

## ارزیابی رفتار دینامیکی انواع پل های کابلی ایستا در برابر نیروی زلزله

علیرضا میرزا گل تبار روشن\*<sup>۱</sup>، جواد واثقی امیری<sup>۲</sup>، اویس دلاوریان عباس آبادی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

### چکیده

یکی از معیارهای پیشرفت بشر، توانایی ساخت سازه هایی عظیم تر و بلندتر می باشد. از یک طرف به دلیل رشد سریع در زمینه های فناوری کامپیوتر، کابل های فولادی با مقاومت بالا، تحلیل و ساخت پل های کابلی ایستا و از طرف دیگر به لحاظ ظاهر زیبا، جنبه های اقتصادی و آسان بودن ساخت، این نوع پل ها در نیم قرن اخیر از پر کاربردترین سازه ها برای پل های با دهانه متوسط تا بزرگ (از ۲۰۰ متر تا ۱۰۰۰ متر) به شمار می آیند. وجود کابل های انعطاف پذیر در سازه اصلی پلهای کابلی باعث بروز رفتار متفاوت این سازه ها با سایر سازه ها می گردد. در این مقاله رفتار دینامیکی غیر خطی پل های کابلی ایستا و برخی عوامل موثر بر آن (نوع آرایش کابلها و نوع شکل پایلون) مورد توجه قرار گرفت. برای رسیدن به این منظور از نرم افزار *CSI Bridge* استفاده شده است. روش تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی به روش انتگرال گیری مستقیم مورد تحلیل قرار گرفت. به دلیل اهمیت مساله غیر خطی در رفتار سازه، در تحلیل های انجام شده رفتار غیر خطی هندسی سازه شامل اندرکنش نیروی محوری فشاری با لنگر خمشی و نیز اثر تغییر شکل های نسبتاً بزرگ در سازه منظور شده است. در بررسی رفتار دینامیکی، رفتار سازه تحت اثر مولفه های زمین لرزه با در نظر گرفتن انواع مختلف شکل پایلون با توجه به حالات آرایش کابل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان می دهد در پلهای کابلی با آرایش کابل موازی با پایلون *H* شکل و برای پل کابلی با آرایش کابل بادبزی و شعاعی با پایلون *A* شکل، عملکرد مطلوب و بهتری دارد.

کلمات کلیدی: پل های کابلی ایستا، تحلیل دینامیکی غیر خطی، رفتار غیر خطی، زمین لرزه، پایلون.

\*نویسنده مسئول: علیرضا میرزا گل تبار روشن  
پست الکترونیکی: ar-goltabar@nit.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.40433 شناسه دیجیتال  
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.40433

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۵

## ۱- تاریخچه تحقیقات

مسئله عبور از رودخانه و دره ها یکی از مشکلات مبتلا به بشر از ابتدا تاکنون بوده است. از این رو مسئله پل یکی از مسائل اساسی است که سابقه دیرینه دارد. انواع پل ها از چوب و مصالح بنایی یکی از راه حل هایی است که بشر از هزاران سال پیش بدان دست یافته و در چند قرن اخیر پل های فلزی و بتنی در مقیاس بسیار وسیعی جای پل های قدیمی را پر کرده است. می توان پل هایی با دهانه بیش از ۱۰۰۰ متر (پل های کابلی در روسیه چین و ژاپن) که خود دستاوردی در مهندسی سازه محسوب می شود، نام برد. لذا در این مقاله به بررسی پل های کابلی ایستا با آرایش های متفاوت پرداخته شده است.

از اولین کسانی که تحقیق خود را در زمینه ی آنالیز استاتیکی غیر خطی پلهای کابلی ارائه کرد فلمینگ بود. ایشان با تهیه یک برنامه کامپیوتری جهت تحلیل سازه، به نتایج دلخواه رسید. ایشان در این تحقیق حالات غیر خطی اعم از خیز کابلها به علت وزن خودشان، اندرکنش بین بار محوری و لنگر خمشی در اعضای خمشی سازه و تغییر شکل بزرگ را مورد مطالعه قرار داد که نتایج تحقیقات وی به شرح زیر است: (۱) اثرات غیر خطی ناشی از تغییر در هندسه سازه سهم کوچکی از رفتار غیر خطی سازه را به خود اختصاص می دهد و برای بارهای معمولی می توان از آن صرفه نظر کرد. (۲) اثر اندرکنش بین بار محوری و لنگر خمشی در اعضای خمشی سازه قابل توجه نیست و برای سادگی در محاسبات میتوان از آن صرفه نظر کرد [۱].

کوماتسو و همکارانش در سال ۱۹۷۵ تحقیقات موردی را در مورد مشخصات دینامیکی پل های کابلی انجام دادند و نتایج عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. در تحقیقات ایشان تاثیر عواملی مثل سختی کابل بر روی مشخصات ارتعاشی سازه و سرعت وسایل نقلیه بر روی ضریب تقویت دینامیکی بررسی شد [۲].

سان بینگ و زانگ به صورت موردی تحلیل سه بعدی غیر خطی یک پل ترکیبی معلق- کابلی را جهت مطالعه پایداری دینامیکی آن با در نظر گرفتن برخی پارامترها همچون شکم دادگی کابل، طول بخش معلق و شکل عرشه انجام دادند و در انتها به این نتیجه رسیدند که پل ترکیبی معلق- کابلی نسبت به یک پل معلق با همان طول دهانه دارای برتری است. همچنین دریافتند که هر چه طول بخش معلق کوتاهتر باشد برای پل ترکیبی مفیدتر است. دیگر اینکه استفاده از عرشه مرکب روشی مناسب برای بهبود پایداری دینامیکی پل ترکیبی است. از طرفی ستون های فرعی در دهانه های کناری از نظر دینامیکی برای پل ترکیبی مناسب است [۳].

عبدالقادر و همکارانش تحقیقات خود را در زمینه رفتار لرزه ای پل های کابلی سه بعدی ارائه کردند. در این تحقیق حرکات غیر یکنواخت و یکنواخت اعمال شده بر پایه های پل در نظر گرفته شد. حالت های غیر خطی (مانند تغییر هندسی ناشی از تغییر شکل های بزرگ و اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی در برج و شاهتیر سخت کننده) در پل های کابلی نیز مورد توجه قرار گرفت. سپس روش تکرار با استفاده از ماتریس سختی مماسی برای مطالعه پاسخ لرزه ای غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت مثالهای عددی نیز برای مقایسه بین تحلیل پاسخ خطی و غیر خطی در مقابل زلزله با استفاده از روش نمودی (گام به گام) ارائه شد [۴].

نظمی و همکارانش تحقیقاتی را در زمینه تحلیل استاتیکی غیر خطی سه بعدی پل های کابلی ارائه نمودند. در این تحقیق روش آنالیز استاتیکی غیر خطی پل های کابلی تحت اثر وزن خود و نیروی پیش کشیدگی اولیه در کابل ها بیان شد. همچنین تمامی منابع غیر خطی (اعم از خیز کابل ها، و تغییر هندسی سازه در اثر تغییر شکل های بزرگ) در نظر گرفته شد و برای آنالیز، P-M اندر کنش استاتیکی غیر خطی سه بعدی یک برنامه کامپیوتری با استفاده از ماتریس سختی مماسی و روش تکرار تهیه شد [۵].

مایکل تسوس و همکارانش نیز روشی را برای فرمولبندی کابل تحت اثر وزن کابل در راستای طول آن ارائه دادند و نتایج خود را به صورت روابطی ارائه نمودند و مقادیر مدول الاستیسیته حاصل از روش ارائه شده خود را با مدول الاستیسیته مماسی مقایسه کردند [۶].

رید کارومی نیز روشی را برای مدلسازی و تحلیل پل های کابلی تحت تاثیر وسایل نقلیه ارائه داد که در آن از المان های محدود موثر و صحیح برای مدلسازی سازه پل، المان تیری برای مدل کردن شاهتیر و برج و نیز از المان کابلی پیوسته دو گرهی با استفاده از تعبیر تحلیلی دقیق برای زنجیره الاستیکی جهت مدل کردن کابل، استفاده شده است. همچنین در تحقیقات او میرایی پل، رفتار واقعی کابل و آثار

هندسه غیر خطی حین تحلیل پاسخ دینامیکی مورد توجه قرار گرفت و اثر سرعت وسایل نقلیه، میرایی پل، عکس العمل بین پل و وسیله نقلیه و میراگر جرمی تنظیم شده بر روی واکنش دینامیکی پل مورد بررسی قرار گرفت [۷].

چن و همکاران در سال ۲۰۰۰ از روش تعادل نیرو برای پیدا کردن تنش های کابل استفاده کرده اند. آنها برای بهینه کردن، مدلسازی را طی سه مرحله انجام داده و به جای بکارگیری محدودیتهای تغییرمکانی از لنگرهای خمشی در کنترل پارامترها استفاده نموده اند [۸].

شاه و دسای اهمیت اثرات غیر خطی در پلهای کابلی را نشان دادند. با افزایش طول دهانه، رفتار غیر خطی نیز افزایش می یابد به نحوی که این اثر با میزان افتادگی کابلها افزایش یافته و لنگرهای ناشی از نیروی محوری و اندرکنش کابل با پیلون و تیرهای اصلی موجب تغییر مکانهای بزرگ در روسازه می شود. به علاوه اثرات غیر خطی تحت اثر باد نیز تشدید می گردد. با افزایش دهانه پل و قطر کابلها و همچنین عدم یکنواختی سرعت باد بر سازه، اندرکنش غیر خطی باد-سازه به نحو چشم گیری افزایش می یابد که این امر تاثیرات فراوانی بر رفتار آیروستاتیک پلهای کابلی با دهانه بزرگ خواهد داشت [۹].

سعید.م.عالم و ت.ک.داتا در خصوص محاسبه تغییرات فرکانس محیطی ناشی از لرزش های زمین در پلهای کابلی و ارتباط زاویه تحریکات مختلف زمین با محور طولی پل تحقیقاتی را ارائه کرده اند. میزان تحریکات زمین با تابع چگالی طیف قدرت و تابع وابستگی فضایی بیان شده است. محاسبه در شرایط متفاوت محیطی و با تغییر تحریکات زمین در فاصله بین پیلون ها در حالات گوناگون ارتعاش و میزان تاثیرپذیری نیمه استاتیک تعریف می شود. تحلیل پارامتری برای بررسی میزان تاثیرپذیری از لرزشهای زمین، انجام شده است. پارامترهای تحلیل شامل شرایط محیطی و تحریکات زمین، زاویه رخ دادن ارتعاشات، ضریب تغییرات بین سه مولفه زلزله، تعداد و ماهیت مودهای ارتعاش و ضریب تغییرات اینرسی بین پیلون و عرشه و تابع چگالی طیف قدرت زمین هستند [۱۰].

دی.برونو و همکاران رفتار پل های کابلی با دهانه های بزرگ تحت بار زنده را مورد بررسی قرار داده اند. تحلیل بر اساس یک مدل پیوسته انجام شده و فرض شده است که فاصله بین مهارها در برابر طول دهانه قابل صرف نظر کردن است و در نتیجه اندرکنش نیروهای به وجود آمده در تیرها، پیلون و کابلها توسط توابع توزیع پیوسته بیان می شود. در این بررسی از روش انتگرال گیری مستقیم برای حل معادله تعادل استفاده شده است. همچنین نیروهای گریز از مرکز که می توانند سبب رفتارهای خمشی و پیچشی گردند مورد توجه قرار گرفته و با انجام یک تحلیل حساسیت ضریب ضربه برای جرم خارجی متحرک بر روی عرشه محاسبه شده است [۱۱].

نظمی و همکارانش در مورد ارتعاش پل های کابلی در اثر زلزله تحقیقاتی موردی ارائه دادند و جهت شناخت دقیق از رفتار سازه در اثر زلزله با استفاده از مدل های سه بعدی مناسب آثار تغییر امواج زلزله در طول حرکت خود را لحاظ نمودند [۱۲].

## ۲- مدلسازی

جهت مدلسازی عرشه از یک باکس بتنی در نرم افزار CSI Bridge استفاده شده است، المان عرشه به صورت سگمنت مدلسازی و در دو انتها به کابل متصل گردید. ارتباط باکس بتنی و کابل ها نیز توسط المان های صلب رابط Rigid Link تامین شده است. جهت مدلسازی کابل، از المان Cable که تنها در کشش عمل می کند و برای مدل سازی پیلون از المان Frame استفاده شده است. پایه های پیلون در بالا به هم متصل گردید.

## ۳- صحت سنجی

جهت صحت سنجی مدلسازی و بررسی نتایج نرم افزار از مدل مورد مطالعه در مرجع [۱۳] استفاده شده است. داده های پل های کابلی مورد بحث به شرح زیر است:

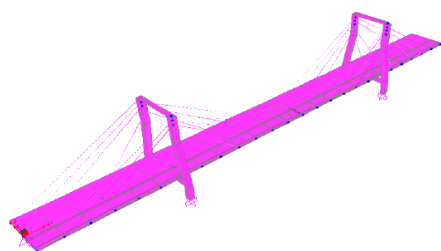
۱۰۰ متر

• دهانه مرکزی

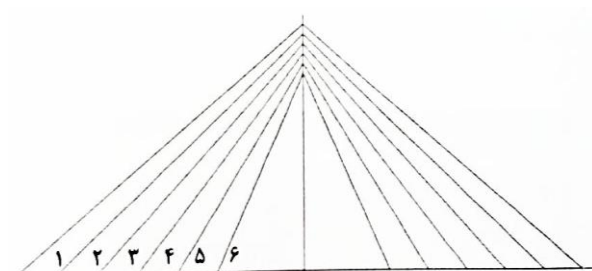
- دهانه کناری ۵۰ متر
- ارتفاع قسمت پایین عرشه ۱۰ متر
- ارتفاع قسمت بالای عرشه ۳۰ متر
- عرض عرشه ۱۷ متر
- ارتفاع مقطع عرشه ۲ متر
- مدول الاستسیته بتن  $E = 33541 \text{ Mpa}$
- پایلون از نوع H شکل و به ابعاد  $2 \times 2$  متر
- مدول الاستسیته کابل  $E = 200000 \text{ Mpa}$
- مساحت سطح مقطع کابل ها:

Cable 1&2	$0.004 \text{ m}^2$
Cable 3&4	$0.003 \text{ m}^2$
Cable 5&6	$0.002 \text{ m}^2$

در شکل ۱ چیدمان و شکل پل کابلی و در شکل ۲ مدل سه بعدی پل مطابق مرجع [۱۳] نمایش داده شده است.



شکل ۲: مدل سه بعدی پل [۱۳]



شکل ۱: چیدمان و شکل پل کابلی [۱۳]

جدول ۱: مقایسه مقادیر فرکانس های طبیعی ( $\text{rad/sec}$ )

شماره مود	Reference	Present study
Mode 1	0.889	0.880
Mode 2	1.019	1.047
Mode 3	1.079	1.347
Mode 4	1.460	1.350
Mode 5	1.793	1.437
Mode 6	2.035	1.465
Mode 7	2.280	1.663
Mode 8	2.408	2.433
Mode 9	2.682	3.202
Mode 10	3.083	3.252
Mode 11	3.373	4.147
Mode 12	3.504	4.288

نتایج فرکانسهای مرجع و نرم افزار CSI Bridge در جدول ۱ ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می گردد، مقادیر فرکانس حاصل از مدلسازی پل کابلی در نرم افزار مورد استفاده، نزدیک به نتایج حاصل از مرجع [۱۳] می باشد و لذا این امر بیانگر تایید عملکرد نرم افزار مذکور و صحت مدلسازی در تحلیل پلهای کابلی می باشد.

#### ۴- تحلیل دینامیکی پلهای کابلی

تحلیل پل کابلی با استفاده از نرم افزار CSI Bridge و به صورت تاریخچه زمانی غیر خطی انجام شده است، که در آن اثرات حرکت زمین به صورت تاریخچه زمانی تغییرات شتاب مشخص می شود. در این روش تحلیلی، سازه پل در تراز پایه تحت تاثیر شتاب های ناشی از زلزله که شتاب نگاشت نامیده می شود، قرار گرفته و در هر مقطع زمانی از طول اثر زلزله بر سازه، بازتاب های دینامیکی سازه بصورت تابعی زمانی محاسبه می شود. شایسته ذکر است تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی به دو دسته تقسیم بندی می شود:

الف: تحلیل تاریخچه زمانی سازهها به روش مودال (Fast Nonlinear Analysis)

ب: تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده از انتگرال مستقیم

دسته اول مربوط به سیستم های با رفتار خطی همراه با تعداد محدودی عضو با رفتار غیر خطی می باشد که در این روش نمی توان رفتار غیر خطی ماده ای و هندسی شامل اثرات  $P - \Delta$  و تغییرشکل های بزرگ را در نظر گرفت که روش مناسبی برای تحلیل دینامیکی غیر خطی پلهای کابلی به حساب نمی آید. تنها روش کاربردی برای اینگونه پل ها روش انتگرال گیری عددی با گام زمانی است. روش انتگرال گیری مستقیم که پاسخ سازه را در حوزه زمان محاسبه می کند جزء روش مناسب برای تحلیل دینامیکی غیر خطی پل های کابلی به حساب می آید که در این مقاله از این روش مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین رفتار غیر خطی هندسی سازه بصورت شکم دادگی کابل ها با توجه به تغییرات نیروی محوری، اندرکنش نیروی محوری فشاری با لنگر خمشی در برجها و نیز اثرات تغییر شکل های نسبتا بزرگ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی دینامیکی پل مورد مطالعه، از دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی پیاپی استفاده شده است به نحوی که تغییر شکل ها و تنش های موجود در اجزای پل، در انتهای تحلیل استاتیکی به صورت شرایط اولیه به تحلیل دینامیکی انتقال می یابد. تحلیل استاتیکی به منظور در نظر گرفتن وزن سازه پل و همچنین شکم دادگی کابل ها انجام شده است این تحلیل باعث می شود که فرم تغییر شکل یافته پل در ابتدای شروع تحلیل دینامیکی حفظ گردد. سپس در گام بعدی، از تحلیل دینامیکی به روش انتگرال گیری مستقیم با در نظر گرفتن تغییر شکل های بزرگ استفاده شده است.

#### ۵- شتاب نگاشت

شتاب نگاشت های انتخابی جهت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ [۱۵] ایران انتخاب و به مقیاس در آورده شدند. در این مقاله جهت انجام تحلیل ها از هفت زوج شتاب نگاشت به عنوان رکورد زلزله های مورد نیاز در تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی استفاده گردیده است. جزئیات شتاب نگاشت های مفروض و مشخصات لرزه ای آن ها در جدول ۲ نشان داده شده است. در انتخاب شتابنگاشت سعی شده است شتاب نگاشت ها تا حد امکان ویژگی های مشترکی داشته باشند، که شامل موارد ذیل می باشد:

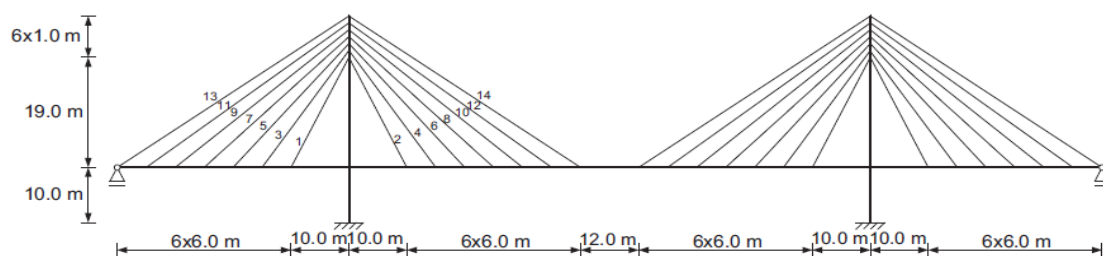
- در یک نوع طبقه بندی خاک قرار گیرند ( خاک نوع C)
- دارای ویژگی های حوزه دور از گسل باشند.
- طول مدت موثر یکسان داشته باشند.

جدول ۲: مشخصات لرزه‌ای شتاب نگاشت‌ها

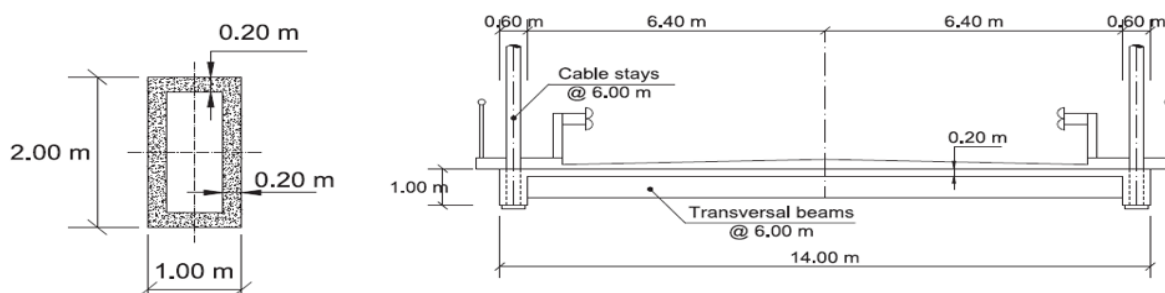
ضریب مقیاس	KM	PGA عرضی	PGA طولی	سال	بزرگی	ایستگاه	÷
1.64	70.26	0.053	0.068	1995	6.9	MZH	Kobe
1.32	59.04	0.054	0.062	1999	7.62	CHY012	Chi-Chi
1.73	91.14	0.104	0.093	1978	7.35	Ferdows	Tabas
1.93	68.62	0.066	0.074	1994	6.69	Anaheim - W Ball Rd	Northridge
1.32	144.9	0.038	0.052	1992	7.28	Anaheim - W Ball Rd	Landers
1.56	79.25	0.118	0.049	1989	6.93	Berkeley LBL	Loma Prieta
2.14	104.83	0.029	0.03	2003	6.6	Golbaf	Bam

## ۶- پل کابلی موردی

در این قسمت یک مطالعه موردی روی مدلی متقارن انجام گرفته است، که دارای دو پایلون به ارتفاع ۳۵ متر و به دهانه کلی ۱۹۶ متر است که دهانه اصلی آن ۱۰۴ متر و دهانه‌های کناری به طول ۴۶ متر و همچنین عرض این پل ۱۴ متر می باشد. کلیه ابعاد و جزئیات پل بر گرفته از مرجع [۱۶] می باشد که در زیر ارائه شده است.



شکل ۳: ابعاد اصلی پل کابلی ایستا [۱۶].



شکل ۴: مقطع عرضی عرشه و جزئیات پایلون [۱۶].

جدول ۳: سطح مقطع کابل ها [۱۶]

شماره کابل	سطح مقطع کابل ( $cm^2$ )
1	25.5
2	25.5
3	15
4	15
5	22.5
6	22.5
7	22.5
8	22.5
9	28.5
10	28.5
11	31.5
12	31.5
13	55.5
14	55.5

جدول ۴: خصوصیات مصالح پل کابلی ایستا

نوع مصالح	مدول ارتجائی ( $KN/m^2$ )	ضریب پواسون	چگالی ( $KN/m^3$ )
بتن	$335 \times 10^5$	0.2	24.5
کابل	$1.95 \times 10^8$	0.3	77

## ۷- متغیرهای داخلی

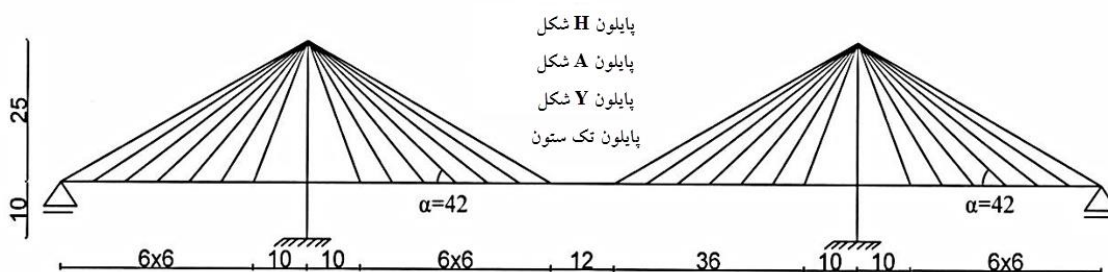
رفتار پلهای کابلی ایستا تحت تاثیر پارامترها یا متغیرهای داخلی گوناگون می باشد، که مهمترین این پارامترها عبارتند از:

- شکل هندسی آرایش کابل
- شکل پایلون
- ارتفاع پایلون
- تعداد کابل
- طول دهانه اصلی پل کابلی

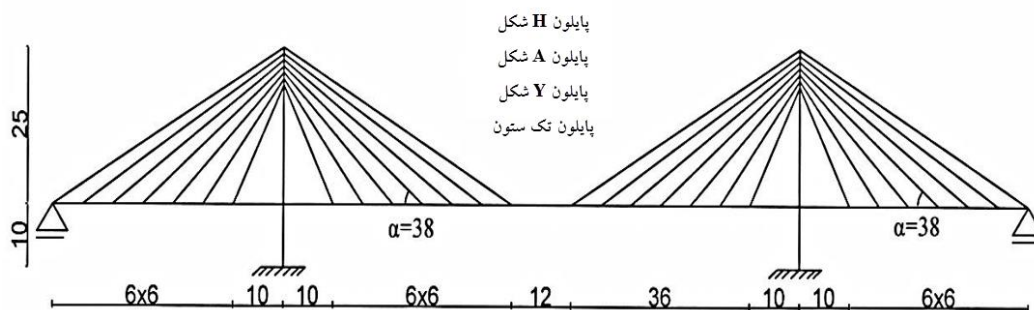
در این مقاله متغیرهای داخلی به کار رفته در پل مورد مطالعه شامل انواع شکل هندسی آرایش کابلی (شعاعی، بادبزی، موازی) و انواع مختلف پایلون شامل: A شکل، H شکل، Y شکل معکوس و تک ستونی شکل می باشد که در مجموع ۱۲ مدل پل کابلی با اعمال هفت زوج شتاب نگاشت معرفی شده که برای زلزله حوزه دور از گسل می باشند، تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی انجام گرفت. جزئیات مربوط به نوع آرایش کابلی در اشکال ۵ تا ۷ ارائه شده است.

جدول ۵: پل های کابلی موردی

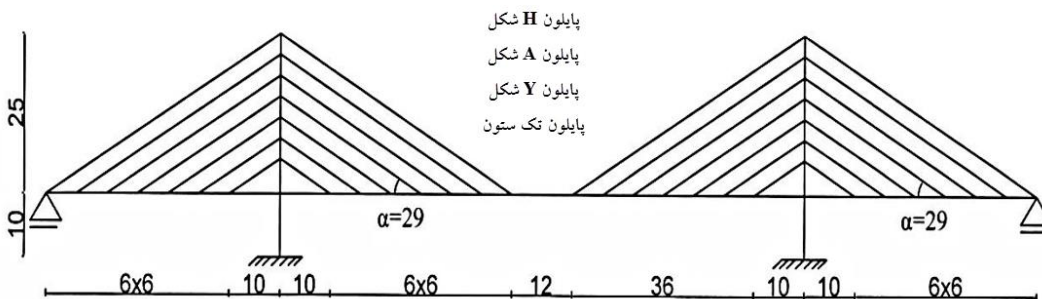
نوع آرایش کابلی	نوع پابلون	پل کابلی موردی
شعاعی	H	پل مورد ۱
بادبزی	H	پل مورد ۲
موازی	H	پل مورد ۳
شعاعی	A	پل مورد ۴
بادبزی	A	پل مورد ۵
موازی	A	پل مورد ۶
شعاعی	معکوس Y	پل مورد ۷
بادبزی	معکوس Y	پل مورد ۸
موازی	معکوس Y	پل مورد ۹
شعاعی	تک ستونی	پل مورد ۱۰
بادبزی	تک ستونی	پل مورد ۱۱
موازی	تک ستونی	پل مورد ۱۲



شکل ۵: پل کابلی ایستا با آرایش کابلی شعاعی.



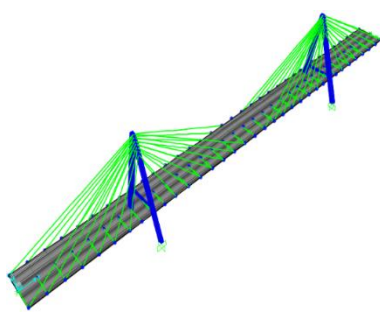
شکل ۶: پل کابلی ایستا با آرایش کابلی بادبزی.



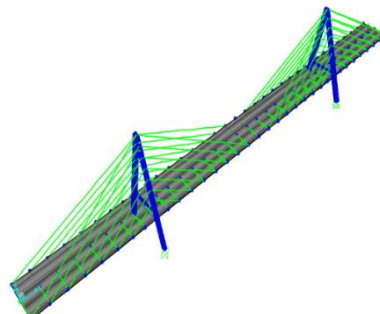
شکل ۷: پل کابلی ایستا با آرایش کابلی موازی.



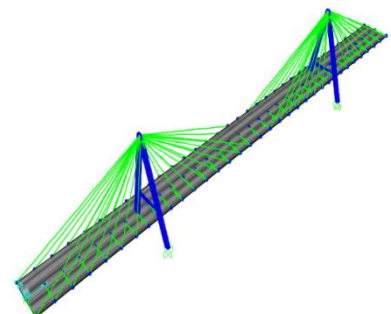
برای درک صحیح رفتار تیرهای اصلی در خمش و کشش و همچنین برای اینکه ممان اینرسی به درستی در تحلیل و طراحی وارد گردد لازم است مدلسازی عرشه به درستی در نرم افزار انجام شود. مدل اجزا محدود در اشکال (۸ تا ۱۱) نشان داده شده است. هر کدام از المانهای عرشه به صورت سگمنت مدلسازی و در دو انتها به کابل متصل می شوند. در این نقاط، از المان Rigid Link به صورت صلب برای اتصال کابل به عرشه استفاده می شود. استفاده از المان Rigid Link به شکل صلب جابجایی همه گره ها را در یک جهت امکان پذیر می کند، در نتیجه باعث نمی شود که درجه آزادی اضافی به مدل تحمیل شود.



آرایش کابل بادبزنی

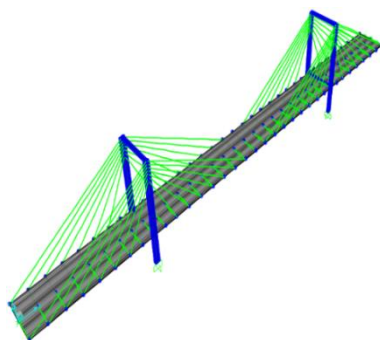


آرایش کابل موازی

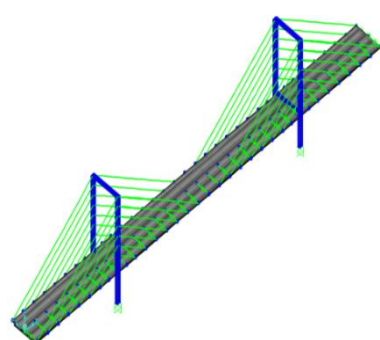


آرایش کابل شعاعی

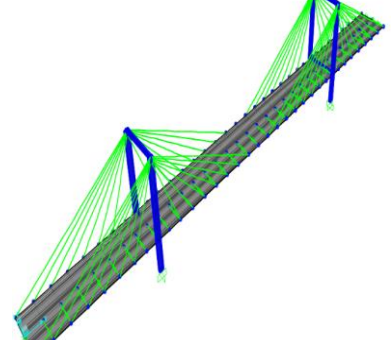
شکل ۸: پل کابلی با پایلون A شکل.



آرایش کابل بادبزنی

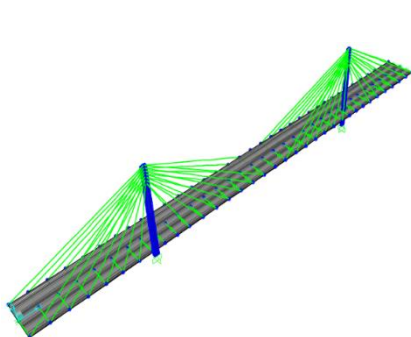


آرایش کابل موازی

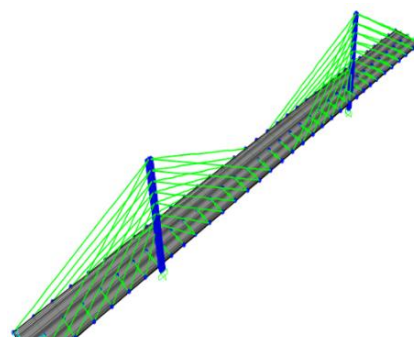


آرایش کابل شعاعی

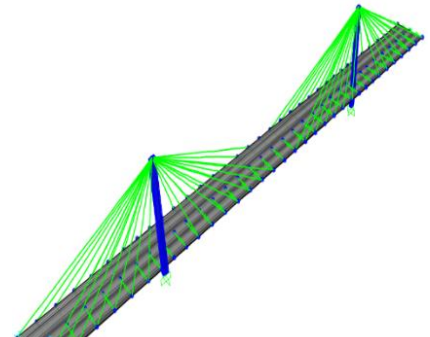
شکل ۹: پل کابلی با پایلون H شکل.



آرایش کابل بادبزنی

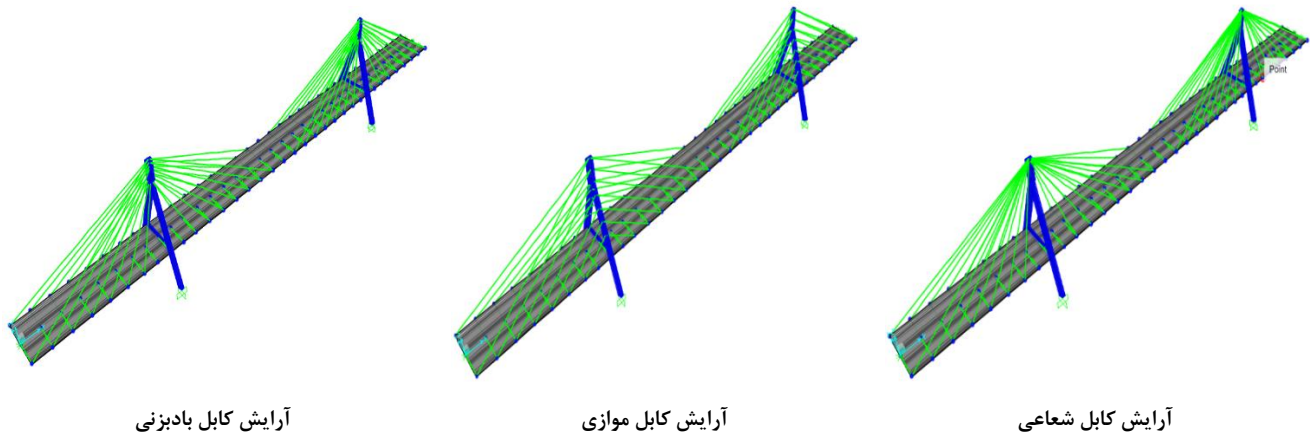


آرایش کابل موازی



آرایش کابل شعاعی

شکل ۱۰: پل کابلی با پایلون تک ستونی شکل.



شکل ۱۱: پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس.

## ۸- پاسخ های پل در برابر زلزله

با توجه به تحلیل های صورت گرفته بر روی مدل های مطالعاتی، حداکثر مقادیر خروجی شامل لنگر خمشی، نیروی برشی، لنگر پیچشی و نیروی محوری تحت اثر زلزله های تعریف شده مورد مقایسه قرار گرفته تا تاثیر حالات شکل پایلون با توجه به شرایط مختلف آرایش کابلی مشخص گردد.

### ۸-۱ لنگر خمشی باکس بتنی عرشه

ماکزیمم لنگر خمشی ایجاد شده در باکس بتنی عرشه در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده به سازه مطابق جدول ۶ می باشد. برای پل کابلی با پایلون A شکل، با افزایش زاویه افقی کابل ها، مقدار لنگر خمشی کاهش و سپس افزایش می یابد که برای آرایش کابلی از نوع بادبزی و تا حدودی حالت شعاعی عملکرد بهتری نسبت به حالت موازی از خود نشان می دهند. برای پل کابلی با پایلون H شکل با افزایش زاویه افقی کابل ها مقدار لنگر خمشی افزایش یافته که آرایش کابلی از نوع موازی عملکرد بهتری دارد. پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس بر خلاف پایلون H شکل با افزایش زاویه کابل ها میزان لنگر کاهش یافته که در آرایش کابلی از نوع شعاعی به حداقل می رسد و برای پایلون تک ستونی شکل آرایش کابلی از نوع شعاعی مناسب می باشد.

جدول ۶: ماکزیمم لنگر خمشی باکس بتنی عرشه در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN.m)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	209081.12	345180.2	215184.7	205265.32
بادبزی $\alpha=38$	195227.54	324234.6	336450.6	290520.33
موازی $\alpha=29$	274660.74	235893.05	482885.2	275866.31

### ۸-۲ نیروی محوری باکس بتنی عرشه

ماکزیمم نیروی محوری ایجاد شده در باکس بتنی عرشه در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده به سازه در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده برای پل کابلی با پایلون A شکل و پایلون تک ستونی، با افزایش زاویه افقی کابل ها مقدار نیروی محوری کاهش و سپس افزایش می یابد که برای آرایش کابلی از نوع بادبزی به حداقل مقدار خود می رسد که این حالت عملکرد بهتری نسبت به دو حالت دیگر از خود نشان می دهد. برای پل کابلی با پایلون H شکل، رفتار کاملا متفاوتی نسبت به پایلون A شکل از خود نشان داده است به طوری که با افزایش زاویه کابل ها نیروی محوری ایجاد شده افزایش و سپس کاهش می یابد که آرایش کابلی از نوع موازی عملکرد

بهتری دارد. نیروی محوری پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس، با افزایش زاویه افزایش می یابد که آرایش کابلی از نوع موازی مناسب تر می باشد.

جدول ۷: ماکزیمم نیروی محوری باکس بتنی عرشه در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	104590.9	132528	168977.95	128845.46
بادبزی $\alpha=38$	88992.93	155403.27	146673.04	115206.8
موازی $\alpha=29$	149732.87	95404.35	115346.81	147063.95

## ۸-۳ نیروی برشی باکس بتنی عرشه

ماکزیمم نیروی برشی ایجاد شده در باکس بتنی عرشه در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده به پل های کابلی مطابق جدول ۸ می باشد. برای پل کابلی با پایلون A شکل، با افزایش زاویه افقی کابل مقدار نیروی برشی کاهش میابد که آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی که تاحدودی مقادیر یکسانی دارند عملکرد بهتر نسبت به حالت موازی دارند. برای پل کابلی با پایلون H با افزایش زاویه کابل مقدار برش افزایش می یابد که مناسب ترین حالت آرایش کابلی حالت موازی می باشد. پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس رابطه زاویه کابل و نیروی برشی غیر مستقیم می باشد به طوری که با افزایش زاویه کابل ها نیروی برشی کاهش می یابد که حالت شعاعی عملکرد بهتری به نسبت دو حالت دیگر دارد همچنین آرایش کابلی از نوع موازی به دلیل اثرات غیر خطی  $P-\Delta$  ضعیف ترین عملکرد در بین سایر پل های موردی از خود نشان داده است و برای پل کابلی با پایلون تک ستونی شکل، افزایش زاویه بر مقدار نیروی برشی تاثیر کمی دارد که هر سه حالت آرایش کابل مناسب می باشند.

جدول ۸: ماکزیمم نیروی برشی باکس بتنی عرشه در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	26450.5	43983.3	28559.37	30505.31
بادبزی $\alpha=38$	25337.82	46418.82	48061.87	35463.5
موازی $\alpha=29$	47920.51	32451.22	100204.34	36966.3

## ۸-۴ لنگر پیچشی باکس بتنی عرشه

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۹ که مربوط به مقدار لنگر پیچشی باکس بتنی عرشه در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده می باشد برای پل کابلی با پایلون H شکل به دلیل متمایل نبودن کابلها به در طرف داخل عرشه، ضعیف ترین عملکرد را از خود نشان داده است. برای پل کابلی با پایلون A شکل، لنگر پیچشی با افزایش زاویه کابل کاهش و سپس افزایش می یابد که آرایش کابلی از نوع موازی عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است. برای پل کابلی میله ای شکل و Y شکل معکوس افزایش زاویه افقی کابل تاثیر زیادی بر روی لنگر پیچشی ندارد در نتیجه هر سه حالت آرایش کابلی تا حدودی عملکرد یکسانی دارند.

جدول ۹: ماکزیمم لنگر پیچشی باکس بتنی عرشه در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN.m)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	2556.36	10271.52	1708.8	4485.66
بادبزی $\alpha=38$	1688.2	14395.63	2091.47	3790.47
موازی $\alpha=29$	8528.53	15942.13	2792.33	4441.5

## ۵-۸ نیروی محوری پایلون

ماکزیمم نیروی محوری ایجاد شده در پایلون در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده مطابق جدول ۱۰ می باشد. برای پل کابلی با پایلون A شکل، با افزایش زاویه افقی کابل ها مقدار نیروی محوری پایلون کاهش می یابد که برای آرایش کابلی از نوع شعاعی به مقدار حداقل می رسد که عملکرد مناسبی نسبت به دو حالت دیگر دارد. برای پل کابلی با پایلون H شکل، با افزایش زاویه کابلها مقدار نیروی محوری افزایش و حالت موازی نسبت به حالت های دیگر مناسب تر می باشد. برای پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس، با افزایش زاویه کابلها مقدار نیروی محوری از حالت موازی به حالت بادبزی به شدت کاهش می یابد و از حالت بادبزی به حالت شعاعی مقدار تغییر نیرو ناچیز می باشد در نتیجه آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی عملکردی مناسب تری نسبت به حالت موازی دارند. برای پل کابلی با پایلون تک ستونی شکل با افزایش زاویه کابل مقدار نیرو افزایش و سپس کاهش می یابد که مقدار نیرو در حالت شعاعی و موازی تقریباً برابر می باشد که از عملکرد مطلوبی برخوردارند.

جدول ۱۰: ماکزیمم نیروی محوری پایلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	29343.72	60275	44314	58753.32
بادبزی $\alpha=38$	33002.45	40190.2	46054.8	73224.35
موازی $\alpha=29$	48269.44	33800.46	102373.2	58369.83

## ۶-۸ جابجایی نوک پایلون

با توجه جدول ۱۱ که مربوط به ماکزیمم جابجایی نوک پایلون می باشد می توان گفت برای پل کابلی با آرایش کابلی از نوع موازی، پایلون Y شکل معکوس، برای پل کابلی با آرایش بادبزی، پایلون A شکل و برای پل کابلی با آرایش شعاعی پایلون تک ستونی عملکرد بهتری نسبت به سایر حالات پل کابلی از خود نشان داده اند و همچنین پل کابلی با پایلون H شکل با آرایش کابلی متفاوت، عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است.

جدول ۱۱: ماکزیمم جابجایی نوک پایلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (cm)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	78.36	83.54	78.55	61.82
بادبزی $\alpha=38$	67.88	92.24	79.5	71.11
موازی $\alpha=29$	75.45	91.11	68.16	79.9

## ۷-۸ لنگر خمشی پایلون

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۱۲ که مربوط به ماکزیمم لنگر خمشی در پایلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها می باشد می توان گفت پل کابلی با پایلون A شکل، بهترین عملکرد را نسبت به سایر پایلون ها از خود نشان داده است. افزایش زاویه کابل ها برای هر یک از پایلون ها عملکرد یکسانی دارد به طوری که با افزایش زاویه مقدار لنگر خمشی هر یک از پایلون ها افزایش و سپس کاهش می یابد و همچنین بهترین آرایش کابلی برای هر یک از پیلونها از نوع شعاعی می باشد.

جدول ۱۲: ماکزیمم لنگر خمشی پایلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN.m)

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	5344.54	65832.25	59327.45	68350.1
بادبزی $\alpha=38$	28132.44	79707.58	84160.14	85866.4
موازی $\alpha=29$	17415.97	67501.98	80090	71420.5

## ۸-۸ نیروی برشی در پیلون

ماکزیمم نیروی برشی پیلون در برابر اعمال شتاب نگاشت ها مطابق جدول ۱۳ می باشد. برای پل کابلی با پیلون A شکل و Y شکل معکوس، با افزایش زاویه کابل ها مقدار نیروی برشی افزایش و سپس کاهش می یابد به طوری که آرایش کابلی از نوع بادبزی عملکرد ضعیفی به نسبت دو حالت دیگر دارد. برای پل کابلی با پیلون H شکل با افزایش زاویه کابل از حالت موازی به حالت بادبزی مقدار برش افزایش و از حالت بادبزی به حالت شعاعی مقدار برش کاهش می یابد. پل کابلی با پیلون تک ستونی، آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی عملکرد بهتری نسبت به حالت موازی دارند.

جدول ۱۳: ماکزیمم نیروی برشی پیلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN)

نوع پیلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	5096.12	20225	8409.57	18574.05
بادبزی $\alpha=38$	8807.95	21163.85	17957.58	18709.6
موازی $\alpha=29$	4372.05	16447.04	7431.44	20695.47

## ۸-۹ لنگر پیچشی پیلون

بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۱۴ که مربوط به ماکزیمم لنگر پیچشی پیلون می باشد. می توان گفت پل کابلی با پیلون تک ستونی با کمترین پیچش ایجاد شده بهترین عملکرد را از خود نشان داده است که تغییر زاویه کابل ها بر مقدار پیچش ایجاد شده تاثیر زیادی ندارد در نتیجه هر سه نوع حالت آرایش کابل عملکرد مطلوبی از خود نشان داده اند. برای پل کابلی با پیلون A شکل و H شکل، با افزایش زاویه کابل از حالت موازی به حالت شعاعی مقدار لنگر پیچشی کاهش می یابد که آرایش کابلی از نوع شعاعی مناسب می باشد. برای پل کابلی با پیلون Y شکل معکوس با افزایش زاویه کابل مقدار پیچش افزایش و سپس از حالت بادبزی به حالت شعاعی کاهش می یابد که آرایش کابلی از نوع شعاعی عملکرد بهتری از خود نشان می دهد.

جدول ۱۴: ماکزیمم لنگر پیچشی پیلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN.m)

نوع پیلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	1114.35	958.47	2179.43	70.1
بادبزی $\alpha=38$	1898.94	1232.3	3574.25	77.1
موازی $\alpha=29$	3424.16	2150.64	3255.6	74.2

## ۸-۱۰ نیروی محوری کابل میانی

مطابق جدول ۱۵ پلهای کابلی با پیلون A شکل، H شکل و تک ستونی مقادیر نیروی محوری تقریباً یکسانی در کابل ایجاد شده است در صورتی که پل کابلی با پیلون Y شکل معکوس، مقدار نیروی زیادی در کابل ایجاد شده است. برای هر چهار پیلون آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی عملکرد یکسان و بهتری دارند.

جدول ۱۵: ماکزیمم نیروی محوری کابل میانی در اثر اعمال شتاب نگاشت ها (kN)

نوع پیلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	2260.45	1968.17	3540.2	1987.3
بادبزی $\alpha=38$	2086	2604.94	3634.64	2148.73
موازی $\alpha=29$	2781.1	3053.71	6590.84	2298.51

## ۸-۱۱ لنگر تکیه گاهی پایلون

ماکزیمم لنگر تکیه گاهی ایجاد شده در اتصال پایلون به زمین در برابر شتاب نگاشت های اعمال شده مطابق جدول ۱۶ می باشد که برای پل کابلی با پایلون A شکل و پایلون تک ستونی، با افزایش زاویه کابل ها مقدار لنگر تکیه گاهی کاهش می یابد که آرایش کابلی از نوع شعاعی عملکرد بهتری نسبت به دیگر حالات آرایش کابلها از خود نشان می دهد. برای پل کابلی با پایلون H شکل، با افزایش زاویه کابلها مقدار لنگر تکیه گاهی افزایش می یابد که آرایش کابلی از نوع موازی عملکرد بهتری دارد. پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس، حالت بادبزی عملکرد ضعیفی نسبت به دو حالت دیگر از خود نشان داده است.

جدول ۱۶: ماکزیمم لنگر تکیه گاهی پایلون در اثر اعمال شتاب نگاشت ها ( $KN.m$ )

نوع پایلون	A	H	Y	I
شعاعی $\alpha=42$	11097190	18271432.4	16805452.4	12359424.2
بادبزی $\alpha=38$	11698973.1	15239218	19616281	14115318.4
موازی $\alpha=29$	16046251.3	11317657.62	16535163	17332845.74

## ۹- نتیجه گیری

با توجه به بررسی های صورت گرفته بر روی پلهای کابلی ایستا با در نظر گرفتن متغیرها و پارامترهای گوناگون و بررسی رفتار آنها به تحریکات شتاب زمین لرزه، می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- از نظر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در باکس بتنی عرشه، برای آرایش کابلی از نوع موازی، پایلون H شکل و برای آرایش کابلی از نوع بادبزی، پایلون A شکل عملکرد بهتری از خود نشان داده اند. همچنین برای آرایش کابلی از نوع شعاعی، پایلون H شکل عملکرد ضعیفی نسبت به دیگر پایلون ها از خود نشان داده است.
- در خصوص نیروی محوری باکس بتنی عرشه، برای پل کابلی با آرایش کابل از نوع موازی، پایلون H شکل و آرایش کابلی از نوع باد بزی و شعاعی، پایلون A شکل عملکرد بهتری از خود نشان داده اند.
- در خصوص لنگر پیچشی باکس بتنی عرشه، تغییر آرایش کابل ها برای پل کابلی با پایلون تک ستونی و Y شکل معکوس تاثیر گذار نمی باشد. در این خصوص پل کابلی با پایلون Y شکل معکوس با انواع آرایش کابل ها و همچنین پل کابلی با پایلون A شکل، با آرایش بادبزی عملکرد مناسبی دارند.
- در خصوص لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در پایلون، پل کابلی با پایلون A شکل نسبت به سایر پایلون ها عملکرد بهتری داشته که در این خصوص آرایش کابلی از نوع موازی و شعاعی مناسب می باشند.
- در مورد نیروی محوری پایلون ها، برای آرایش کابلی از نوع موازی، پایلون H شکل و برای آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی پل کابلی با پایلون A شکل عملکرد خوبی از خود نشان داده اند.
- از نظر لنگر پیچشی پایلون ها، پل کابلی با پایلون تک ستونی بهترین عملکرد را دارد که تغییر آرایش کابل بر روی آن تاثیر کمی دارد و همچنین برای پایلون های H شکل و A شکل با افزایش زاویه کابل ها مقدار پیچش کاهش می یابد.
- در خصوص لنگر تکیه گاهی، برای پل کابلی با آرایش کابل موازی، پایلون H شکل و برای آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی پایلون A شکل عملکرد بهتری از خود نشان داده اند.

با توجه به بحث های صورت گرفته می توان گفت پایلون A شکل و تا حدودی H شکل عملکرد بهتری نسبت به سایر پیلونها دارند که در این خصوص برای آرایش کابلی از نوع شعاعی و بادبزی، پایلون A شکل و برای آرایش کابلی از نوع موازی، پایلون H شکل مناسب می باشند.

## مراجع

- [1] Fleming JF. "Nonlinear static analysis of cable-stayed bridges". Computers & Structures ; 1979, 10:621-635.
- [2] Komatso, Sada. "Dynamic characteristic of cable stayed girder bridges", Department of Civil Engineering. Japanm.1975.
- [3] ZHANG Xin-jun, SUN Bing-na. "Aerodynamic stability of cable-stayed suspension hybrid bridges". Univ SCI. Vol.6, 2004, PP.869-874.
- [4] Abdel-Gaffar, AlyS.Nazmy. "3-D Nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges", Journal of structural Engineering, USA.Vol. 117, 1991, PP. 4343-4576.
- [5] Nazmy-AlyS, Ahmed M, Abdel-Ghaffar. "Three-dimensional nonlinear static analysis of cable stayed bridges". Computer and structures, USA: Vol. 34 n2, 1990, PP. 257-271.
- [6] N.Hajdin, G.T.Michaltsos, T.G.Konstantakopoulos. "About equivalent modulus of elasticity of cable-stayed bridge", Architecture and Civil Engineering. Vol. 1, No 5, 1998 , PP. 569 –575.
- [7] Raid Karoumi. "Modeling of cable-stayed bridges for analysis of traffic induced vibration", Department of Structural Engineering Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, 2000.
- [8] D.W.Chen, F.T.K.Au, L.G. Tham, and P.K.K.Lee, "Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method", Computers and Structures, vol. 74, no. 1, 2000, pp. 1–9.
- [9] N.D.Shah and Dr.J.A.Desai, "Nonlinear aerostatic analysis of cable-stayed bridge considering IRC vehicular loading", proceeding of the 5th national conference on wind ENGINEERING svnit. 2009.
- [10] Said M.Allam, TK Datta, "seismic behavior of cable-stayed bridge under multi component random ground motion", Engineering structures.1999.
- [11] D.Bruno, F.Greoo, P.Lonetti, "Dynamic impact analysis of long span cable-stayed bridge under moving loads", Engineering structures, 2008.
- [12] Nazmy-AlyS, Ahmed M, Abdel-Ghaffar. "Effect of grand motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges". Earthquake engineering & structural Dynamic,USA, 1992, PP. 1-20
- [13] Thomas Blesson B. and S. P.Thakkar, "Parametric study of shapes of pylon for cable-stayed bridge", Journal of Engineering and Technology, VOL.2, 2011, NO.1.
- [14] Jayaraman HB, Knudson WC. "A curved element for the analysis of cable structures". J Comput Struct; 14(3-4):325–333.1981.
- [15] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۳، ۱۳۹۳
- [16] Martins A.M.B, L.M.C Simoes, J.H.J.O Negroao. "Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities", Journal of computers and structures, 2015.