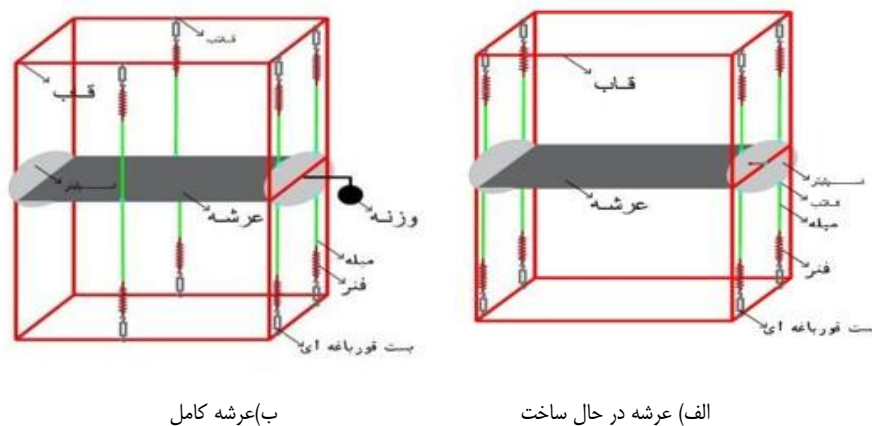
بمنظور بررسی تکرارپذیری نتایج (repeatability)، تعدادی از آزمایش‌ها در شرایط یکسان بیش از یک بار انجام شد و مقایسه نتایج نشان داد که اختلاف بین تکرارها در محدوده عدم قطعیت محاسبه شده قرار دارد که بیانگر پایداری و قابلیت اعتماد اندازه‌گیری‌ها است.

۲-۶- مبنای تئوری پاسخ آیروالاستیک

برای تفسیر مکانیکی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش تونل باد، می‌توان از روابط پایه آیروالاستیک استفاده کرد. گشتاور آیرودینامیکی وارد بر مقطع عرشه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M_a = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_m \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی هوا، V سرعت باد، عرض مقطع عرشه و C_m ضریب گشتاور آیرودینامیکی است.



شکل ۴. شماتیک عرشه های ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

Fig. 4. Schematic of the decks fabricated at K.N. Toosi University of Technology laboratory.

ب) حالت پل در حال ساخت: با انتقال چهار فنر به مرکز و آزاد کردن گوشه سمت راست (شکل ۴)، تغییرات بار و نامتقارنی باعث افزایش تغییر زاویه پیچشی می شود. با اضافه کردن وزنه به سمت راست عرشه بمنظور تعادل سازی ممکن است باعث کاهش جابجایی قائم در آن سمت شود، اما در عین حال، تغییر زاویه پیچشی در کل عرشه به دلیل توزیع نامتقارن نیروها افزایش می یابد.

نتایج ارائه شده در شکل (۵) نشان می دهد که تغییر زاویه پیچشی عرشه با افزایش سرعت باد در پیکربندی مرحله ساخت سریع تر از حالت پل کامل افزایش می یابد. بر اساس روابط آیرودلاستیک ارائه شده در بخش «مبانی تئوری»، زاویه پیچش با مجذور سرعت باد متناسب بوده و بصورت معکوس با سختی پیچشی مؤثر (K_θ) تغییر می کند. بنابراین کاهش سختی پیچشی در مرحله ساخت موجب افزایش محسوس حساسیت سیستم نسبت به ممان های آیرودینامیکی می شود. بطور خاص، شیب تندتر منحنی پاسخ پیچشی در حالت مرحله ساخت نشان می دهد که گشتاور آیرودینامیکی M_a ، که طبق رابطه $M_a \propto V^2$ با سرعت باد رشد می کند، قادر است تغییرات پیچشی بزرگتری در مقایسه با حالت تکمیل شده ایجاد کند. این موضوع بیانگر تعامل قوی تر بارگذاری آیرودینامیکی با مود پیچشی سازه است.

علاوه بر این، مشاهده می شود که در برخی زوایای حمله، نشانه های آغاز واگرایی پیچشی در سرعت های پایین تری در پیکربندی مرحله ساخت رخ می دهد. این رفتار با روابط تئوریک نیز سازگار است، زیرا کاهش سختی پیچشی باعث جابه جایی مرز پایداری آیرودلاستیک به سمت سرعت های

۳- نتایج و تحلیل پاسخ آیرودلاستیک

بمنظور ارزیابی قابلیت اعتماد مشاهدات آزمایشگاهی، عدم قطعیت مرتبط با پاسخ های اندازه گیری شده همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد بررسی گردید. مقدار عدم قطعیت اندازه گیری ها حدود $\pm 3\%$ برآورد شده است. کوچک بودن دامنه عدم قطعیت نشان می دهد که تفاوت های مشاهده شده بین پیکربندی پل کامل و در حال ساخت ناشی از اثرات واقعی آیرودینامیکی و سازه ای است و ناشی از خطای اندازه گیری نیست.

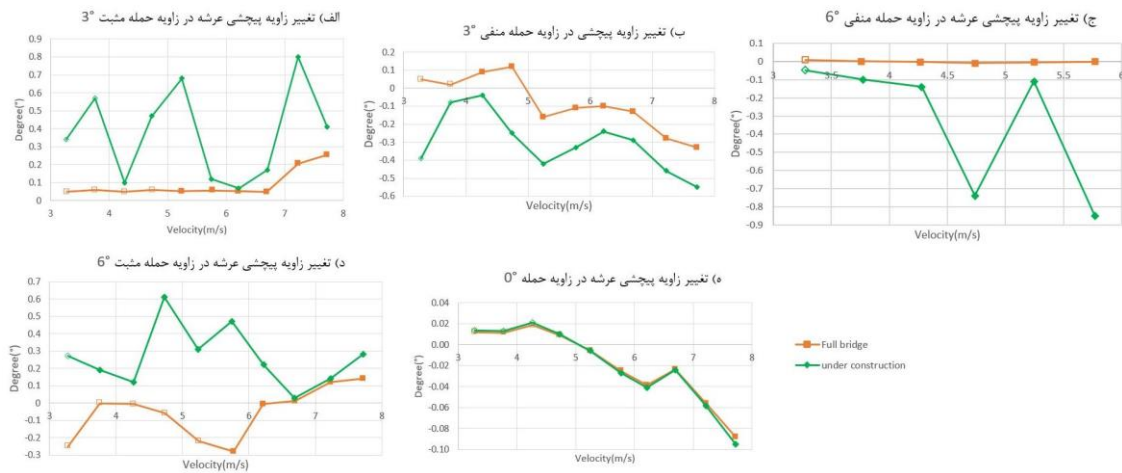
تمامی آزمایش های انجام شده تحقیق حاضر، شامل تغییر زاویه عرشه تحت اثر پیچش، تغییرات جابجایی قائم عرشه، دامنه نوسان عرشه تحت اثر تغییر زاویه پیچشی عرشه و جابجایی قائم در پنج زاویه حمله ($0^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$) و در بازه سرعت $3/27$ متر بر ثانیه تا $7/27$ متر بر ثانیه انجام شده است.

۳-۱- مقایسه تغییر زاویه پیچشی عرشه پل کامل و در حال ساخت

با توجه به این که فنرها و سرعت باد در دو حالت عرشه پل کامل و عرشه پل در حال ساخت یکسان هستند، تفاوت ها در جابجایی قائم و تغییر زاویه پیچشی عمدتاً به تغییر در نحوه اتصال عرشه و توزیع بار در اثر تغییر در آرایش فنرها و وزنه مربوط می شود. تاثیر آرایش فنرها و وزنه در تغییر زاویه پیچشی در حالت مقایسه به صورت زیر می باشد:

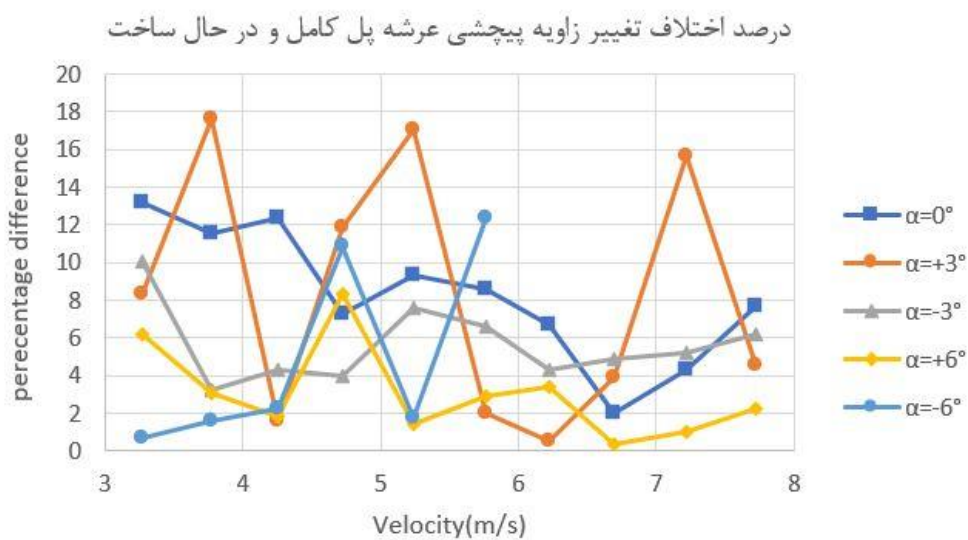
۱. تغییر زاویه پیچشی

الف) حالت پل کامل: نیروهای باد تاثیر پیچشی کمتری دارند، زیرا نیروها بطور متقارن توزیع می شوند و در این حالت پیچش کم و در کل عرشه توزیع شده است.



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش تغییر زاویه پیچشی عرشه در حال ساخت با پل کامل (○ نماد رفتار آیرودالاستیسیته استاتیکی - ● نماد پاسخ آیرودالاستیسیته دینامیکی)

Fig. 5. Comparison of experimental results for torsional angle response of the in-construction deck with the complete bridge (○ Symbol for static aeroelastic behavior - ● Symbol for dynamic aeroelastic response)



شکل ۶. درصد اختلاف زاویه پیچشی عرشه پل کامل و در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت های مختلف.

Fig. 6. Percentage difference in torsional angle of the complete bridge and in-construction deck at different angles of attack and speeds.

روابط آیرودالاستیک، پاسخ پیچشی تابعی از گشتاور آیرودینامیکی (M_a) و سختی پیچشی سازه (K_θ) است. بنابراین با افزایش سرعت باد و در زوایای حمله‌ای که ضریب ممان آیرودینامیکی (C_m) بزرگ‌تر است، مقدار گشتاور اعمالی افزایش یافته و اختلاف پاسخ پیچشی بین دو پیکربندی

پایین‌تر شده و سطح پایداری سیستم را کاهش می‌دهد.

اختلاف درصدی تغییرزاویه پیچشی بین پیکربندی پل کامل و در حال ساخت در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار این اختلاف به شدت به زاویه حمله اولیه جریان بستگی دارد. بر اساس

جدول ۳. مقایسه حد سرعت استاتیکی تغییر زاویه پیچشی عرشه پل در حال ساخت و کامل در زوایای مختلف.

Table 3. Comparison of static divergence speed for torsional angle of the in-construction deck and complete bridge at various angles of attack.

زاویه حمله اولیه باد (°)	پل در حال ساخت		پل کامل	
	سرعت (متر بر ثانیه)	زاویه (°)	سرعت (متر بر ثانیه)	زاویه (°)
۰	۴/۲۷	۰/۰۲۲	۴/۲۷	۰/۰۱۹
+۳	۳/۷۵	۳/۵۷	۴/۷۴	۳/۰۵۸۵
-۳	۳/۷۵	-۳/۰۸	۳/۷۵	-۲/۹۸
+۶	۳/۲۷	۶/۲۷	۵/۲۴	۶/۲۲
-۶	۳/۲۷	-۶/۰۵	۳/۲۷	-۶/۰۰۷

در مقابل، اختلافها بین دو پیکربندی در زوایای حمله منفی نسبتاً کوچک است که نشان می‌دهد ویژگی‌های ممان آیرودینامیکی در این بازه کمتر به پیکربندی سازه حساس هستند. در مجموع، نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه مرحله سازه‌ای بر رفتار آیرواستاتیکی عرشه پل است.

۳-۲- مقایسه جابجایی قائم عرشه پل کامل و در حال ساخت

تأثیر آرایش فترها و وزنه در جابجایی قائم در حالت مقایسه بصورت زیر می‌باشد:

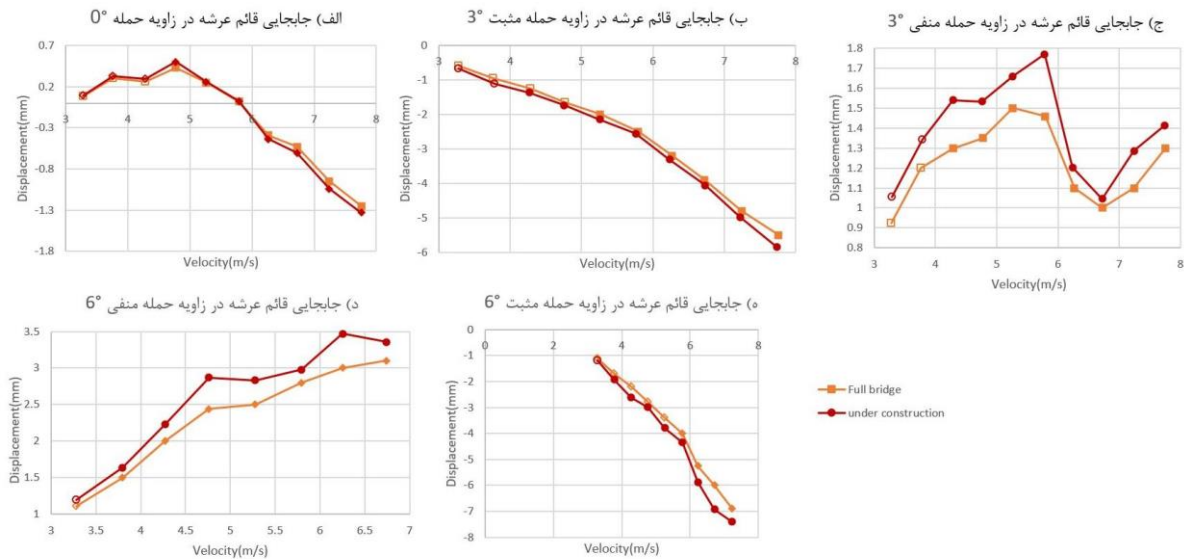
(ج) حالت پل کامل: عرشه از دو طرف با فنرهای یکسان متصل است که باعث توزیع متوازن نیروها و کمینه سازی جابجایی قائم می‌شود لذا جابجایی عمودی در این حالت معمولاً کمتر است و نیروها بطور یکنواخت تری در عرشه توزیع می‌شوند.

(د) حالت پل در حال ساخت: به دلیل نامتقارن بودن و وزنه اضافی، توزیع نیروها یکنواخت نیست لذا جابجایی قائم خصوصاً جابجایی قائم قسمت آزاد عرشه نسبت به حالت اولیه بیشتر است.

شکل (۷) پاسخ جابجایی قائم عرشه پل را برای دو پیکربندی پل کامل و در حال ساخت مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی قائم در مرحله ساخت بطور کلی در بیشتر بازه سرعت باد آزمایش‌شده، بزرگ‌تر از حالت پل کامل است.

سازه‌ای تشدید می‌شود. بیشترین اختلافها در زوایایی مشاهده می‌شوند که توزیع فشار آیرودینامیکی تعامل قوی‌تری با مود پیچشی عرشه دارد. این مشاهده نشان‌دهنده حساسیت بالاتر پیکربندی در حال ساخت به تحریکات آیرودینامیکی است و اهمیت در نظر گرفتن شرایط موقت سازه در ارزیابی عملکرد آیرواستیک عرشه پل را برجسته می‌کند.

جدول (۳) پاسخ آیرواستاتیکی عرشه پل را تحت زوایای اولیه مختلف حمله، برای هر دو پیکربندی در حال ساخت و پل کامل، ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ پیچشی با افزایش مقدار زاویه اولیه افزایش می‌یابد که این امر با افزایش ممان آیرودینامیکی وارد بر عرشه سازگار است. بر اساس تئوری آیرواستیک، ممان آیرودینامیکی را می‌توان بصورت $M_a = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_m$ بیان کرد. بنابراین، تغییر شکل پیچشی حاصل را می‌توان از رابطه $\theta = M_a / K_\theta$ تخمین زد. مقایسه میان دو پیکربندی سازه‌ای نشان می‌دهد که مدل در حال ساخت عموماً پاسخ آیرواستاتیکی را در سرعت‌های باد پایین‌تری تجربه می‌کند، بویژه در زوایای حمله مثبت. بعنوان مثال، در زوایای اولیه 6° و 30° ، این پاسخ برای مرحله ساخت به ترتیب در سرعت‌های $3/37$ و $3/75$ متر بر ثانیه رخ می‌دهد، در حالی که برای پل کامل به $5/24$ و $4/74$ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. این تفاوت را می‌توان به سختی بیشتر سازه و توزیع بهتر بار در پیکربندی پل کامل نسبت داد.



شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایش جابجایی قائم عرشه در حال ساخت با پل کامل. (○ نماد رفتار آیرودالاستیسیته استاتیکی - ● نماد پاسخ آیرودالاستیسیته دینامیکی)

Fig. 7. Comparison of experimental results for vertical displacement of the in-construction deck with the complete bridge (○ Symbol for static aeroelastic behavior - ● Symbol for dynamic aeroelastic response)

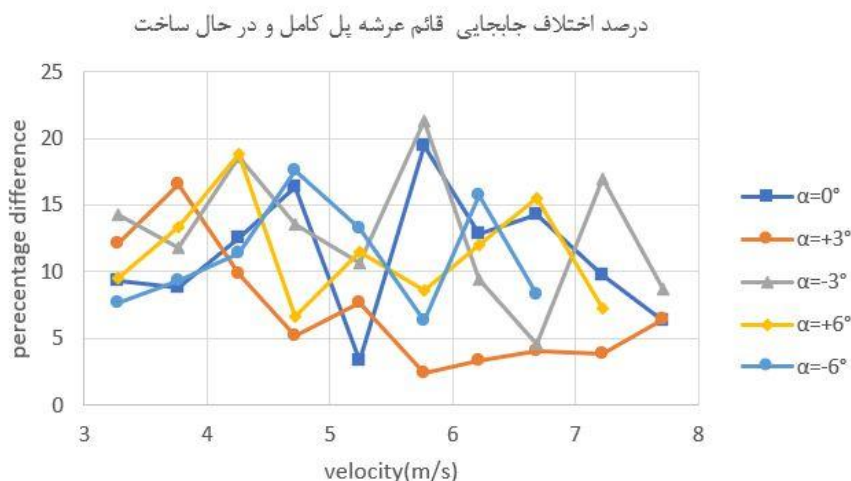
آیرودالاستیک عرشه پل را بطور قابل توجهی تغییر دهد و بنابراین ارزیابی این شرایط در تحلیل‌های طراحی ضروری است.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که پاسخ قائم عرشه تحت زوایای اولیه مختلف، رفتار متفاوتی در دو وضعیت پل در حال ساخت و پل کامل دارد. در حالت در حال ساخت، تغییرات جابجایی در زوایای مثبت و منفی تقریباً متقارن بوده و مقادیر حداکثر عمدتاً در محدوده ۱ تا ۱٫۳ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این موضوع بیانگر آن است که در این مرحله، نیروی برا ناشی از باد تغییرات محدودی نسبت به زاویه داشته و سختی قائم سازه نیز مانع از بروز پاسخ‌های بزرگ‌تر شده است. با این حال، در مرحله پل کامل، رفتار سازه بطور محسوسی نسبت به زوایای مثبت حساس‌تر شده و مقادیر جابجایی منفی افزایش قابل توجهی داشته‌اند؛ بطور خاص، در زاویه $+6^\circ$ جابجایی از مقدار $-۱٫۲$ میلی‌متر در مرحله ساخت به $-۳٫۴$ میلی‌متر افزایش یافته است که نشان‌دهنده رشدی بیش از ۱۸۰٪ است. این تغییر آشکار حاکی از آن است که پس از تکمیل عرشه، پارامترهای آیرودینامیکی مؤثر بر ضریب برا $C_L(\alpha)$ افزایش یافته و در کنار کاهش سختی مؤثر قائم K_h ، موجب تشدید پاسخ قائم شده است. طبق رابطه $h = \frac{F_L}{K_h}$ ، هرگونه افزایش در نیروی برا یا کاهش در سختی سازه بصورت مستقیم به افزایش دامنه

بر اساس روابط آیرودالاستیک، جابجایی قائم به نیروی برا (F_L) و سختی قائم سازه (K_h) وابسته است. در نتیجه با افزایش سرعت باد، نیروی آیرودینامیکی وارد بر عرشه افزایش یافته و در صورتی که سختی قائم مؤثر کاهش یافته باشد، مقدار جابجایی قائم نیز بیشتر خواهد شد. این افزایش می‌تواند به کاهش سختی خمشی مؤثر و تغییر در شرایط تکیه‌گاهی ناشی از آرایش متفاوت سازه نسبت داده شود. در نتیجه، اندرکنش بین مود ارتعاش قائم و نیروهای آیرودینامیکی تقویت شده و منجر به پاسخ‌های قائم بزرگ‌تر تحت شرایط باد مشابه می‌شود.

اختلاف درصدی جابجایی قائم بین دو پیکربندی سازه‌ای در شکل (۸) نشان داده شده است. اگرچه پاسخ قائم نیز تحت تأثیر پیکربندی در حال ساخت قرار می‌گیرد، اما مقدار این اثر معمولاً کمتر از اثری است که در پاسخ پیچشی مشاهده می‌شود.

این رفتار با مبانی تئوریک نیز سازگار است، زیرا تغییرات در شرایط مرزی و سختی سازه در مرحله ساخت معمولاً تأثیر بزرگ‌تری بر سختی پیچشی (K_θ) نسبت به سختی قائم (K_h) دارند. در نتیجه، مود پیچشی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پیکربندی سازه‌ای نشان می‌دهد. با این حال، اختلاف‌های مشاهده‌شده تأیید می‌کنند که مرحله ساخت می‌تواند رفتار کلی



شکل ۸. درصد اختلاف جابجایی قائم عرشه پل کامل و در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت های مختلف.

Fig. 8. Percentage difference in vertical displacement of the complete bridge and in-construction deck at different angles of attack and speeds

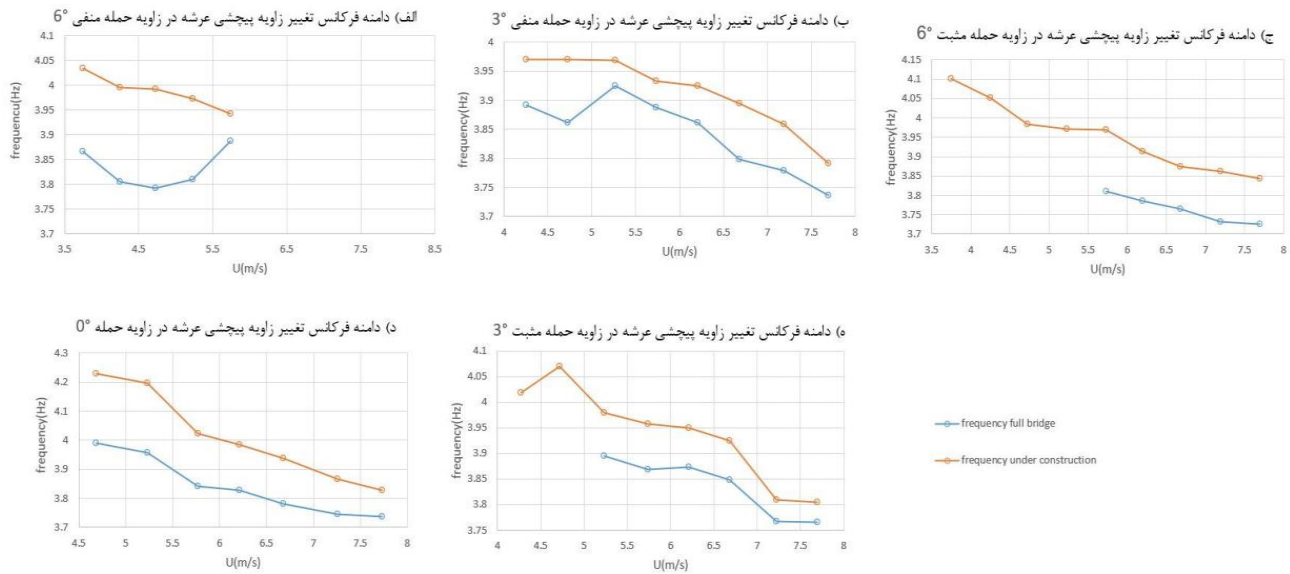
جدول ۴. مقایسه حداکثر سرعت جابجایی استاتیکی عرشه پل در حال ساخت و کامل در آزمایش جابجایی قائم.

Table 4. Comparison of maximum static vertical displacement speed of the in-construction deck and complete bridge in the vertical displacement test

زاویه حمله اولیه باد (°)	پل در حال ساخت		پل کامل	
	سرعت (متر بر ثانیه)	زاویه (°)	سرعت (متر بر ثانیه)	زاویه (°)
۰	۴/۲۷	۰/۰۲۲	۴/۲۷	۰/۰۱۹
+۳	۳/۷۵	۳/۵۷	۴/۷۴	۳/۰۵۸۵
-۳	۳/۷۵	-۳/۰۸	۳/۷۵	-۲/۹۸
+۶	۳/۲۷	۶/۲۷	۵/۲۴	۶/۲۲
-۶	۳/۲۷	-۶/۰۵	۳/۲۷	-۶/۰۰۷

در این حالت می‌باشد. در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که تکمیل عرشه موجب افزایش قابل توجه حساسیت آیرودینامیکی سازه نسبت به زوایای مثبت شده و اهمیت بررسی مراحل مختلف ساخت را در تحلیل رفتار آیرودینامیک پل برجسته می‌سازد.

جابجایی منجر می‌شود. علاوه بر این، سرعت‌های متناظر با هر زاویه نشان می‌دهند که بیشترین سرعت مربوط به زاویه $+6^\circ$ در پل کامل است که تأییدی بر افزایش برای آیرودینامیکی و نیاز به سرعت‌های بالاتر برای رسیدن به تعادل استاتیکی



شکل ۹. نتایج دامنه نوسان تغییر زاویه پیچشی عرشه پل در حال ساخت با نوسان پل کامل.

Fig. 9. Results of torsional angle oscillation amplitude for the in-construction deck compared to the complete bridge.

۳-۳- دامنه نوسان پیچشی و جابجایی قائم

پل‌های کامل به دلیل دستیابی به سختی و توزیع جرم نهایی، رفتار دینامیکی پایدارتر و دامنه نوسان قابل‌پیش‌بینی‌تری در مقایسه با مراحل ساخت نشان می‌دهند. در مقابل، در مرحله ساخت به دلیل تغییرات پیوسته در سختی، جرم و شرایط مرزی سازه، پاسخ آیروالاستیک عرشه می‌تواند ناپایدارتر و با دامنه نوسان بزرگ‌تری همراه باشد. از این‌رو، بررسی دامنه نوسانات در مراحل مختلف ساخت برای ارزیابی پایداری آیروالاستیک سازه ضروری است.

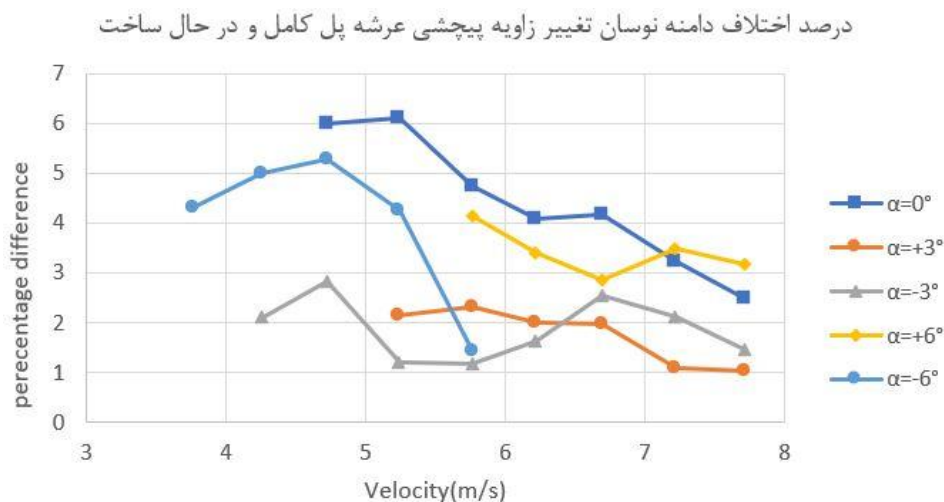
دامنه نوسان پیچشی عرشه پل در مرحله ساخت در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج آزمایش، افزایش پاسخ پیچشی سازه را در این مرحله نشان می‌دهد، بطوری‌که دامنه نوسان حدود ۸٫۵ درصد افزایش یافته است. این افزایش بیانگر تقویت برهم‌کنش آیرودینامیکی بین جریان هوا و مود پیچشی سازه در شرایطی است که سختی مؤثر سیستم کاهش یافته است.

از دیدگاه آیروالاستیسیته، پاسخ پیچشی سازه حاصل تعادل بین ممان آیرودینامیکی و سختی پیچشی سازه است. با توجه به اینکه ممان آیرودینامیکی با فشار دینامیکی جریان متناسب بوده، پاسخ پیچشی بطور کیفی با رابطه $\theta \propto \frac{V^2}{K_\theta}$ قابل بیان است. در مرحله ساخت، به دلیل کامل

نبودن پیوستگی سازه و شرایط مرزی موقت، سختی پیچشی مؤثر کاهش می‌یابد و در نتیجه دامنه پاسخ پیچشی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین افزایش دامنه نوسان مشاهده‌شده در شکل (۹) را می‌توان ناشی از کاهش سختی پیچشی مؤثر و تقویت کوپل آیروالاستیک بین جریان هوا و مود پیچشی عرشه در مرحله ساخت دانست. به منظور درک دقیق‌تر میزان تفاوت پاسخ پیچشی در دو حالت پل کامل و پل در حال ساخت، درصد اختلاف دامنه نوسان پیچشی در شرایط مختلف زاویه حمله و سرعت جریان در شکل (۱۰) ارائه شده است.

نتایج مربوط به درصد اختلاف دامنه نوسان پیچشی عرشه پل کامل و در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار اختلاف دامنه تغییر زاویه پیچشی بطور قابل توجهی به زاویه حمله و سرعت جریان وابسته است و در برخی شرایط به بیش از حدود ۶ درصد می‌رسد. این رفتار نشان می‌دهد که پاسخ پیچشی سازه علاوه بر سرعت باد، به تغییرات شرایط آیرودینامیکی ناشی از زاویه حمله نیز حساس است.

بیشینه اختلاف دامنه تغییر زاویه پیچشی در زوایای حمله‌ای مشاهده می‌شود که به شرایط بحرانی مود پیچشی نزدیک‌تر هستند. در این محدوده،



شکل ۱۰. درصد اختلاف دامنه نوسان تغییر زاویه پیچشی عرشه پل کامل و در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت های مختلف

Fig. 10. Percentage difference in torsional angle oscillation amplitude of the complete bridge and in-construction deck at different angles of attack and speeds.

از حالت پل کامل است که این موضوع را می توان به کاهش سختی مؤثر و تغییر شرایط مرزی سازه در مرحله ساخت نسبت داد. همچنین مشاهده می شود که تأثیر زاویه حمله بر دامنه پاسخ قائم محسوس بوده و در برخی زوایا اختلاف پاسخ بین دو حالت سازه بیشتر می شود که بیانگر حساسیت پاسخ قائم به تغییرات شرایط آیرودینامیکی جریان است.

همان گونه که در نتایج دامنه نوسان زاویه پیچشی نیز مشاهده شد، روند نمودارهای دامنه نوسان جابجایی قائم شکل (۱۱) برای پل در حال ساخت همانند پل کامل با افزایش سرعت باد کاهشی است.

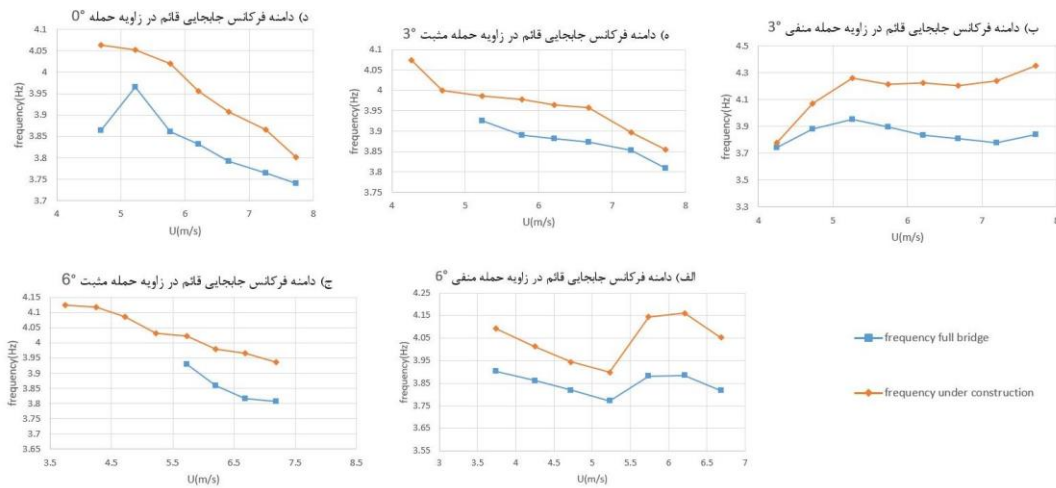
بمنظور ارزیابی دقیق تر میزان تفاوت پاسخ قائم عرشه در دو حالت پل کامل و پل در مرحله ساخت، درصد اختلاف دامنه نوسان جابجایی قائم در سرعت ها و زوایای حمله مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است.

نتایج درصد اختلاف دامنه نوسان جابجایی قائم عرشه پل کامل و پل در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت های مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان طور که از نمودار مشاهده می شود، مقدار این اختلاف به زاویه حمله و سرعت جریان وابستگی قابل توجهی دارد. بیشترین اختلاف مربوط به زاویه حمله $\alpha=-3^\circ$ است که در برخی سرعت ها به مقادیری در حدود ۲۰ درصد می رسد، در حالی که در سایر زوایا مقدار اختلاف بطور کلی

حساسیت سیستم به تغییرات سختی و شرایط مرزی افزایش می یابد و در نتیجه تفاوت بین پاسخ پل کامل و سازه در حال ساخت بیشتر نمایان می شود. از دیدگاه آیرودینامیک، تغییر زاویه حمله باعث تغییر در ضرایب آیرودینامیکی و در نتیجه تغییر در ممان آیرودینامیکی وارد بر عرشه می شود. هنگامی که این ممان در شرایطی قرار گیرد که با مود پیچشی سازه برهم کنش قوی تری داشته باشد، دامنه پاسخ پیچشی افزایش می یابد.

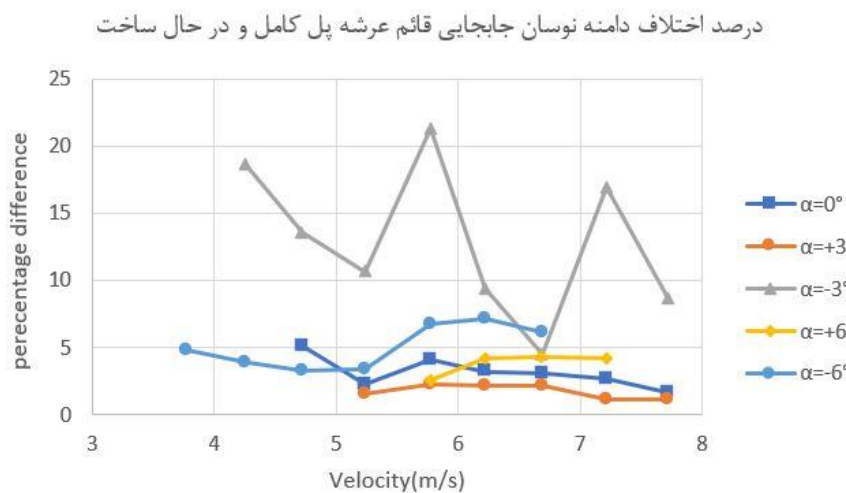
بنابراین افزایش اختلاف دامنه نوسان پیچشی در برخی زوایای حمله را می توان ناشی از تقویت کوپل آیروالاستیک بین جریان هوا و مود پیچشی عرشه دانست. در این شرایط، کاهش سختی مؤثر سازه در مرحله ساخت موجب می شود سیستم به شرایط ناپایداری نزدیک تر شده و در نتیجه تفاوت پاسخ بین حالت کامل و در حال ساخت بیشتر نمایان گردد. این نتایج نشان می دهد که مرحله ساخت می تواند بیشترین تأثیر را در نزدیکی مرز ناپایداری آیروالاستیک اعمال کند.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۱)، دامنه نوسان جابجایی قائم عرشه برای هر دو حالت پل کامل و پل در مرحله ساخت در تمامی زوایای حمله بررسی شده با افزایش سرعت باد روندی کاهشی نشان می دهد. با این حال، مقادیر دامنه نوسان در حالت پل در حال ساخت در اغلب سرعت ها بزرگ تر



شکل ۱۱. مقایسه نتایج دامنۀ فرکانس جابجایی قائم پل در حال ساخت با دامنۀ فرکانس پل کامل.

Fig. 11. Comparison of vertical displacement frequency amplitude results for the in-construction bridge and the complete bridge.



شکل ۱۲. درصد اختلاف دامنۀ نوسان جابجایی قائم عرشه پل کامل و در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت های مختلف.

Fig. 12. Percentage difference in vertical deck displacement amplitude between the completed and under-construction bridge models across various angles of attack and wind speeds.

شود. همچنین تغییرات غیر یکنواخت اختلاف با افزایش سرعت باد بیانگر آن است که برهم کنش بین نیروهای آیرودینامیکی و خصوصیات دینامیکی سازه در سرعت های مختلف می تواند بصورت متفاوتی بر پاسخ قائم عرشه تأثیر بگذارد.

کمتر بوده و معمولاً در محدوده ای کمتر از حدود ۷ درصد قرار دارد. این رفتار نشان می دهد که پاسخ قائم عرشه نسبت به تغییرات شرایط آیرودینامیکی در برخی زوایا حساس تر بوده و تغییرات سختی مؤثر و شرایط مرزی سازه در مرحله ساخت می تواند باعث افزایش اختلاف پاسخ نسبت به حالت پل کامل

۳-۴- بحث و تفسیر نتایج

به حالت «پل کامل» می‌تواند پایداری آبروالاستیک سیستم را بطور قابل توجهی تغییر دهد. این گذار که با تغییر در سختی مؤثر و شرایط تکیه‌گاهی همراه است، موجب جابه‌جایی مرزهای پایداری و تغییر دامنه پاسخ‌های آبروالاستیک می‌شود و نشان می‌دهد که حاشیه ایمنی در برابر ارتعاشات ناشی از باد در طول فرآیند ساخت ثابت نبوده و بطور پیوسته تکامل می‌یابد. تحلیل‌ها همچنین وجود رفتار کوپل‌شده بین حرکات قائم و پیچشی عرشه را آشکار می‌کند. در سرعت‌های پایین باد، پاسخ سیستم عمدتاً تحت تأثیر نوسانات پیچشی قرار دارد؛ اما با افزایش سرعت باد و انتقال انرژی آبرودینامیکی به سازه، اندرکنش بین درجات آزادی قائم و پیچشی تقویت می‌شود. مشابه مشاهدات گزارش‌شده برای مقاطع نوع II-شکل، توسعه فلاتر در این مطالعه با تقویت تدریجی دامنه نوسانات مشخص می‌شود، نه با وقوع ناگهانی ناپایداری. این ویژگی نشان می‌دهد که تغییرات دامنه ارتعاشات می‌تواند به عنوان شاخصی مهم برای پایش نزدیک شدن سیستم به شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پایداری آبروالاستیک عرشه‌های پل با مقطع کم‌عمق توسط تعادلی حساس بین سختی آبرودینامیکی و سختی سازه‌ای کنترل می‌شود و این تعادل در مراحل مختلف ساخت می‌تواند بطور قابل توجهی تغییر کند. تفاوت قابل توجه در دامنه پاسخ‌ها بین پیکربندی در حال ساخت و حالت پل کامل نشان می‌دهد که ارزیابی رفتار آبروالاستیک صرفاً بر اساس پیکربندی نهایی ممکن است منجر به برآورد خوش‌بینانه‌ای از حاشیه ایمنی در برابر فلاتر شود. از این رو، در طراحی و برنامه‌ریزی مراحل احداث پل‌های با مقطع کم‌عمق، در نظر گرفتن یک ارزیابی آبروالاستیک چندمرحله‌ای برای تضمین ایمنی سازه در برابر ناپایداری‌های ناشی از باد ضروری به نظر می‌رسد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار آبروالاستیک یک مقطع کم‌عمق II-شکل متعلق به عرشه‌ی پل کابلی دهانه‌بلند در دو پیکربندی «پل کامل» و «در حال ساخت» به کمک آزمایش مقطع الاستیک در تونل باد بررسی شد. آزمایش‌ها در پنج زاویه حمله ($\alpha = 0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ$) و در بازه سرعت ۳٫۲۷ متر بر ثانیه تا ۷٫۷۲ متر بر ثانیه بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارزیابی اثر تغییر شرایط مرزی و کاهش سختی مؤثر در مرحله ساخت بر مرز پایداری آبروالاستیک بود. نتایج نشان داد که پیکربندی در حال ساخت نسبت به حالت پل کامل با افزایش قابل توجه پاسخ سازه همراه است.

پاسخ آبروالاستیک عرشه پل برای دو حالت «پل کامل» و «پیکربندی در حال ساخت» مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از ضرایب آبرودینامیکی و دامنه ارتعاشات (اشکال ۵ تا ۱۲) نشان می‌دهد که رفتار سیستم بشدت تحت تأثیر اندرکنش بین بارهای آبرودینامیکی، سختی سازه‌ای و شرایط مرزی قرار دارد. با افزایش سرعت باد، نیروها و ممان‌های آبرودینامیکی متناسب با فشار دینامیکی رشد کرده و منجر به افزایش پاسخ سازه می‌شوند. با این حال، روند و شدت این پاسخ در دو پیکربندی مورد بررسی تفاوت قابل توجهی دارد. در پیکربندی در حال ساخت، کاهش سختی مؤثر و تغییر شرایط مرزی موجب افزایش حساسیت عرشه نسبت به تحریکات آبروالاستیک می‌شود و در نتیجه دامنه نوسانات در بسیاری از سرعت‌های باد، بزرگ‌تر از حالت پل کامل مشاهده می‌گردد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که زاویه حمله (α) نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های آبروالاستیک مقطع ایفا می‌کند. تغییرات ضرایب برا و ممان پیچشی، بویژه در محدوده سرعت‌های نزدیک به ناپایداری پیچشی، بیانگر آن است که پاسخ سیستم به شرایط جریان ورودی بسیار حساس است. این حساسیت در پیکربندی در حال ساخت بارزتر بوده و نشان می‌دهد که تغییرات کوچک در زاویه حمله می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه دامنه نوسانات شود. رفتار مشابهی در مطالعات آزمایشگاهی مربوط به مقاطع کم‌عمق II-شکل گزارش شده است، جایی که ویژگی‌های فلاتر بشدت به زاویه حمله اولیه و هندسه مقطع وابسته بوده‌اند. برای مثال، در مطالعه تجربی انجام‌شده بر روی مقاطع II-شکل کم‌عمق توسط وانگ و همکاران [۱۶]، نشان داده شد که سرعت بحرانی فلاتر و دامنه نوسانات پسابحرانی بشدت به زاویه حمله اولیه و شرایط میرایی سازه‌ای وابسته است. در آن پژوهش مشاهده شد که با افزایش سرعت باد، دامنه نوسانات بصورت تدریجی افزایش یافته و به یک نوسان چرخه حدی پایدار (LCO) می‌رسد که بیانگر وجود میرایی آبرودینامیکی غیرخطی در سیستم است. این روند با رفتار مشاهده‌شده در نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد، جایی که افزایش سرعت جریان منجر به تقویت تدریجی دامنه ارتعاشات و تشدید اندرکنش بین درجات آزادی قائم و پیچشی می‌شود.

یکی از جنبه‌های متمایز این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین بر روی مقاطع II-شکل کم‌عمق، بررسی اثر «تکامل سازه‌ای» در طول فرآیند احداث پل است. در حالی که بسیاری از تحقیقات قبلی بر ویژگی‌های آبروالاستیک یک هندسه مقطع در شرایط سازه‌ای ثابت تمرکز داشته‌اند، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گذار از پیکربندی «در حال ساخت»

- Fluids and Structures,” Journal of Fluids and Structures, vol. 104,, p. 103321., 2021.
- [6] S. H. Kim, Park, J.S., “Flutter characteristics of long-span cable-stayed bridges,” Wind and Structures, vol. 33 (2),, pp. 145–160., 2021.
- [7] L. Huang, Zhang, H., , “Aerodynamic performance of shallow bridge decks,” Engineering Structures, vol. 245,, p. 112902., 2021.
- [8] X. Zhao, Zhang, Z.T., “Construction-stage aeroelastic assessment of long-span bridges,” Journal of Bridge Engineering, vol. 27 (3),, p. 04022005., 2022.
- [9] J. Wang, Hua, X.G., Ge, Y.J., “Influence of stiffness reduction on aeroelastic stability of bridge decks,” Engineering Structures, vol. 252,, p. 113644., 2022.
- [10] Z. Zhou, Jiang, B., , “Experimental evaluation of aeroelastic instability in shallow bridge sections,” Wind and Structures, vol. 35 (1),, pp. 1–15., 2022.
- [11] H. Liu, Tang, Y.,, “Reduced velocity effects on bridge deck stability,” Journal of Fluids and Structures vol. 112,, p. 103584., 2022.
- [12] Y. Chen, Li, Q.,, “Configuration-dependent aeroelastic behavior of cable-supported bridges,” Engineering Structures, vol. 275, , p. 115219., 2023.
- [13] P. Gao, Zhang, H.,, “Wind-induced instability of long-span bridge decks. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics “ Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics vol. 233,, p. 105329., 2023.
- [14] J. Park, Kim, D.,, “Aeroelastic performance of bridges during erection stages,” Wind and Structures, vol. 37 (2),, pp. 95–112., 2023.
- [15] Q. Li, Zhang, H., , “Torsional stiffness degradation effects on aerostatic divergence,” Engineering Structures, vol. 278,, p. 115487., 2023.
- [16] Y. Tang, Hua, X.G., Chen, Z.Q.,, “Experimental investigation of flutter characteristics of shallow II section at postcritical regime. ,” Journal of Fluids and Structures, vol. 88, , pp. 275–291., 2019.
- [17] H. Zhang, Li, Q.,, “Construction-stage aerodynamic response of long-span bridges,” Engineering Structures,

در پاسخ استاتیکی، تغییر زاویه پیچشی و قائم به ترتیب حدود ۶٪ و ۱۰٪ بیشتر از حالت پل کامل اندازه گیری شد، در حالی که در پاسخ دینامیکی دامنه نوسانات تغییر زاویه پیچشی و جابجایی قائم به ترتیب حدود ۸.۵٪ و ۵.۵٪ افزایش یافت. این رفتار عمدتاً ناشی از کاهش سختی پیچشی و خمشی مؤثر، نامتقارن شدن شرایط مرزی و تغییر توزیع جرم در مرحله ساخت است. همچنین نتایج نشان داد که در برخی زوایای حمله، شروع ناپایداری در پیکربندی در حال ساخت در سرعت های پایین تر از حالت پل کامل رخ می دهد که بیانگر جابجایی مرز پایداری آیروالاستیک به سمت سرعت های کمتر است. افزون بر این، اختلاف پاسخ بین دو پیکربندی به زاویه حمله جریان وابسته است که نشان می دهد اثر پیکربندی سازه ای بر پایداری آیروالاستیک یکنواخت نبوده و باید در چارچوب شرایط واقعی جریان ارزیابی شود.

در مقایسه با بسیاری از مطالعات پیشین که رفتار آیروالاستیک مقاطع II-شکل را عمدتاً در پیکربندی بهره برداری بررسی کرده اند، نتایج این پژوهش نشان می دهد که مرحله ساخت می تواند بطور معناداری مرز پایداری آیروالاستیک را تغییر دهد. بنابراین اتکا به ارزیابی آیروالاستیک صرفاً در پیکربندی نهایی ممکن است به برآوردی خوش بینانه از حاشیه ایمنی در برابر فلاتر منجر شود؛ از این رو انجام ارزیابی آیروالاستیک در مراحل مختلف ساخت برای تضمین ایمنی پل های دهانه بلند با مقطع کم عمق II-شکل ضروری است.

منابع

- [1] Z. T. Zhang, Ge, Y.J., “Aeroelastic stability of long-span bridge decks. Engineering Structures,” Engineering Structures, vol. 211, p. 110415, 2020.
- [2] C. Li, Chen, Z., “Torsional divergence of shallow box bridge decks. Journal of Fluids and Structures ,” Journal of Fluids and Structures, vol. 97, p. 103087., 2020.
- [3] C. Hu, Zhou, Z., , “Aeroelastic instability of cable-supported bridges,” Wind and Structures vol. 31 (4), pp. 289–302., 2020. .
- [4] Y. L. Xu, Guo, W.H.,, “Experimental investigation on torsional divergence of bridge decks,” Engineering Structures, vol. 233,, p. 111892., 2021.
- [5] Y. Tang, Hua, X.G., Chen, Z.Q.,, “Post-critical aeroelastic behavior of II-shaped bridge deck sections. Journal of

- 213,, p. 104618., 2021.
- [23] H. Li, Xu, Y.L., , “Wind-induced responses of partially constructed long-span bridges.,” *Engineering Structures*, vol. 238,, p. 112234., 2021.
- [24] Z. Zhou, Hu, C.,, “Effect of angle of attack on aeroelastic stability of shallow bridge decks.,” *Wind and Structures*, vol. 35 (4),, pp. 301–318., 2022.
- [25] Y. Tang, Zhao, X.,, “Sensitivity of torsional divergence to stiffness variation in cable-supported bridges.,” *Journal of Fluids and Structures* vol. 110,, p. 103555., 2022.
- [26] J. Park, Kim, S.H.,, “Wind loading provisions and aeroelastic considerations for long-span bridges. ,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 28 (6),, p. 04023041., 2023.
- [27] P. Gao, Liu, H.,, “Aeroelastic assessment of bridge decks considering construction-stage boundary changes.,” *Engineering Structures*, vol. 280,, p. 115732., 2023.
- vol. 295,, p. 116825., 2024.
- [18] X. Chen, Zhao, Y.,, “Static divergence characteristics of cable-supported bridge decks.,” *Wind and Structures*, vol. 39 (1),, pp. 21–36., 2024.
- [19] Y. Zhao, Chen, X.,, “Flutter boundary shift in reduced stiffness bridge systems.,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 120,, p. 103912., 2024. .
- [20] D. Kim, Park, J.,, “Aeroelastic stability of shallow bridge sections under varying boundary conditions.,” *Engineering Structures* vol. 301,, p. 117112., 2024.
- [21] Y. Liu, Chen, Z.,, “omparative study on aeroelastic responses of bridge decks under different boundary conditions.,” *Engineering Structures*, vol. 214,, p. 110657., 2020.
- [22] X. Wang, Ge, Y.J., , “Numerical simulation of aeroelastic instability during bridge erection stages.,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Izak mohammadi, S. R. Sabaghyazdi, *Experimental Investigation of Aeroelastic Behavior of a Shallow Π -Shaped Bridge Deck during Construction Stage*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 58(4) (2026) 511-530.

DOI: [10.22060/ceej.2026.24445.8307](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.24445.8307)



