

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

مهدی ایزک محمدی<sup>۱\*</sup>، سعیدرضا صباغ یزدی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران (MehdiIzakmohammadi76@gmail.com)

۲- استاد گروه مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(SYazdi@kntu.ac.ir)

## چکیده

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 بصورت 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 غیرمحافظة کارانه مرز پایداری شود؛ بنابراین انجام مدل‌سازی اختصاصی آبروالاستیک در این مرحله برای طراحی ایمن پل‌های دهانه بلند توصیه می‌شود.

## کلمات کلیدی

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

آیروالاستیسیته به مطالعه اندرکنش متقابل میان رفتار الاستیک سازه و نیروهای آیروالدینامیکی اطلاق می‌شود که در آن پاسخ سازه تابعی از کوپلینگ سازه-جریان است. ناپایداری‌های آیروالاستیک عرشه پل‌های دهانه بلند عمدتاً در قالب واگرایی پیچشی (آیروالاستیسیته استاتیکی) و فلاتر یا نوسانات خودتحریک (آیروالاستیسیته دینامیکی) بروز می‌کنند [۱-۳]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پایداری آیروالاستیک عرشه‌های کم‌عمق به‌شدت 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 آیروالاستیک عرشه‌های جعبه‌ای و II - شکل را در حالت بهره‌برداری کامل بررسی کرده‌اند و مرزهای واگرایی و فلاتر را به‌صورت 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 به‌صورت 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 آیروالاستیک به زاویه حمله جریان در مقاطع کم‌عمق می‌تواند در شرایط کاهش سختی تشدید شود [۲۴، ۲۵].

از سوی دیگر، مقررات بارگذاری باد، سرعت مبنای آماری را تعریف می‌کنند اما دستورالعمل مشخصی برای اصلاح مرز پایداری آیروالاستیک عرشه پل در مرحله ساخت ارائه نمی‌دهند. بنابراین تعمیم مستقیم رفتار حالت کامل به مرحله ساخت نیازمند بررسی تجربی و کمی می‌باشد [۲۶، ۲۷].

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آزمایشگاهی رفتار آیروالاستیک یک مقطع کم‌عمق 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 سازه‌ای 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 می‌تواند در درک بهتر پایداری آیروالاستیک عرشه در مرحله ساخت و لزوم ارزیابی اختصاصی آن در طراحی پل‌های دهانه بلند مؤثر باشد.

با وجود پژوهش‌های گسترده درباره رفتار آیروالاستیک عرشه پل‌ها، بیشتر مطالعات موجود عمدتاً بر پیکربندی نهایی و کامل پل تمرکز داشته‌اند، در حالی که پاسخ آیروالاستیک در مرحله ساخت توجه بسیار کمتری دریافت کرده است. با این حال، در طول مرحله ساخت، تغییرات در سختی سازه، توزیع جرم و شرایط تکیه‌گاهی می‌تواند بطور قابل توجهی بر پایداری آیروالاستیک عرشه پل تأثیر بگذارد. در این پژوهش، ویژگی‌های رفتار آیروالاستیک یک عرشه پل کم‌عمق با استفاده از آزمایش تونل باد و تحت دو پیکربندی سازه‌ای 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، پاسخ‌های پیچشی و قائم عرشه بطور سیستماتیک مقایسه شده‌اند. نتایج این مطالعه چارچوبی تجربی برای ارزیابی تأثیر پیکربندی‌های موقت سازه‌ای بر رفتار آیروالاستیک عرشه ارائه می‌دهد و امکان مقایسه مستقیم پاسخ‌های دینامیکی در دو وضعیت سازه‌ای متفاوت را فراهم می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین بر روی مقاطع کم‌عمق II - شکل که عمدتاً رفتار آیروالاستیک را در یک پیکربندی سازه‌ای ثابت بررسی کرده‌اند، این پژوهش بطور خاص بر نقش تغییر پیکربندی سازه در

طول فرآیند ساخت تمرکز دارد و تلاش می‌کند اثر این تغییرات را بر شرایط پایداری آیرودلاستیک عرشه بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار دهد.

## ۲- مدل سازی در تونل باد

### ۲-۱- مشخصات تونل باد

آزمایش‌ها 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 ۴,۳ متر طول و ۲,۹ متر ارتفاع می‌باشد. شدت آشفته‌گی جریان در مقطع آزمون کمتر از ۰,۵ درصد بوده که شرایط جریان یکنواخت (جریان صاف) را برای انجام آزمایش مقطع دوبعدی فراهم می‌کند. انتخاب جریان صاف بمنظور بررسی رفتار پایه‌ای آیرودلاستیک مقطع و حذف اثرات ثانویه ناشی از آشفته‌گی محیطی صورت گرفته است تا مرز ناپایداری ذاتی مقطع بصورت دقیق‌تری قابل ارزیابی باشد.



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

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

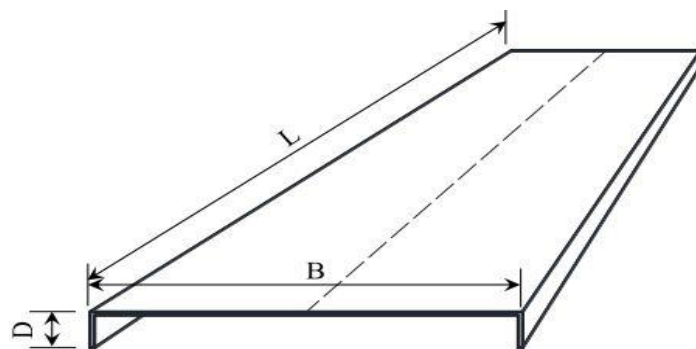
### ۲-۲- مشخصات مدل مقطع

مدل مورد استفاده، مقطع کم‌عمق II-شکل با طول ۱,۵۴ متر و نسبت عرض به عمق برابر با ۱۰ می‌باشد. این نسبت در محدوده متداول عرشه‌های کم‌عمق پل‌های کابلی دهانه بلند قرار دارد و بعنوان یک مقطع نماینده برای بررسی رفتار آیرودلاستیک انتخاب شده است.

مدل از آلایژ آلومینیوم ساخته شده تا:

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

ضخامت بدنه ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده که سختی خمشی موضعی کافی ایجاد می‌کند و از اثرات پوسته‌ای ناخواسته جلوگیری می‌نماید.



شکل ۲: شکل نمادین عرشه ساخته شده در این تحقیق

Figure 2. Schematic of the deck fabricated in this research



شکل ۳: مقطع مدل الاستیک در تونل باد

Figure 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        |

دو صفحه انتهایی بیضی شکل بزرگ ساخته شده از آلومینیم با ضخامت ۲ میلیمتر، 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 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.

### ۳-۲- 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 شبیه‌سازی شرایط طره‌ای و کاهش سختی مؤثر با یکسان نگه داشتن سختی اسمی فنرها در هر دو حالت، اثر تغییر شرایط مرزی و توزیع جرم بطور مستقل بررسی شده است.

#### ۴-۲- فرضیات مدل‌سازی 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 سازه‌ای است.

سرعت کاهش یافته بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن:

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

می‌باشد.

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

#### ۵-۲- تحلیل عدم قطعیت آزمایش‌ها

در آزمایش‌های تونل باد، عدم قطعیت اندازه‌گیری می‌تواند از منابع مختلفی ناشی شود که مهم‌ترین آن‌ها شامل نوسانات سرعت جریان در تونل باد، دقت ابزارهای اندازه‌گیری جابجایی و تغییرزاویه پیچشی، و خطاهای مربوط به ثبت و پردازش داده‌ها است. بمنظور ارزیابی میزان اطمینان‌پذیری 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 ریشه‌ای (Root Sum Square – RSS) محاسبه می‌شود:

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

که در آن:

$U$  عدم قطعیت کل اندازه‌گیری

$U_i$  عدم قطعیت مربوط به هر منبع خطا

با توجه به مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری و شرایط عملکرد تونل باد، منابع اصلی عدم قطعیت و مقدار تقریبی آن‌ها بصورت زیر در نظر گرفته شد:

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

Table 2. Measured value of the uncertainty of measurements

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

با استفاده از روش RSS، عدم قطعیت کلی بصورت زیر محاسبه می شود:

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

$$U = \sqrt{9}$$

$$U = 3\%$$

بنابراین عدم قطعیت کلی مرتبط با پاسخ های آیروالاستیک اندازه گیری شده در این آزمایش ها حدود  $\pm 3\%$  برآورد می شود. برای پارامترهای پاسخ آیروالاستیک مانند جابجایی قائم (y) و تغییرزاویه پیچشی ( $\theta$ )، انتشار عدم قطعیت اندازه گیری نیز می تواند 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 اندازه گیری شده

V سرعت باد

y جابجایی قائم

$\theta$  تغییرزاویه پیچشی

نتایج نشان می دهد که سطح عدم قطعیت اندازه گیری ها نسبت به اختلاف های مشاهده شده بین پیکربندی پل کامل و درحال ساخت کوچک است. بنابراین تغییرات مشاهده شده در پاسخ های آیروالاستیک عمدتاً ناشی از تغییر در سختی سازه و شرایط تکیه گاهی بوده و ناشی از خطاهای اندازه گیری نیست.

بمنظور بررسی تکرارپذیری نتایج (repeatability)، تعدادی از آزمایش ها 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 اندازه گیری ها است.

## ۲-۶- مبانی تئوری پاسخ آیروالاستیک

برای تفسیر مکانیکی پاسخ های اندازه گیری شده در آزمایش تونل باد، می توان از روابط پایه آیروالاستیک استفاده کرد. گشتاور آیرودینامیکی وارد بر مقطع عرشه به صورت زیر بیان می شود:

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

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

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:

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

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:

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

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:

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

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.

### ۳- نتایج و تحلیل پاسخ آیرودینامیک

بمنظور ارزیابی قابلیت اعتماد مشاهدات آزمایشگاهی، عدم قطعیت مرتبط با پاسخ‌های اندازه‌گیری شده همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد بررسی گردید. مقدار عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها حدود  $\pm 3\%$  برآورد شده است. کوچک بودن دامنه عدم قطعیت نشان می‌دهد که تفاوت‌های مشاهده شده بین پیکربندی پل کامل و درحال ساخت ناشی از اثرات واقعی آیرودینامیکی و سازه‌ای است و ناشی از خطای اندازه‌گیری نیست.

تمامی آزمایش‌های 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 ( $\alpha = 0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ$ ) و در بازه سرعت ۳٫۲۷ متر بر ثانیه تا ۷٫۷۲ 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، تفاوت‌ها 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 می‌شود. تاثیر آرایش فنرها و وزنه در تغییر زاویه پیچشی در حالت مقایسه به صورت زیر می‌باشد:

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.

ب) حالت پل در حال ساخت: با انتقال چهار فتر 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.

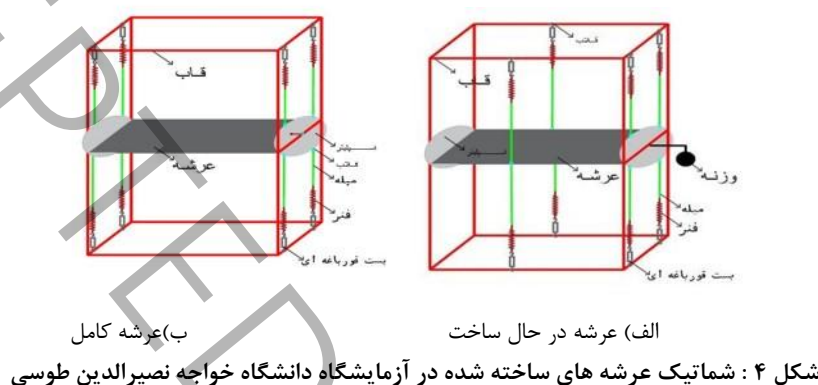
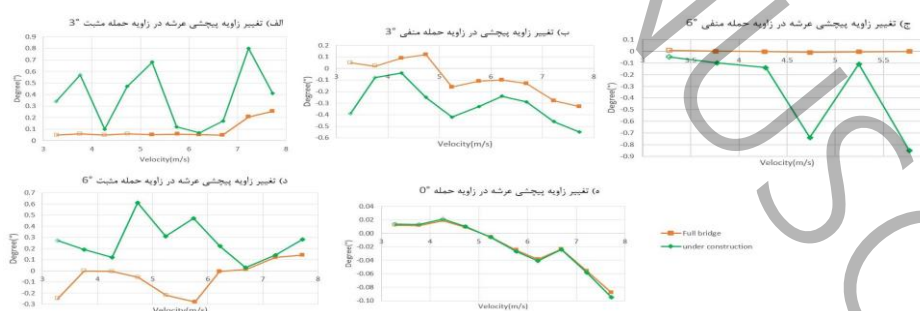


Figure 4. Schematic of the decks fabricated at K.N. Toosi University of Technology laboratory

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 آیرودینامیک ارائه شده در بخش «مبانی تئوری»، زاویه پیچش با مجذور سرعت باد متناسب بوده و بصورت معکوس با سختی پیچشی مؤثر ( $K_\theta$ ) 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.



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایش تغییر زاویه پیچشی عرشه در حال ساخت با پل کامل

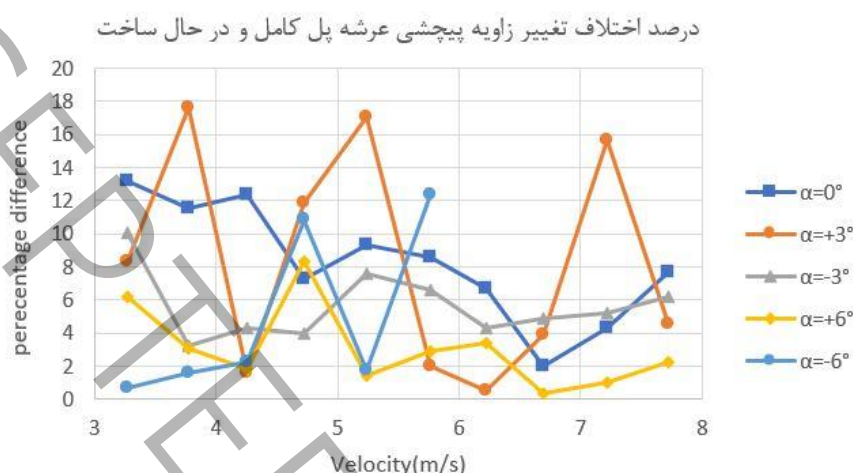
(○ نماد رفتار آیرودینامیک استاتیکی - ● نماد پاسخ آیرودینامیک دینامیکی)

Figure 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)



علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در برخی زوایای حمله، نشانه‌های آغاز واگرایی پیچشی در سرعت‌های پایین‌تری در پیکربندی مرحله ساخت رخ می‌دهد. این رفتار با روابط تئوریک نیز سازگار است، زیرا کاهش سختی پیچشی باعث جابه‌جایی مرز پایداری آیرولاستیک به سمت سرعت‌های پایین‌تر شده و سطح پایداری سیستم را کاهش می‌دهد.



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

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

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 روابط آیرولاستیک، پاسخ پیچشی تابعی از گشتاور آیرودینامیکی ( $M_a$ ) و سختی پیچشی سازه ( $K_\theta$ ) 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 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 آیرولاستیک عرشه پل را برجسته می‌کند.

جدول (۳) پاسخ آیرولاستیکی 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 آیرولاستیک، ممان آیرودینامیکی را می‌توان بصورت  $M_a = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 C_m$  بیان کرد.

بنابراین، تغییرشکل پیچشی حاصل را می‌توان از رابطه  $\theta = \frac{M_a}{K_\theta}$  تخمین زد. مقایسه میان دو پیکربندی سازه‌ای نشان می‌دهد که مدل در حال ساخت عموماً پاسخ آیرولاستیکی را در سرعت‌های باد پایین‌تری تجربه می‌کند، بویژه در زوایای حمله مثبت. بعنوان مثال، در زوایای اولیه  $+6^\circ$  و  $+3^\circ$ ، این پاسخ برای مرحله ساخت به ترتیب در سرعت‌های  $3.27$  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.

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 آیرولاستیکی عرشه پل است.

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

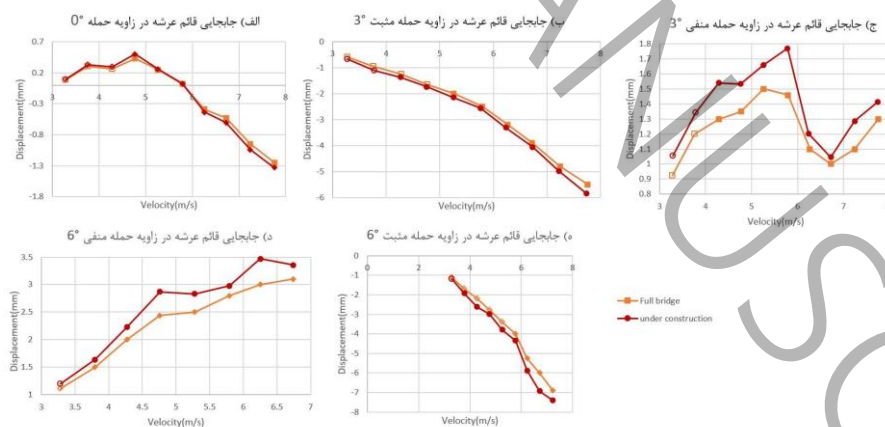
Table 3. Comparison of static divergence speed for torsional angle of the in-construction deck and complete bridge at various angles of attack

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

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

تاثیر آرایش فنرها و وزنه در جابجایی قائم در حالت مقایسه بصورت زیر می باشد:

- (ج) حالت پل کامل: عرشه از دو طرف با فنرهای یکسان متصل است که باعث توزیع متوازن نیروها و کمینه سازی جابجایی قائم می شود لذا جابجایی عمودی در این حالت معمولا کمتر است و نیروها بطور یکنواخت تری در عرشه توزیع می شوند.
- (د) حالت پل در حال ساخت: به دلیل نامتقارن بودن و وزنه اضافی، توزیع نیروها یکنواخت نیست لذا جابجایی قائم خصوصا جابجایی قائم قسمت آزاد عرشه نسبت به حالت اولیه بیشتر است.



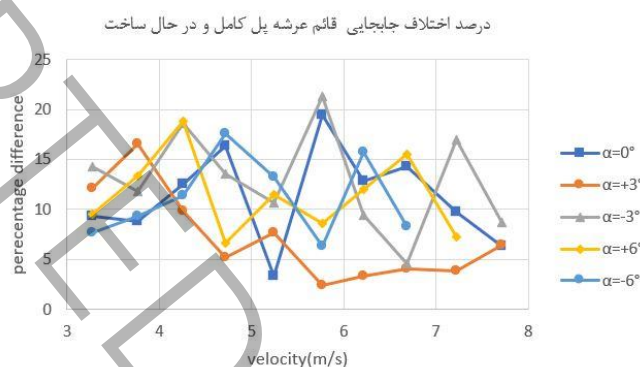
شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایش جابجایی قائم عرشه در حال ساخت با پل کامل

(○ نماد رفتار آیرولاستیسیته استاتیکی - ● نماد پاسخ آیرولاستیسیته دینامیکی)

Figure 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)

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 آزمایش شده، بزرگ‌تر از حالت پل کامل است. بر اساس روابط آیرودینامیکی، 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.



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

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

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 ( $K_\theta$ ) نسبت به سختی قائم ( $K_h$ ) دارند، در نتیجه، مود پیچشی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پیکربندی سازه‌ای نشان می‌دهد. با این حال، اختلاف‌های مشاهده شده تأیید می‌کنند که مرحله ساخت می‌تواند رفتار کلی آیرودینامیک 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 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 در این حالت می‌باشد. در مجموع، این نتایج

بیانگر آن است که تکمیل عرشه موجب افزایش قابل توجه حساسیت آبرودینامیکی سازه نسبت به زوایای مثبت شده و اهمیت بررسی مراحل مختلف ساخت را در تحلیل رفتار آبروالاستیک پل برجسته می‌سازد.

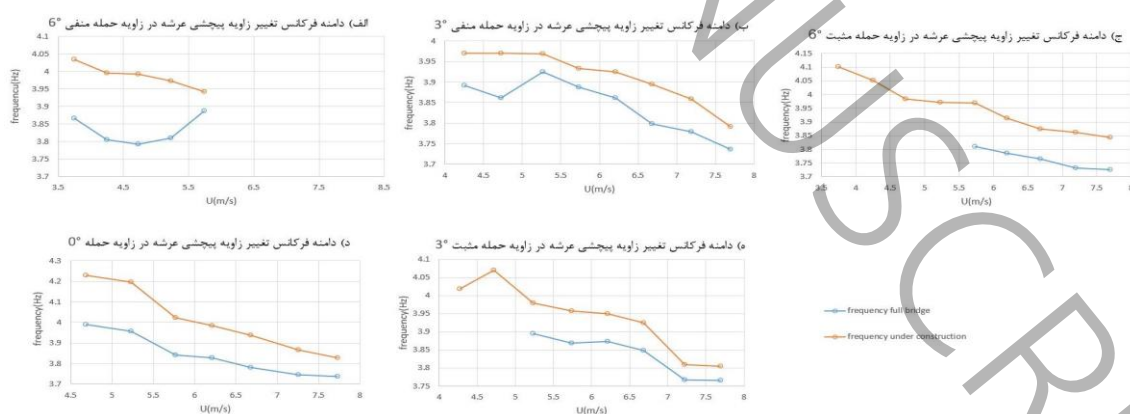
جدول ۴: مقایسه حداکثر سرعت جابجایی استاتیکی عرشه پل در حال ساخت و کامل در آزمایش جابجایی قائم

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<br>( $\alpha$ )<br>درج | پل در حال ساخت         |                       | پل کامل                |                       |
|-----------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|                                         | سرعت<br>(متر بر ثانیه) | زاویه<br>( $^\circ$ ) | سرعت<br>(متر بر ثانیه) | زاویه<br>( $^\circ$ ) |
| ۰                                       | ۴/۲۷                   | ۰/۲۹                  | ۴/۲۷                   | ۰/۲۶                  |
| -۳                                      | ۳/۷۵                   | ۱/۳۴                  | ۳/۷۵                   | ۱/۲                   |
| +۳                                      | ۳/۷۵                   | -۱/۱۰                 | ۴/۷۴                   | -۱/۶۵                 |
| -۶                                      | ۳/۲۷                   | ۱/۱۹                  | ۳/۲۷                   | ۱/۱۱                  |
| +۶                                      | ۳/۲۷                   | -۱/۲۰                 | ۵/۲۴                   | -۳/۴                  |

### 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 قابل پیش‌بینی‌تری در مقایسه با مراحل ساخت نشان می‌دهند. در مقابل، در مرحله ساخت به دلیل تغییرات پیوسته در سختی، جرم و شرایط مرزی سازه، پاسخ آبروالاستیک عرشه می‌تواند ناپایدارتر و با دامنه نوسان بزرگ‌تری همراه باشد. از این‌رو، بررسی دامنه نوسانات در مراحل مختلف ساخت برای ارزیابی پایداری آبروالاستیک سازه ضروری است.



شکل ۹: نتایج دامنه نوسان تغییرزاویه پیچشی عرشه پل در حال ساخت با نوسان پل کامل

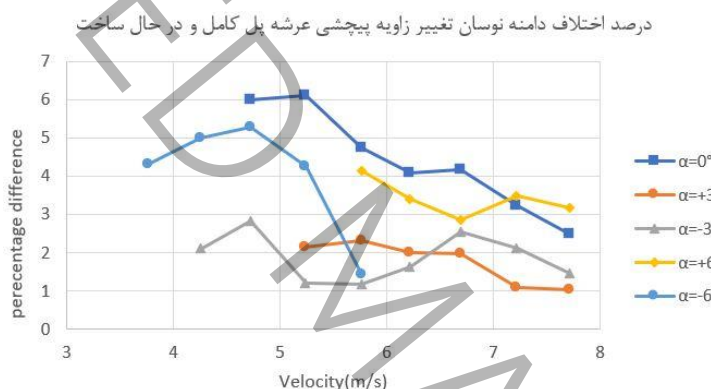
Figure 9. Results of torsional angle oscillation amplitude for the in-construction deck compared to the complete bridge

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.



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

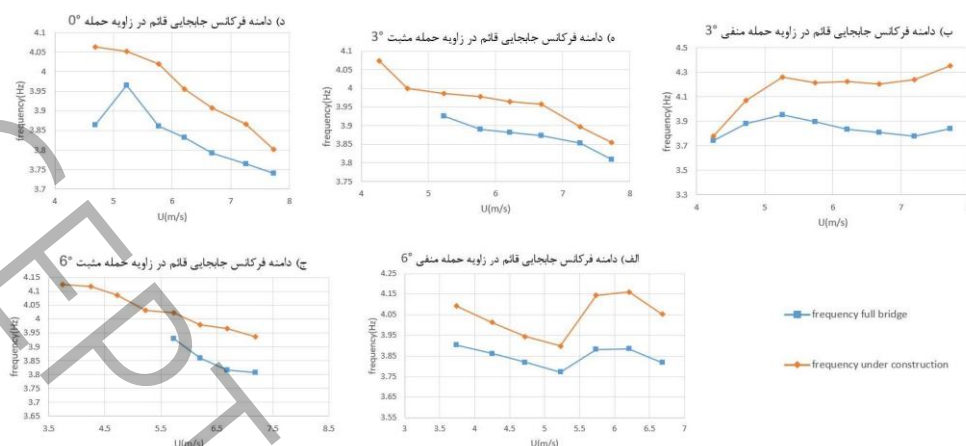
**Figure 10. Percentage difference in torsional angle oscillation amplitude of the complete bridge and in-construction deck at different angles of attack and speeds**

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، حساسیت سیستم به تغییرات سختی و شرایط مرزی افزایش می‌یابد و در نتیجه تفاوت بین پاسخ پل کامل و سازه در حال ساخت بیشتر نمایان می‌شود. از دیدگاه آیروالاستیسیته، تغییر زاویه حمله باعث تغییر در ضرایب آیرودینامیکی و در نتیجه تغییر در ممان آیرودینامیکی وارد بر عرشه می‌شود. هنگامی که این ممان در شرایطی قرار گیرد که با مود پیچشی سازه برهم‌کنش قوی‌تری داشته باشد، دامنه پاسخ پیچشی افزایش می‌یابد.

بنابراین افزایش اختلاف دامنه نوسان پیچشی در برخی زوایای حمله را می‌توان ناشی از تقویت کوپل آیروالاستیک بین جریان هوا و مود پیچشی عرشه دانست. در این شرایط، کاهش سختی مؤثر سازه در مرحله ساخت موجب می‌شود سیستم به شرایط ناپایداری

نزدیک‌تر شده و در نتیجه تفاوت پاسخ بین حالت کامل و در حال ساخت بیشتر نمایان گردد. این نتایج نشان می‌دهد که مرحله ساخت می‌تواند بیشترین تأثیر را در نزدیکی مرز ناپایداری آیرولاستیک اعمال کند.

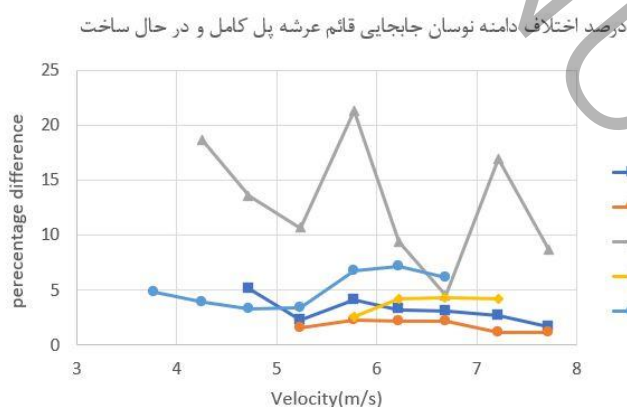


شکل ۱۱: مقایسه نتایج دامنه فرکانس جابجایی قائم پل در حال ساخت با دامنه فرکانس پل کامل

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

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 می‌دهد. با این حال، مقادیر دامنه نوسان در حالت پل در حال ساخت در اغلب سرعت‌ها بزرگ‌تر از حالت پل کامل است که این موضوع را می‌توان به کاهش سختی مؤثر و تغییر شرایط مرزی سازه در مرحله ساخت نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر زاویه حمله بر دامنه پاسخ قائم محسوس بوده و در برخی زوایا اختلاف پاسخ بین دو حالت سازه بیشتر می‌شود که بیانگر حساسیت پاسخ قائم به تغییرات شرایط آیرودینامیکی جریان است. همان‌گونه 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 دقیق‌تر میزان تفاوت پاسخ قائم عرشه در دو حالت پل کامل و پل در مرحله ساخت، درصد اختلاف دامنه نوسان جابجایی قائم در سرعت‌ها و زوایای حمله مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است.



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

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



نتایج درصد اختلاف دامنه نوسان جابجایی قائم عرشه پل کامل و پل در حال ساخت در زوایای حمله و سرعت‌های مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود، 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 سرعت‌ها به مقداری در حدود ۲۰ درصد می‌رسد، در حالی که در سایر زوایا مقدار اختلاف بطور کلی کمتر بوده و معمولاً در محدوده‌ای کمتر از حدود ۷ درصد قرار دارد. این رفتار نشان می‌دهد که پاسخ قائم عرشه نسبت به تغییرات شرایط آیرودینامیکی در برخی زوایا حساس‌تر بوده و تغییرات سختی مؤثر و شرایط مرزی سازه در مرحله ساخت می‌تواند باعث افزایش اختلاف پاسخ نسبت به حالت پل کامل شود. همچنین تغییرات غیر یکنواخت اختلاف با افزایش سرعت باد بیانگر آن است که برهم‌کنش بین نیروهای آیرودینامیکی و خصوصیات دینامیکی سازه در سرعت‌های مختلف می‌تواند بصورت متفاوتی بر پاسخ قائم عرشه تأثیر بگذارد.

### ۴-۳- بحث و تفسیر نتایج

پاسخ آیروالاستیک عرشه پل برای دو حالت «پل کامل» و «پیکربندی در حال ساخت» مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از ضرایب آیرودینامیکی و دامنه ارتعاشات (اشکال ۵ تا ۱۲) نشان می‌دهد که رفتار سیستم بشدت تحت تأثیر اندرکنش بین بارهای آیرودینامیکی، سختی سازه‌ای و شرایط مرزی قرار دارد. با افزایش سرعت باد، نیروها و ممان‌های آیرودینامیکی 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 آیروالاستیک 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 ( $\alpha$ ) نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های آیروالاستیک 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 آیرودینامیکی 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 آیروالاستیک یک هندسه مقطع در شرایط سازه‌ای ثابت تمرکز داشته‌اند، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گذار از پیکربندی «در حال ساخت» به حالت «پل کامل» می‌تواند پایداری آیروالاستیک 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 آیروالاستیک 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 آیرودینامیکی 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 آیروالاستیک عرشه‌های پل با مقطع کم عمق توسط تعادلی حساس بین سختی آیرودینامیکی 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 آیروالاستیک 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 کم عمق، در نظر گرفتن یک ارزیابی آیروالاستیک چندمرحله‌ای برای تضمین ایمنی سازه در برابر ناپایداری‌های ناشی از باد ضروری به نظر می‌رسد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار آیروالاستیک یک مقطع کم عمق 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 ( $0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 6^\circ$ ) و در بازه سرعت  $3.27$  متر بر ثانیه تا  $7.72$  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 آیروالاستیک بود. نتایج نشان داد که پیکربندی در حال ساخت نسبت به حالت پل کامل با افزایش قابل توجه پاسخ سازه همراه است. در پاسخ استاتیکی، تغییر زاویه پیچشی و قائم به ترتیب حدود  $6\%$  و  $10\%$  بیشتر از حالت پل کامل اندازه‌گیری شد، در حالی که در پاسخ دینامیکی دامنه نوسانات تغییر زاویه پیچشی و جابجایی قائم به ترتیب حدود  $8.5\%$  و  $5.5\%$  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 سرعت‌های پایین‌تر از حالت پل کامل رخ می‌دهد که بیانگر جابجایی مرز پایداری آیروالاستیک به سمت سرعت‌های کمتر است. افزون بر این، اختلاف پاسخ بین دو پیکربندی به زاویه حمله جریان وابسته است که نشان می‌دهد اثر پیکربندی سازه‌ای 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 بهره‌برداری بررسی کرده‌اند، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مرحله ساخت می‌تواند بطور معناداری مرز پایداری آیروالاستیک را تغییر دهد. بنابراین اتکا به ارزیابی آیروالاستیک صرفاً در پیکربندی نهایی ممکن است به برآوردی خوش‌بینانه از حاشیه ایمنی در برابر فلاتر منجر شود؛ از این رو انجام ارزیابی آیروالاستیک در مراحل مختلف ساخت برای تضمین ایمنی پل‌های دهانه‌بلند با مقطع کم عمق II-شکل ضروری است.

#### ۵- مراجع

- [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 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  $\Pi$  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*, 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., , "Comparative 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. 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.