



## مدلسازی آزمایشگاهی کابل‌های جدید در پل‌های کابلی جهت کاهش ارتعاش القایی ناشی از باد و باران

هانی باقی<sup>۱</sup>، علی گلصورت پهلوانی<sup>۲\*</sup>، محمد حسن رامشت<sup>۱</sup>، جعفر عسگری مارزانی<sup>۱</sup>، آرش میرعبداله لواسانی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۶/۱۰

### کلمات کلیدی:

پل‌های ترکه‌ای  
ارتعاش ناشی از باد و باران  
نتایج آزمایشگاهی  
تونل باد  
کابل

**خلاصه:** در این مقاله دو نمونه کابل پل‌های ترکه‌ای جهت باز تولید ارتعاش القایی ناشی از باد و باران، طراحی و در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته است. از آنجایی که کابل پل‌های کابلی، عضو سازه‌ای انعطاف‌پذیری می‌باشد و فرکانس طبیعی بسیار کم و میرایی ذاتی ناچیزی دارد، مستعد ارتعاش‌های مختلف نظیر ارتعاش ناشی از باد، ارتعاش ناشی از باد - باران و زلزله می‌باشد که ارتعاش القایی ناشی از باد - باران به یکی از نگرانی‌های بزرگ مهندسی پل تبدیل شده است. یکی از روش‌هایی که برای کاهش اثرات باد و باران بر روی کابل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، مشخصات آیرودینامیکی کابل می‌باشد و همچنین یکی از موارد تاثیرگذار بر آیرودینامیک کابل، ایجاد جریان آب باران بر روی سطح کابل است. جهت کاهش ارتعاشات القایی نیاز به استفاده از روشی می‌باشد که تا حد ممکن به آیرودینامیک کابل آسیب وارد نکند از اینرو در سطح کابل شیارهای مارپیچی تعبیه گردیده شده است تا این جریان آب را به پایین کابل هدایت کند. با آزمایش دو مدل کابل (بدون شیار و با شیار) در تونل باد همراه با جریان مصنوعی باران تحت اثر سرعت‌های مختلف باد و همچنین زوایای متفاوت کابل نسبت به صفحه عمود بر باد، این نتیجه حاصل شده است که ایجاد شیارهای مارپیچ به دور کابل، جریان‌های فرکانس پایین را حذف می‌کند و بنابراین دامنه ارتعاش کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

یکی از انواع پل‌های با دهانه بزرگ، پل‌های ترکه‌ای می‌باشد، تفاوت این دسته از پل‌ها با سایر پل‌های موجود در عنصر سازه‌ای باربر یعنی کابل آن‌ها می‌باشد. مزیت پل‌های کابلی بر سایر پل‌ها، بزرگ بودن دهانه اصلی این پل‌ها است که تا دهانه ۷۵۰ متر نیز می‌رسند. این مسئله، دقت در طرح سیستم کابلی برای انتقال بهینه بارها از عرشه به پیلون‌ها را می‌طلبد [۱]. پل‌های ترکه‌ای با توجه به تعداد زیاد کابل‌های آن، سیستمی با درجه نامعینی بالا می‌باشند. نکته قابل توجه در این سازه‌ها، ناشناخته بودن اشکال خطوط تاثیر کابل در حالت‌های پیشرفته و پرکابل است. این خطوط به طور قابل توجهی تحت تاثیر اثرات ثانویه هستند که می‌تواند ترکیبی از اثر توام باد و باران بر روی کابل‌ها باشد.

باد در سرعت‌های متوسط ممکن است منجر به ارتعاش با دامنه بالا در فرکانس‌های پایین شود. این پدیده در پل‌های ترکه‌ای بسیاری مشاهده شده و به جزئیات مورد مطالعه قرار گرفته است. ارتعاش ناشی از باد و باران

برای نخستین بار توسط هیکامی و شیرایشی<sup>۱</sup> در پل کابلی مایکونیشی<sup>۲</sup> [۲] مشاهده شد. سپس این ارتعاش در سایر نقاط دنیا نیز مشاهده گردید. مطالعات بسیاری برای آشکارسازی ساخت و کار و شرایط ارتعاش القایی باد و باران در پل‌های کابلی انجام شده است. در مقاله‌ای که هیکامی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۸ با توجه به مشاهداتشان از پل مایکونیشی ارائه دادند به این نتیجه رسیدند که ارتعاش کابل در این پل ناشی از ترکیب باد و باران بوده است. ارتعاش به واسطه یک فرکانس کمتر از نوسان القایی و با دامنه بزرگتر مشخص شده است. تاثیر باران از جریان آب باران در طول قسمت بالایی سطح بادپذیر کابل نشات گرفته و با جریان در بالای کابل، ظاهر کابل در طول قطعه به صورت آیرودینامیکی ناپایدار می‌شود [۳].

در سال‌های بعد توسط محققین مختلف، از جمله ماتسوموتو<sup>۴</sup> و همکاران با هدف روشن‌سازی ویژگی‌های ارتعاش و ساخت و کار تحریک ارتعاش کابل ناشی از باران به واسطه آزمایشات تونل باد و در نتیجه توسعه کنترل

- 1 Hikami & Shiraishi
- 2 Meiko-Nishi
- 3 Y.Hikami
- 4 Matsumoto

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Ali.golsoorat\_pahlaviani@iauct.ac.ir



آن ارتعاش دامنه محدود در سرعت‌های نسبتاً کم باد می‌باشد. ارتعاش ناشی از گردباد کابل، هنگامی که جهت باد تقریباً بر محور کابل عمود باشد، بر اثر جریان متناوب گردبادها در دو طرف کابل رخ می‌دهد. میزان سرعت بادی که فرکانس تحریک گردباد با فرکانس طبیعی کابل مطابقت پیدا می‌کند را می‌توان با ترم عدد استروهل<sup>۴</sup> محاسبه نمود:

$$U = fD / S \quad (1)$$

$U$  میانگین سرعت باد؛  $f$  فرکانس طبیعی کابل؛  $D$  قطر کابل و  $S$  عدد استروهل می‌باشد. برای سطح مقطع کابل‌های دایره با عدد رینولدز<sup>۵</sup> در حدود  $10^4$  تا  $3 \times 10^3$ ،  $S$  در حدود ۰٫۲ است. عکس دامنه نوسان کابل با عدد اسکراتون<sup>۶</sup> ( $S_c$ ) متناسب است. با توجه به رابطه (۲) می‌توان مشاهده نمود که افزایش جرم واحد طول  $m$  و نسبت میرایی  $\zeta$  کابل باعث افزایش عدد اسکروتون و در نتیجه کاهش دامنه نوسان خواهد شد.

$$S_c = 4\pi m \zeta / \rho D^2 \quad (2)$$

تخمین واقع‌گرایانه نسبت میرایی کابل مهار پل‌های در حال سرویس در حدود  $0/001$  تا  $0/005$  می‌باشد. به عنوان مثال، عدد اسکروتون کابلی متشکل از رشته‌های فولاد گروت شده<sup>۷</sup> درون لوله کابل و دارای نسبت میرایی  $0/005$  برابر ۱۲ می‌باشد. دامنه نوسان تنها در حدود  $0/005$  قطر کابل می‌باشد. در حین ساخت و قبل از گروت کردن، نسبت میرایی بسیار کمتر است (در حدود  $0/005$ ) و در نتیجه دامنه نوسان می‌تواند تا حدود  $4\%$  قطر کابل رخ دهد [۱۷]. بنابراین، احتمال آنکه جریان گردباد ناشی از کابل در مورد پل‌های ترکیه‌ای مساله حادی باشد، چندان زیاد نخواهد بود. با افزودن میزان کمی میرایی، تحریک گردباد به نحو موثری کاهش می‌یابد.

### ۲-۳- تازش<sup>۸</sup> کابل خشک مایل

کابل منفرد دارای سطح مقطع دایره که در راستای عمود بر باد قرار دارد

ارتعاش کابل تحقیقاتی انجام دادند [۴]، پنونگ و وارنیچای<sup>۱</sup> و همکارانش در ارتباط با کنترل تاندون فعال از پل‌های ترکیه‌ای در معرض یک نیروی سینوسی عمودی به صورت تجربی و تحلیلی مطالعه نمودند [۵]، چنگ<sup>۲</sup> و همکاران در زمینه یک عنصر کابل سه گره جدید جهت مدلسازی حرکات عرضی کابل‌ها و تأثیر رفتار ارتعاش کابل در ویژگی‌های دینامیکی پل‌های کابلی تحقیق نمودند [۶]، مینگ گو<sup>۳</sup> و همکاران پدیده ارتعاش ناشی از باد و باران یک مدل کابل در شرایط باران واقعی در یک تونل باد را مدلسازی کردند و تأثیرات چند عامل اصلی، از جمله زاویه شیب کابل، فرکانس و میرایی کابل و همچنین زاویه انحنای باد بر ویژگی‌های ارتعاش ناشی از باد و باران را به طور مفصل در آزمون تونل باد بررسی نمودند [۷]. تحقیقات متعددی بر روی این موضوع انجام شد و راه‌کارهای متفاوتی جهت کاهش این ارتعاش القایی پیشنهاد گردید [۸-۱۶].

در این مقاله ابتدا تأثیر باد و باران بر روی کابل پل‌های ترکیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده است، سپس با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته بواسطه اضافه نمودن برآمدگی روی سطح کابل سعی بر کاهش ارتعاش القایی ناشی از باد و باران داشتند، تلاش بر آن شده تا با ایجاد شیار بر روی غلاف کابل با گام بندی مشخص از ارتعاش القایی ناشی از باد و باران کاسته شود.

### ۲-۲ ارتعاش کابل ناشی از باد

#### ۲-۱- ضربه حاصل از آشفتگی باد

سازه‌های انعطاف‌پذیری نظیر کابل با طول مهاری زیاد، در بادهای شدید تحت تأثیر حرکات قابل توجه قرار می‌گیرند که این امر به دلیل وجود ضربه‌های ناشی از آشفتگی جریان هوا می‌باشد. در کابل‌های با طول مهاری زیاد، بر اثر حرکات ایجاد شده مودهای پایین‌تر تحریک می‌شوند. باید مدنظر داشت که این پدیده ناپایداری آیرودینامیکی محسوب نمی‌شود و حتی در سازه‌های بسیار پایدار آیرودینامیکی در اثر بادهای شدید نیز ممکن است حرکاتی مشاهده شود. عموماً حرکات ضربه‌ای در مورد کابل پل‌های کابلی چندان مساله قابل توجهی ایجاد نمی‌کند. حرکات ضربه‌ای به آرامی و توام با افزایش سرعت باد افزایش پیدا می‌کنند [۱۷].

### ۲-۲- ارتعاش ناشی از گردباد

ارتعاش ناشی از گردباد ارتعاشی کلاسیک حساب می‌شود و ویژگی اصلی

- 1 Pennung Warnitchai
- 2 S.H. Cheng
- 3 Ming Gu

- 4 Strouhal number
- 5 Reynolds number
- 6 Scruton number
- 7 grouted
- 8 Galloping

### ۳- مکانیزم ارتعاش ناشی از باد و باران

جریان آب روی کابل باعث می‌شود شکل موثر کابل تغییر کرده و توام با نوسان کابل حرکت کند و تغییرات تناوبی در نیروی آیرودینامیکی را ایجاد می‌کند که در نهایت باعث تبدیل انرژی ناشی از باد به نوسان می‌گردد. با توجه به مشاهدات و تحقیقات گذشته، ارتعاش کابل‌ها هنگامی رخ می‌دهد که باران همراه باد با سرعت متوسط (۸-۱۵ متر بر ثانیه) در جهتی با زاویه ۲۰ تا ۶۰ درجه نسبت به صفحه کابل، به کابل برخورد نماید. باید این نکته را نیز در نظر داشت که شیب نزولی کابل نیز باید در جهت باد باشد. فرکانس‌های کابل‌ها عموماً کم ولی دامنه حداکثر بسیار بالا و در محدوده ۰/۲۵ تا ۱ متر، توام با حرکات تند بوده که حتی در مواردی منجر به برخورد شدید کابل‌های مجاور به یکدیگر شده است.

مدل یک درجه آزادی براساس تجزیه و تحلیل یک حالت است که نوسانات آیرودینامیکی همراه با جریان و کابل را توصیف می‌کند. خطی‌سازی مدل ارایه شده، ارزیابی صریح نیروهای میرایی آیرودینامیکی و نیروهای برانگیزاننده، فرمول‌های ساده‌ای را برای تخمین دامنه ارتعاش‌های ناشی از باد و باران کابل را فراهم می‌آورد.

### ۴- مدل‌سازی پدیده ارتعاش ناشی از باد و باران در آزمایشگاه

#### ۴-۱- تحلیل ابعادی

کابل‌های پل‌های ترکه‌ای معمولاً قطری بین ۱۰۰ mm الی ۱۸۰ mm دارند، اما با توجه به ابعاد تونل باد، کابل با قطری برابر ۵۰ mm انتخاب گردید. با توجه به ابعاد نمونه مورد آزمایش و همچنین ابعاد محفظه آزمایش، دو نمونه کابل تحت زاویه‌های ۴۵° و ۶۰° نسبت به صفحه عمود بر باد و زاویه ۲۵° نسبت به افق مورد آزمایش قرار گرفتند. تونل باد دارای محفظه آزمایش به ابعاد ۱۰۰۰ mm عرض و ۸۰۰ mm ارتفاع و سرعت ۰ تا ۱۰ m/s می‌باشد. کابل‌های مورد آزمایش به قرار زیر طراحی گردیدند:

۱- نمونه اول غلاف کابل به طول ۱۰۰۰ mm و قطر ۵۰ mm از جنس PVC

۲- نمونه دوم غلاف کابل مشابه نمونه اول با این تفاوت که دو شیار به قطر ۸ mm و ارتفاع ۴ mm روی آن تعبیه شده است. شیارها با زاویه ۴۵° می‌باشد (شکل ۱-الف).

با توجه به آنکه ایجاد شیار بر روی غلاف PVC باعث ایجاد محدودیت می‌گردد، لذا از لوله‌های تفلون استفاده شد، در نتیجه وزن غلاف‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و از آنجا که وزن در ارتعاش تاثیرگذار است، باید وزن نمونه‌های مورد آزمایش به صورت یکسان در نظر گرفته شود. نمونه اول نسبت به نمونه

دچار تازش نمی‌شود. به هر حال، هنگامی که سرعت باد دارای مولفه‌ای در جهتی غیر از جهت عمود بر محور کابل باشد، ناپایداری با مشخصاتی مشابه تازش مشاهده شده است و همچنین باید مدنظر داشت که برای کابل منفرد مایل، باد بر سطح مقطعی بیضوی از کابل اثر می‌کند [۱۷].

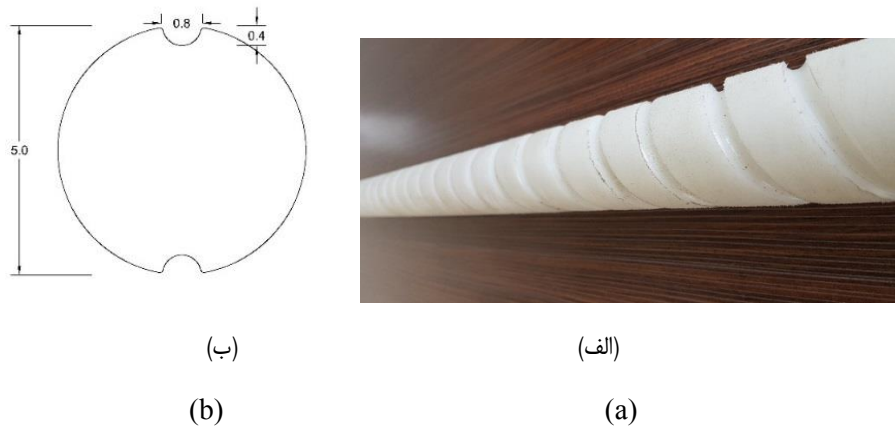
### ۲-۴- تازش متلاطم<sup>۱</sup> گروه کابل‌ها

تازش متلاطم، حرکت بیضی‌وار ایجاد شده به دلیل تغییرات در نیروهای کششی و عرضی باد در کابل در تعامل با سایر اجزای سازه‌ای، نظیر پیلون‌های مذکور می‌باشد. این امر در سرعت جریان بالا رخ می‌دهد و منجر به ایجاد نوسان با دامنه بالا می‌شود. نوسان‌های مذکور باعث خستگی تارهای بیرونی آویزهای پل در قیدهای انتهایی پل‌های معلق هم می‌شود. عدد اسکروتون پارامتر مهمی در ارزیابی تاثیرات تازش متلاطم می‌باشد. معادله تقریبی برای حداقل سرعت باد  $U_{crit}$  که در سرعت‌های بالاتر از آن می‌توان انتظار ناپایداری بر اثر تازش متلاطم داشت، به فرم زیر پیشنهاد شده است [۱۸، ۱۹]:

$$U_{crit} = cfD \sqrt{S_c} \quad (۳)$$

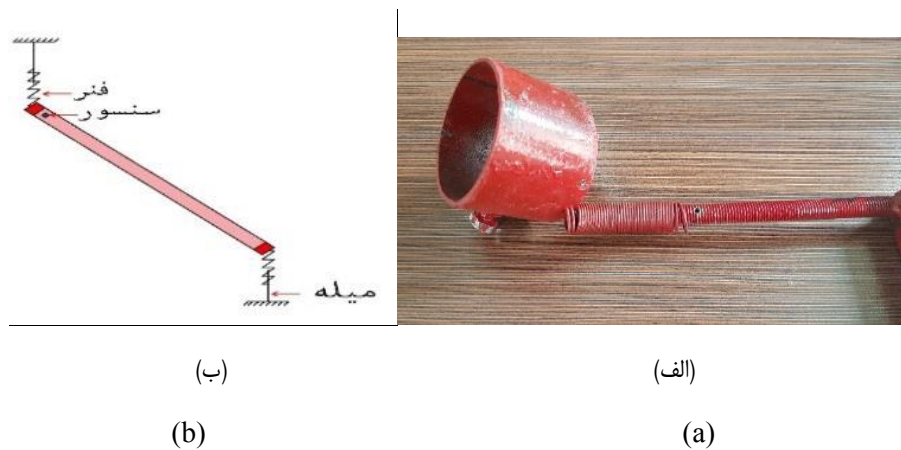
برای مقاطع گرد، ثابت C، مقدار تقریبی و به صورت میانگین برابر ۴۰ می‌باشد. برای پل‌های ترکه‌ای این ثابت به فاصله خالص میان کابل‌ها بستگی دارد؛  $c=25$  برای کابل‌های نزدیک به یکدیگر (فاصله  $2D$  تا  $6D$  که  $D$  قطر کابل می‌باشد)؛ و  $c=80$  برای کابل‌های با فواصل معمول (عموماً  $10D$  و بیشتر) می‌باشد [۱۷]. ممکن است سرعت بحرانی باد، به میزانی باشد که در طول عمر پل چندین بار رخ دهد. بنابراین، تازش متلاطم پتانسیل ایجاد مشکل سرویس‌دهی برای پل را داراست. با استفاده از معادله  $U_{crit}$  می‌توان در مورد روش‌های کاهش ایده‌ای بدست آورد؛ با افزایش عدد اسکروتون یا فرکانس طبیعی، کابل‌ها پایداری بیشتری در سرعت‌های بالاتر خواهند داشت. به هر حال، افزایش فرکانس طبیعی نسبت به عدد اسکروتون تاثیر بیشتری در  $U_{crit}$  دارد، چرا که عدد جذر عدد اسکروتون در رابطه (۳) وارد شده است. عدد اسکروتون با افزایش میرایی افزایش می‌یابد. فرکانس طبیعی کابل‌ها را می‌توان با نصب فاصله نگهدار<sup>۲</sup> جهت کاهش طول موثر ارتعاش افزایش داد.

1 Wake galloping  
2 Spacer



شکل ۱. غلاف کابل با شیار؛ (الف) نمونه با شیار مارپیچ، (ب) محل قرارگیری شیار

Fig. 1. Cable sheath with grooves, a) Sample with spiral grooves b) Grooves location



شکل ۲. تکیه‌گاه غلاف؛ (الف) نمونه ساخته شده، (ب) تصویر شماتیک

Fig. 2. Sheath support, a) Sample made, b) Schematic image

ارتعاش آن با کابل نمونه واقعی، تکیه‌گاه کابل همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، شامل فنرهایی عمود بر محور کابل بوده تا به کابل اجازه ارتعاش داده شود.

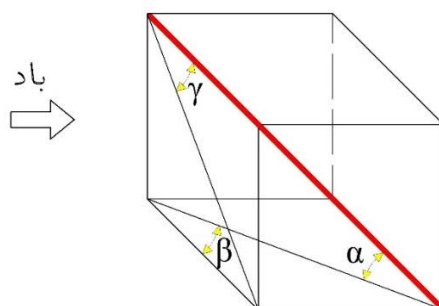
جهت کابل نسبت به جریان باد با زاویه‌های  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  که در شکل ۳ نمایش داده شده است مشخص گردیده است. زاویه  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب، زاویه کابل نسبت به افق و زاویه کابل نسبت به صفحه عمود بر باد می‌باشد. نمونه مورد آزمایش با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و دو زاویه نسبت به صفحه

دوم وزنی در حدود  $2500 \text{ g}$  کمتر داشته که این میزان کاهش وزن را با تعبیه فلزی به وزن  $2500 \text{ g}$  که به صورت یکنواخت در طول نمونه جایگذاری شده تامین گردید و وزن دو غلاف برابر با  $1/25 \text{ Kg}$  گردید. جهت جلوگیری از ایجاد خلاء در اطراف شیارها، یک انحنا در لبه شیار تعبیه شد (شکل ۱-ب). با توجه به آن که نمونه مورد آزمایش قسمتی از کابل پل‌های ترک‌های است و طول به کارگرفته شده در آزمایش نسبت به طول واقعی کابل پل ترک‌های کمتر است، جهت عدم جلوگیری از ارتعاش کابل و شبیه سازی

جدول ۱. پارامترهای سازه‌ایی و باد

Table 1. Structural parameters and wind parameters

پارامتر	قطر کابل: D (mm)	طول موثر: L (mm)	زاویه کابل نسبت به افق: $\alpha$ ( $^\circ$ )	دبی ( $m^3/h$ )	وزن کابل: m (kg/m)
مقدار	۵۰	۱۰۰۰	۲۵	۰/۶۶	۱/۲۵



شکل ۳. زوایای کابل

Fig. 3. Cable angles

۴-۲- ارتعاش‌های ناشی از باد و باران روی کابل ساده نمودار ۱-الف دامنه کاهش یافته،  $y_r$ ، جابه جایی کابل در مقابل کاهش سرعت باد،  $U_r$ ، را برای کابل ساده در شرایط مختلف انحراف نشان می‌دهد. کاهش دامنه و کاهش سرعت باد که کمیت‌های بی بعد می‌باشند به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۰]:

$$y_r = y / D \quad (۴)$$

$$U_r = U / f_s D \quad (۵)$$

که در آن  $y$ ،  $U$  و  $f_s$  به ترتیب حداکثر دامنه (m)، سرعت باد ورودی (m/s) و فرکانس پایه می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده نمود، با افزایش سرعت باد

عمود بر باد  $60^\circ$ ،  $45^\circ$   $\beta$  مورد آزمایش قرار گرفته است. جهت ایجاد جریان آب مصنوعی بر روی کابل نازل‌هایی در قسمت بالایی کابل تعبیه گردید که آب را به واسطه پمپ به روی کابل هدایت می‌کند [۷].

جهت اندازه‌گیری فشار دینامیکی و سرعت باد از لوله پیتوت و برای اندازه‌گیری ارتعاش کابل از یک شتاب‌سنج که در ابتدای کابل و با فاصله  $0.5 D$  (که  $D$  قطر کابل می‌باشد) نصب گردیده به صورتی که هیچ اختلالی در ارتعاش کابل بوجود نیاید (شکل ۲-ب)، استفاده شد. این شتاب‌سنج، ارتعاشات کابل در صفحه افقی و عمودی را به طور کامل ثبت نموده است. ارتعاشات نمونه‌ها به مدت  $60s$  با فرکانس نمونه‌برداری  $50 Hz$  ثبت گردید. در این آزمایش نمونه‌ها تحت سرعت باد  $5$ ،  $10$ ،  $15$ ،  $20$ ،  $25$  و  $30$  قرار گرفته‌اند. پارامترهای ساختاری مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای هر زاویه انحراف  $\beta$ ، پارامترهای دینامیکی مدل‌های کابل، از جمله فرکانس پایه  $f_s$  و نسبت میرایی  $\zeta$ ، که از آزمایش‌های ارتعاش آزاد برآورد شده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای دینامیکی کابل

Table 2. Cable dynamic parameters

$\beta = 60^\circ$		$\beta = 45^\circ$		
$f_s$ (Hz)	$\zeta$ (%)	$f_s$ (Hz)	$\zeta$ (%)	
۰/۸۶	۰/۱۶	۰/۸۶	۰/۱۶	مدل ۱ (نمونه ساده)
۰/۸۶	۰/۱۶	۰/۸۶	۰/۱۶	مدل ۲ (نمونه شیاردار)



(ب)

(الف)

(b)

(a)

شکل ۴. غلاف نصب شده در تونل باد. الف) غلاف دارای شیار، ب) غلاف ساده

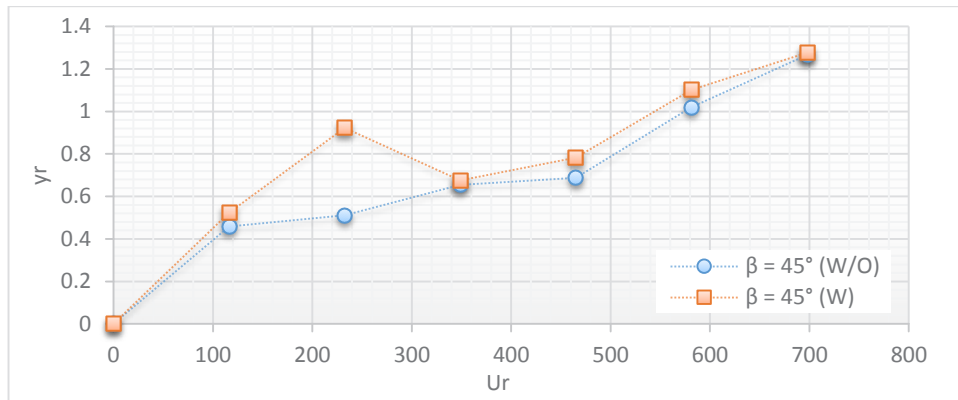
Fig. 4. Sheath installed in a wind tunnel, a) Sheath with Grooves, b) Simple sheath

مصنوعی ارتعاش القایی بالایی را نسبت به کابل خشک برای هر دو زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  و  $\beta = 60^\circ$  تجربه کرده است که این پدیده در تحقیقات گذشته نیز دیده شده است (مبنای نامگذاری کابل‌ها در جدول ۳ آمده است).

۳-۴- ارتعاش‌های ناشی از باد و باران روی کابل شیاردار در بخش ۲-۴ دامنه ارتعاش کابل ساده (مدل ۱) برای دو حالت بدون جریان و همچنین با جریان مصنوعی نشان داده شد. برای کاهش پاسخ‌های بزرگ، از ۲ شیار در اطراف کابل ساده استفاده شده است. نتایج تجربی روی کابل شیاردار (مدل ۲) در زیر آورده شده است.

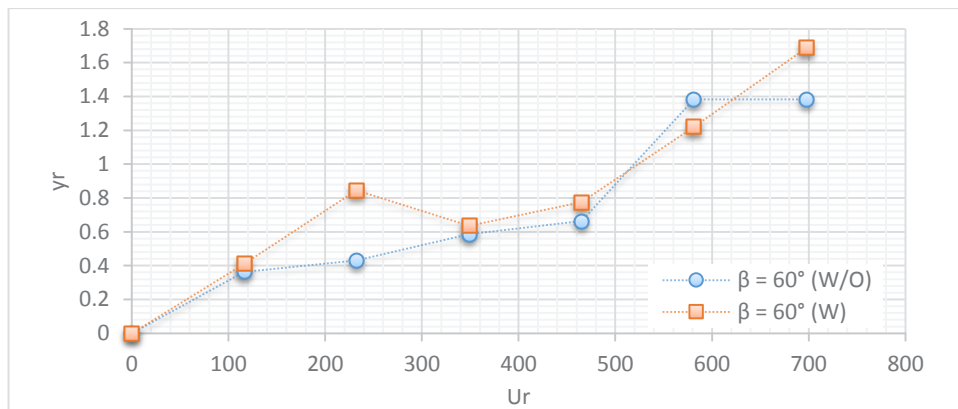
ارتعاش کابل ساده برای سرعت‌های باد بالاتر عموماً بزرگتر هستند. همچنین در این نمودار می‌توان مشاهده نمود، جریان آب باران روی کابل باعث افزایش ارتعاش در کابل شده که این ارتعاش القایی در زاویه انحراف  $\beta = 60^\circ$  نسبت به زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  بیشتر می‌باشد. در سرعت‌های پایین  $\beta$  (۰ تا ۵ m/s) ارتعاش القایی ناشی از باد برای کابل خشک (W/O) و همچنین ارتعاش القایی ناشی از باد و باران برای کابل با جریان مصنوعی (W) در زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  و  $\beta = 60^\circ$  بطور تقریبی برابر بوده و همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش سرعت باد تا ۳۰ m/s ارتعاش القایی در کابل با جریان مصنوعی نسبت به کابل خشک افزایش پیدا کرد، همانطور که از شکل ۵ می‌توان مشاهده نمود در سرعت ۱۰ m/s، کابل با جریان





(الف)

(a)



(ب)

(b)

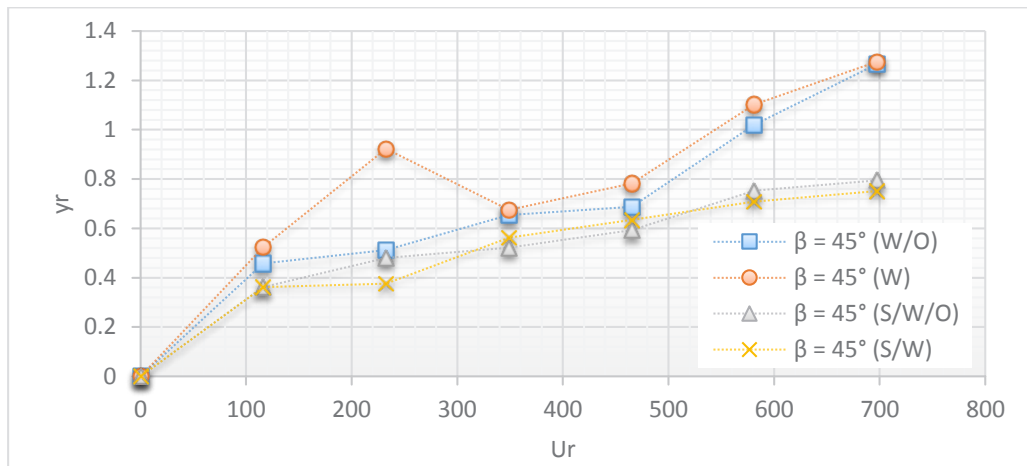
شکل ۵. پاسخ ناشی از باد و باران؛ (الف) کابل ساده با زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$ ، (ب) کابل ساده با زاویه انحراف  $\beta = 60^\circ$

Fig. 5. Response caused by wind and rain, a) simple cable with deviation angle  $\beta = 45^\circ$ , b) simple cable with deviation angle  $\beta = 60^\circ$

جدول ۳. مبنای نامگذاری کابل‌ها

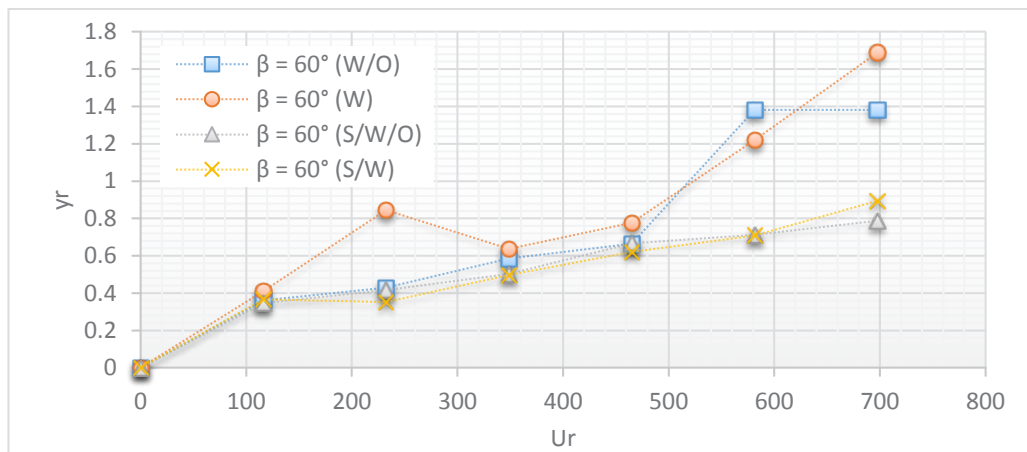
Table 3. The basis of the naming of cables

مخفف	مبنای نامگذاری کابل	نام
W/O	cable WithOut rain	کابل ساده بدون جریان باران
W	cable With rain	کابل ساده با جریان باران
S/W/O	cable with Spiral groove WithOut rain	کابل با شیار بدون جریان باران
S/W	cable with Spiral groove With rain	کابل با شیار با جریان باران



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۶. پاسخ ناشی از باد و باران؛ (الف) کابل با زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$ ، (ب) کابل با زاویه انحراف  $\beta = 60^\circ$

Fig. 6. Response caused by wind and rain, a) simple cable with deviation angle  $\beta = 45^\circ$ , b) simple cable with deviation angle  $\beta = 60^\circ$

از شیارهای مارپیچ به عنوان روشی برای کاهش ارتعاش کابل است. با نگاهی به ارتعاشات کابل با شیارهای مارپیچ، ارتعاشات آن همانند کابل ساده به‌طور کلی با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد. با مقایسه ارتعاش القایی ناشی از باد و باران در کابل خشک همراه با شیار مارپیچ (S/W/O) و کابل با جریان مصنوعی همراه با شیار مارپیچ (S/W)، در زاویه انحراف

شکل ۶ ارتعاش القایی ناشی از باد و باران برای دو کابل ساده و کابل با شیارهای مارپیچ در سطح کابل را برای زاویه انحراف مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار نیز می‌توان مشاهده نمود، هنگامی که روی کابل شیارهایی تعبیه می‌گردد کاهش قابل توجهی در ارتعاش القایی کابل خشک و کابل با جریان مصنوعی مشاهده می‌شود. این نشان دهنده کارایی استفاده



برای سرعت باد ورودی  $U = 10 \text{ m/s}$  دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 22, 41 \text{ Hz}$  رخ داده است. در شکل ۷-ج که برای سرعت ورودی  $U = 15 \text{ m/s}$  می‌باشد، مشاهده می‌کنیم دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 35, 41 \text{ Hz}$  رخ داده است. برای سرعت ورودی  $U = 20 \text{ m/s}$  همانطور که در شکل ۷-د می‌توان مشاهده نمود، بیشینه ارتعاش در فرکانس  $f_r = 52 \text{ Hz}$  رخ می‌دهد. در شکل ۷-ه که برای سرعت ورودی  $U = 25 \text{ m/s}$  می‌باشد، دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 4.5, 9.5 \text{ Hz}$  و پنج بیشینه خفیف در فرکانس‌های  $f_r = 12, 17, 25, 40, 120 \text{ Hz}$  رخ داده است؛ و در آخر همانطور که در شکل ۷-ی که برای سرعت ورودی  $U = 30 \text{ m/s}$  می‌باشد، می‌توان مشاهده نمود یک بیشینه ارتعاش در فرکانس  $f_r = 9.5 \text{ Hz}$  و هفت بیشینه خفیف در فرکانس‌های  $f_r = 4.5, 12, 16, 22, 39, 80, 140 \text{ Hz}$  رخ می‌دهد.

همانطور که از شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد، با افزایش سرعت باد بیشینه‌های ارتعاش در فرکانس‌های بالاتری رخ می‌دهد و همانگونه که می‌توان انتظار داشت با افزایش سرعت باد تعداد بیشینه‌های ارتعاش نیز افزایش می‌یابد.

#### ۶- مکانیزم ارتعاش با دامنه بزرگ کابل شیاردار

جهت مقایسه کابل دایره‌ای ساده (مدل ۱) و کابل دایره با شیار (مدل ۲)، کابل دایره‌ای شیاردار در تونل باد با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  ثابت شد. یک ارتعاش سنج جهت اندازه‌گیری نوسان کابل به فاصله  $0.5D$  از بالای کابل، روی کابل قرار گرفت. شکل ۸ چگالی طیفی توان (PSD) سرعت نوسان عمودی باد را در امتداد کابل برای کابل شیاردار با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  نشان می‌دهد. میانگین سرعت باد ورودی در تونل باد  $5 \text{ m/s}$  (شکل ۸-الف)،  $10 \text{ m/s}$  (شکل ۸-ب)،  $15 \text{ m/s}$  (شکل ۸-ج)،  $20 \text{ m/s}$  (شکل ۸-د)،  $25 \text{ m/s}$  (شکل ۸-ه) و  $30 \text{ m/s}$  (شکل ۸-ی) می‌باشد.

برای سرعت باد ورودی  $U = 5 \text{ m/s}$  همانطور که در شکل ۸-الف نشان داده شده است، دو بیشینه خفیف ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 4, 10 \text{ Hz}$  رخ داده است. همانطور که در شکل ۸-ب می‌توان مشاهده کرد، برای سرعت باد ورودی  $U = 10 \text{ m/s}$  دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 10, 39 \text{ Hz}$  رخ داده است. در شکل ۸-ج که برای سرعت ورودی

$\beta = 45^\circ$  در سرعت‌های پایین باد ( $0$  تا  $15 \text{ m/s}$ ) اختلاف ارتعاش بطور تقریبی یکسان بوده اما با افزایش سرعت باد تا  $30 \text{ m/s}$ ، این اختلاف ارتعاش زیاد گردیده است. اما در زاویه انحراف  $\beta = 60^\circ$  این اختلاف ارتعاش در سرعت‌های پایین نیز قابل مشاهده بوده است. با نگاهی به ارتعاشات کابل با شیارهای ماریچ، دامنه آنها به طور کلی برای افزایش سرعت باد، چه در باران چه بدون باران، افزایش می‌یابد. همچنین، می‌توان از شکل ۶ مشاهده نمود که در زاویه انحراف‌های مختلف ارتعاش القایی در باران بسته به سرعت باد در کابل با جریان مصنوعی بزرگتر و یا کوچکتر از شرایط خشک می‌باشد که این اختلاف ارتعاش در زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  مشهودتر است.

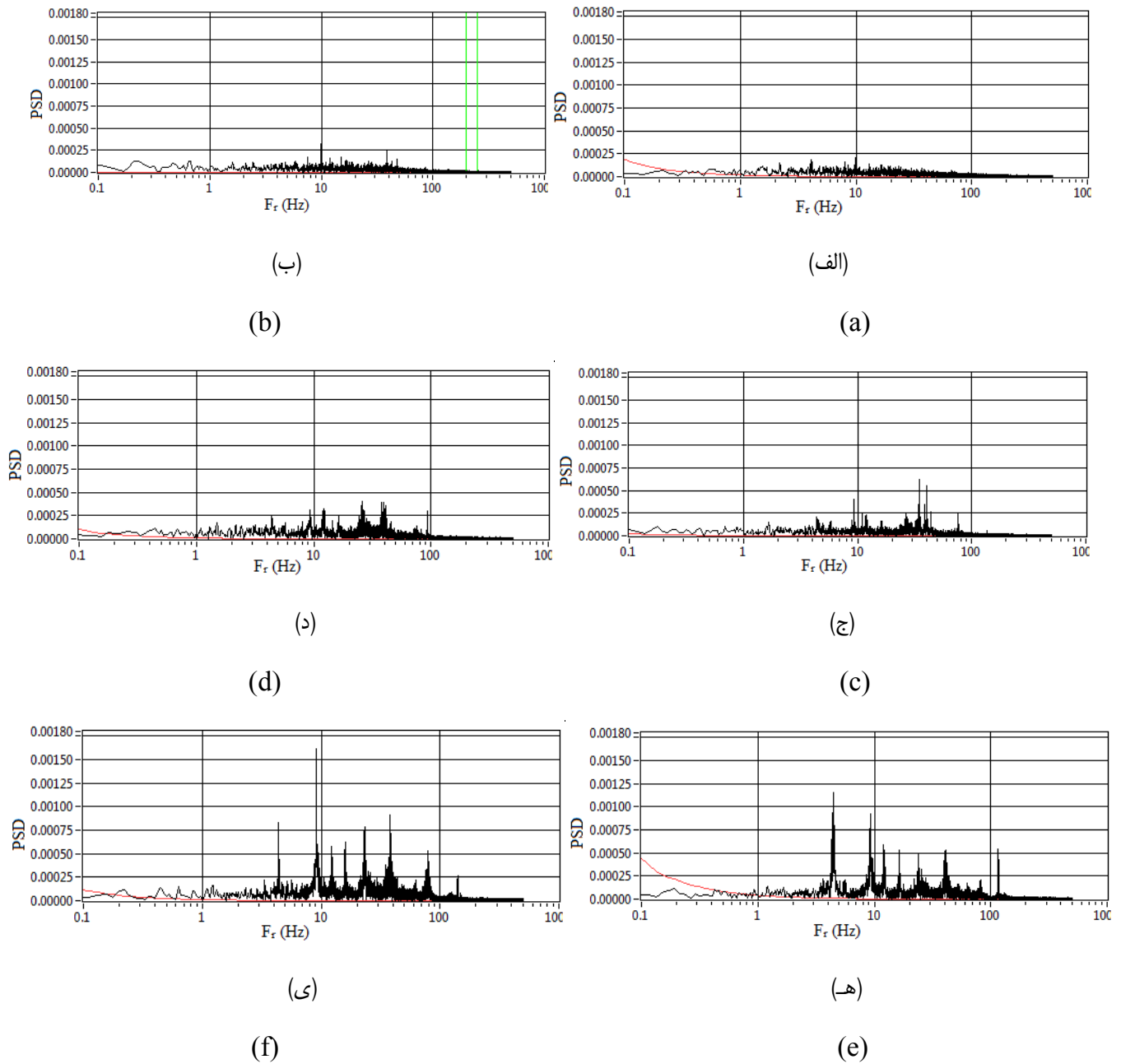
علاوه بر ارتعاش کابل با شیارهای ماریچ، تغییرات دامنه مدل ۲ (کابل با شیارهای ماریچ) در برابر سرعت باد الگوی متفاوتی با مدل ۱ (کابل ساده) دارد. همانطور که در مطالعات بسیاری نیز نشان داده شده است [۲، ۱۹، ۲۰]، تشکیل جریان‌های آب روی کابل بر اثر باران باعث ایجاد ارتعاشات با دامنه زیاد کابل‌های ساده می‌شود. شیارهای ماریچ ایجاد شده باعث قطع جریان آب روی کابل، کاهش ارتعاش کابل و تغییر الگوی آن می‌شود.

#### ۵- مکانیزم ارتعاش با دامنه بزرگ کابل ساده

همان‌طور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است کابل تحت اثر باد در معرض ارتعاش با دامنه بزرگ قرار می‌گیرد، درک ساخت و کار ارتعاش کابل در باد مهم است. برای این منظور، مولفه عمودی سرعت نوسان کابل از طریق آزمایش‌های تونل باد بررسی می‌گردد. در راه‌اندازی آزمایش، همانطور که در قبل نیز توضیح داده شد، کابل دایره‌ای ساده (مدل ۱) در تونل باد با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  ثابت شد. یک ارتعاش سنج جهت اندازه‌گیری نوسان کابل به فاصله  $0.5D$  (که  $D$  قطر کابل می‌باشد) از بالای کابل، روی کابل قرار گرفت.

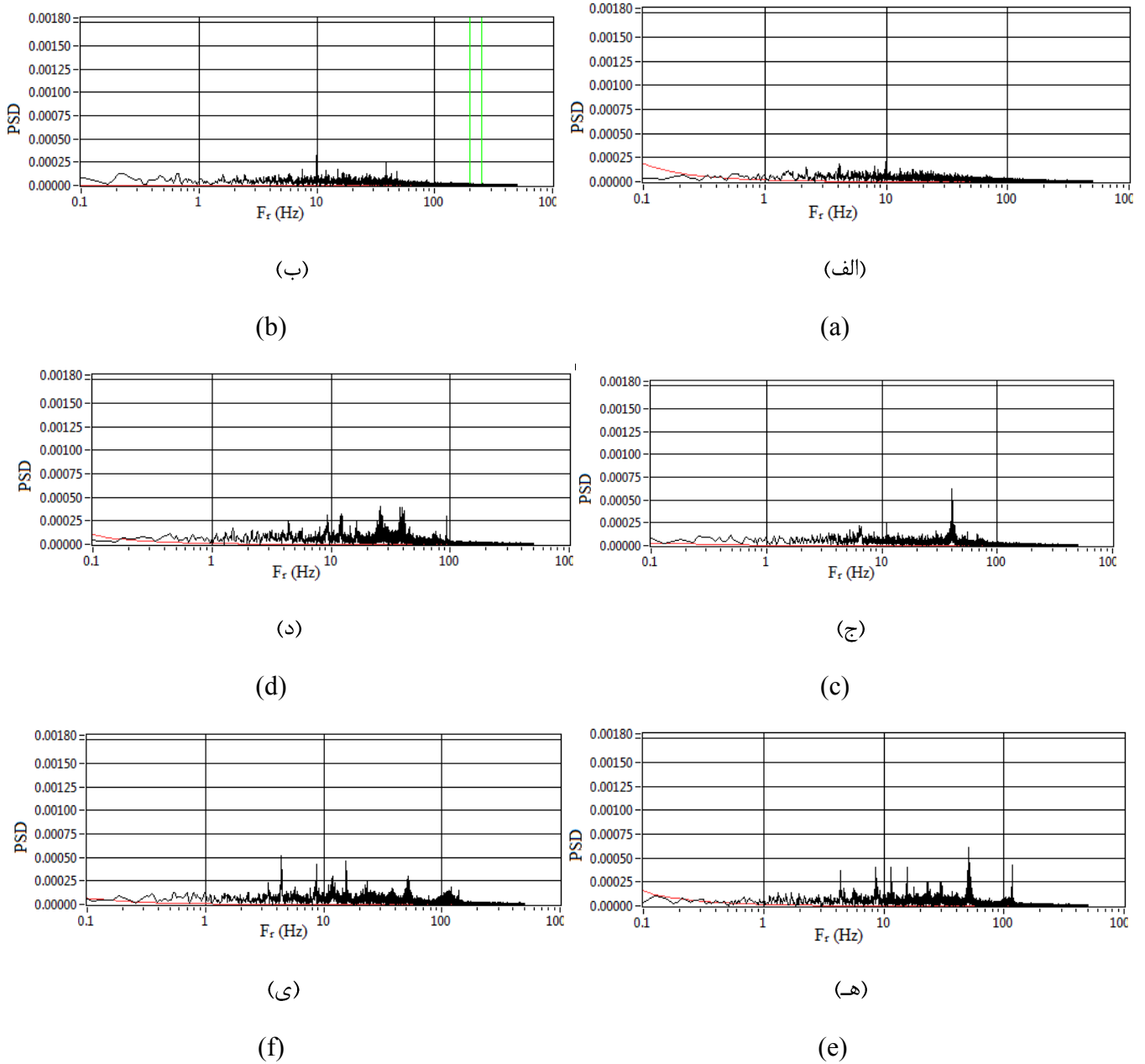
شکل ۷ چگالی طیفی توان (PSD) سرعت نوسان عمودی باد را در امتداد کابل برای کابل ساده با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  نشان می‌دهد. میانگین سرعت باد ورودی در تونل باد  $5 \text{ m/s}$  (شکل ۷-الف)،  $10 \text{ m/s}$  (شکل ۷-ب)،  $15 \text{ m/s}$  (شکل ۷-ج)،  $20 \text{ m/s}$  (شکل ۷-د)،  $25 \text{ m/s}$  (شکل ۷-ه) و  $30 \text{ m/s}$  (شکل ۷-ی) می‌باشد.

برای سرعت باد ورودی  $U = 5 \text{ m/s}$  همانطور که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، دو بیشینه خفیف ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 4, 10 \text{ Hz}$  رخ داده است. همانطور که در شکل ۷-ب می‌توان مشاهده کرد،



شکل ۷. چگالی طیفی توان (PSD) سرعت نوسان عمودی باد برای کابل ساده با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$ : الف  $U = 5$  m/s، ب  $U = 10$  m/s، ج  $U = 15$  m/s، د  $U = 20$  m/s، هـ  $U = 25$  m/s، ی  $U = 30$  m/s

Fig. 7. Power spectral density of vertical wind oscillation speed for a simple cable with an angle to the horizon  $\alpha = 25^\circ$  and a deviation angle of  $\beta = 45^\circ$ , a)  $U = 5$  m/s, b)  $U = 10$  m/s, c)  $U = 15$  m/s, d)  $U = 20$  m/s, e)  $U = 25$  m/s, f)  $U = 30$  m/s



شکل ۸. چگالی طیفی توان (PSD) سرعت نوسان عمودی باد برای کابل شیاردار با زاویه نسبت به افق  $\alpha = 25^\circ$  و زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$ ؛ الف  $U = 5$  m/s، ب  $U = 10$  m/s، ج  $U = 15$  m/s، د  $U = 20$  m/s، ه  $U = 25$  m/s، ی  $U = 30$  m/s

Fig. 8. Power spectral density of vertical wind oscillation speed for a grooved cable with an angle to the horizon  $\alpha = 25^\circ$  and a deviation angle of  $\beta = 45^\circ$ , a)  $U = 5$  m/s, b)  $U = 10$  m/s, c)  $U = 15$  m/s, d)  $U = 20$  m/s, e)  $U = 25$  m/s, f)  $U = 30$  m/s

گرفته شد و سپس ویژگی‌های ارتعاش کابل‌های پل‌های ترکیبی از طریق آزمایش‌های تونل باد مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها برای دو زاویه انحراف ( $45^\circ$  و  $60^\circ$ ) انجام شد. همچنین شیارهایی که به دور کابل به صورت مارپیچ چرخیده بود به عنوان روشی برای کاهش ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا ارتعاشات ناشی از باد و باران بر روی کابل‌های ساده و کابل‌های شیاردار مورد بررسی قرار گرفت و سپس آزمایشات بر روی ارتعاشات ناشی از باد بر روی کابل‌های ساده و شیاردار ادامه داده شد.

همان‌طور که در نمودارهای ارائه شده می‌توان مشاهده نمود، با افزایش سرعت باد ارتعاش کابل ساده عموماً افزایش می‌یابد. با توجه به آن که دو زاویه انحراف برای آزمایش در نظر گرفته شده است، کابل کمترین ارتعاش را برای  $\beta = 45^\circ$  و بیشترین ارتعاش را برای  $\beta = 60^\circ$  دارا بود. با افزایش سرعت باد بیشینه‌های ارتعاش در فرکانس‌های بالاتری رخ داده و همانگونه که انتظار می‌رفت تعداد بیشینه‌های ارتعاش نیز افزایش یافت.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در سرعت پایین (۰ تا ۵ متر بر ثانیه) ارتعاش کابل شیاردار در زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  کمی کمتر از ارتعاش کابل ساده می‌باشد، این در حالی است که در زاویه انحراف  $\beta = 60^\circ$  ارتعاش کابل شیاردار و ارتعاش کابل ساده تقریباً با هم برابر است. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه برای ارتعاش القایی ناشی از باد و باران در زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  و  $\beta = 60^\circ$  برای کابل شیاردار بسیار کمتر از کابل ساده بوده که با توجه به اینکه سرعت بحرانی جهت ارتعاشات القایی ناشی از باد و باران در کابل پل‌های کابلی در این محدوده می‌باشد (۸ تا ۱۲ m/s) می‌توان نتیجه گرفت وجود شیار جهت کاهش ارتعاش القایی مفید بوده است.

جهت درک بهتر ساخت و کار ارتعاشات با دامنه‌های بزرگ و همچنین ساخت و کار کاهش این دامنه‌ها، نوسانات مدل‌های کابل اندازه‌گیری شد. آزمایشات روی کابل با شیارهای مارپیچ کاهش قابل توجهی در دامنه ارتعاشات را نشان داد. وجود این شیارهای مارپیچ به دور کابل، جریان‌های فرکانس پایین را حذف می‌کند و بنابراین دامنه ارتعاش کاهش می‌یابد.

## منابع

- [1] E. Sanaee, G. Fadavi, Investigate How to Analyze and Design Cable bridges, Iran University of Science and Technology (in Persian), (1996).
- [2] Y. Hikami, N. Shiraishi, Rain-wind induced vibrations of cables stayed bridges, Journal of Wind Engineering and

$U = 15 \text{ m/s}$  می‌باشد، مشاهده می‌کنیم یک بیشینه ارتعاش در فرکانس  $f_r = 50 \text{ Hz}$  رخ داده است. برای سرعت ورودی  $U = 20 \text{ m/s}$  همانطور که در شکل ۸-د می‌توان مشاهده نمود، دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 25, 40 \text{ Hz}$  و پنج بیشینه خفیف در  $f_r = 4.5, 9.1$  Hz رخ می‌دهد. در شکل ۸-ه که برای سرعت ورودی  $U = 25 \text{ m/s}$  می‌باشد، دو بیشینه ارتعاش در فرکانس‌های  $f_r = 40, 120 \text{ Hz}$  و پنج بیشینه خفیف در فرکانس‌های  $f_r = 3.5, 9, 12, 17, 22 \text{ Hz}$  رخ داده است؛ و در آخر همانطور که در شکل ۸-ی که برای سرعت ورودی  $U = 30 \text{ m/s}$  می‌باشد، می‌توان مشاهده نمود سه بیشینه ارتعاش خفیف در فرکانس‌های  $f_r = 4.5, 9, 16 \text{ Hz}$  رخ داده است.

همانطور که از شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد، با افزایش سرعت باد بیشینه‌های ارتعاش در فرکانس‌های بالاتری رخ می‌دهد و همانگونه که می‌توان انتظار داشت با افزایش سرعت باد تعداد بیشینه‌های ارتعاش نیز افزایش می‌یابد.

با مقایسه نمودارهای چگالی طیفی توان سرعت نوسان عمودی باد برای کابل‌های ساده و شیاردار در زاویه انحراف  $\beta = 45^\circ$  می‌توان نتیجه گرفت ایجاد شیار بر روی کابل باعث کاهش بیشینه ارتعاش می‌شود. کابل ساده و کابل شیاردار تقریباً در فرکانس‌های مشابه، بیشینه نوسان خود را تجربه می‌کنند با این تفاوت که در سرعت باد ورودی  $U = 25 \text{ m/s}$  در کابل ساده بیشینه‌های ارتعاش در فرکانس‌های پایین و بیشینه‌های خفیف در فرکانس‌های بالا مشاهده شد اما در کابل‌های شیاردار این موضوع برعکس بوده و بیشینه‌های ارتعاش در فرکانس‌های بالا و بیشینه‌های خفیف در فرکانس‌های پایین رخ داده است. در سرعت باد ورودی  $U = 30 \text{ m/s}$  در کابل ساده هشت بیشینه ارتعاشی رخ داده که شامل یک بیشینه اصلی و هفت بیشینه خفیف می‌باشد، این در حالی است که در کابل شیاردار سه بیشینه رخ داده که میزان ارتعاش آن بسیار کمتر از کابل ساده می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌هایی که برای کاهش اثرات دینامیکی ناشی از جریان همزمان باد و باران کاربرد دارد تغییر در مشخصات آیرودینامیکی کابل می‌باشد. برای تغییر در شرایط آیرودینامیکی کابل‌های مربوط به پل‌های کابلی می‌توان در سطوح صاف روی کابل تغییراتی را ایجاد نمود. در این مقاله جهت تغییر در سطح صاف روی کابل، شیارهای مارپیچی در نظر

- structure system, *Journal of Sound and Vibration*, 187(4) (1995) 695-712.
- [12] K. Takahashi, Y. Konishi, Non-linear vibrations of cables in three dimensions, part II: Out-of-plane vibrations under in-plane sinusoidally time-varying load, *Journal of Sound and Vibration*, 118(1) (1987) 85-97.
- [13] N. Daniotti, J.B. Jakobsen, J. Snæbjörnsson, E. Cheynet, J. Wang, Observations of bridge stay cable vibrations in dry and wet conditions: A case study, *Journal of Sound and Vibration*, 503 (2021) 116106.
- [14] Y. Chang, L. Zhao, Y. Zou, Y. Ge, Arevised Scruton number on rain-wind-induced vibration of stay cables, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (2022).
- [15] Y. Ge, Y. Chang, L. Xu, L. Zhao, Experimental investigation on spatial attitudes, dynamic characteristics and environmental conditions of rain-wind-induced vibration of stay cables with high-precision raining simulator, *Journal of Fluids and Structures*, 76 (2018) 60-83.
- [16] H. Jing, Y. Xia, H. Li, Y. Xu, Y. Li, Excitation mechanism of rain-wind induced cable vibration in a wind tunnel, *Journal of Fluids and Structures*, 68, no. 32-47 (2017).
- [17] FHWA, Wind-Induced Vibration of Stay Cables, Report of Federal Highway Administration, FHWA-HRT-05-083, (2007).
- [18] P.A. Irwin, Wind vibrations of cables on cable-stayed bridges. Proceedings of Structural Congress XV, Portland, OR, pp. 383-387 (1997).
- [19] P.G. Specification, Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation, 4th edh, Post-Tensioning Institute Committee on Cable-Stayed, Bridges, (2001).
- [20] H. Vo-Duy, C.H. Nguyen, Mitigating Large Vibrations of Stayed Cables in Wind and Rain Hazards, *Shock and Vibration*, (2020) 5845712.
- Industrial Aerodynamics*, 29(1) (1988) 409-418.
- [3] M. Matsumoto, Observed behavior of prototype cable vibration and its generation mechanism, *Bridge Aerodynamics. Proceedings of the International Symposium on Advances in Bridge Aerodynamics*, Copenhagen, Denmark, pp. 189-211 (1998).
- [4] M. Matsumoto, T. Saitoh, M. Kitazawa, H. Shirato, T. Nishizaki, Response characteristics of rain-wind induced vibration of stay-cables of cable-stayed bridges, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57(2) (1995) 323-333.
- [5] P. Warnitchai, Y. Fujino, B. M. Pacheco, R. Agretp, An experimental study on active tendon control of cable-stayed bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22, 93-111 (1993).
- [6] S.H. Cheng, D.T. Lau, Modeling of cable vibration effects of cable-stayed bridges, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1671-3664(01-0074-12) (2002).
- [7] M. Gu, X. Du, Experimental investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(1) (2005) 79-95.
- [8] D. Zuo, N. Jones, Interpretation of field observations of wind- and rain-wind-induced stay cable vibrations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98 (2010) 73-87.
- [9] H. Yamaguchi, Y. Fujino, Stayed cable dynamics and its vibration control, in *International Symposium on Advances in Bridge Aerodynamics*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 235-253 (1998).
- [10] A. Pinto da Costa, J.A.C. Martins, F. Branco, J.L. Lilien, Oscillations of bridge stay cables induced by periodic motions of deck and/or towers, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 122(613-622) (1996).
- [11] P. Warnitchai, Y. Fujino, T. Susumpow, A non-linear dynamic model for cables and its application to a cable-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*H. Baghi, A. Golsoorat Pahlaviani, M. H. Ramesht, J. Asgari Marnani, A. Mirabdolah Lavasani, Experimental Investigation of a New Cables in Cable Stayed Bridges to Reduce Rain-Wind Induced Vibration, Amirkabir J. Civil Eng., 55(9) (2023) 1787-1800.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2023.21521.7751](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21521.7751)

