1 St. International Conference on new achievements in Science & Technology
24th August 2017
اولین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین در علوم و تکنولوژی
۲ شهریور ماه ۱۳۹۶ – تهران

تجزیه و تحلیل رفتار پل‌های کابلی تحت تاثیر پارامتر ارتفاع برج

۱ علی طبرسا ۲ محمد قدرتی

۱ کارشناس ارشد مهندسی عمران – سازه
Eng_Tabarsa@Yahoo.com
۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران – سازه
m.m.godrati@Gmail.com

چکیده

پل های کابلی از جمله سازه‌های پیشرفته و با تکنولوژی طرح و ساخت بالا می باشند. با توجه به پیشرفت سریع ابرسازه ها و ایجاد روش های نوین در ساخت و طراحی، لازم است در این زمینه مطالعه و بررسی بیشتری صورت گیرد. در این مقاله به بررسی رفتار پل های کابلی تحت تاثیر پارامتر ارتفاع برج با استفاده از نرمافزار SAP2000 می پردازیم. ابتدا مدل اولیه به روش تحلیل تاریخچه زمانی مورد تحلیل قرار گرفته و سپس به آنالیز پارامتر مورد نظر پرداخته می‌شود. هرچند مطالعه و بررسی دقیق و کامل این نوع از سازه ها نیاز به هزینه و زمان و نیز آزمایشگاه های مجهز دارد. با این وجود، در این مقاله مطالعات تحلیلی با استفاده از نرم افزار مناسب انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: *تحلیل، پل کابلی، برج، پارامتر ارتفاع*

1St. International Conference on new achievements in Science & Technology
24th August 2017
اولین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین در علوم و تکنولوژی
۲ شهریور ماه ۱۳۹۶ – تهران

Analysis of Cable Bridge Under the influence of tower height parameter

Ali, Tabarsa [1]; Mohammad, Qodrati [2]

1-Master of Civil Engineering – Structures
Email: Eng_Tabarsa@yahoo.com
2-Master of Civil Engineering – Structures
Email: m.m.Qodrati@Gmail.com

Abstract:
Cable bridge, including advanced constructs are high-tech design and construction. Due to the rapid progress in Megastructures and the development of new methods in construction and design, it is necessary in this field of study and further investigation is necessary. In this paper, we investigate the behavior of the affected cable bridge tower height parameters by using the software SAP2000. At first, the basic model analyzed by time history analysis, and then the analysis parameters to will be discussed. Although that the accurate and complete study of this type of structure requires time and cost, as well-equipped laboratories. However, in this paper, analytical studies have been conducted using appropriate software.

Keywords: *Analysis, Cable Bridge, tower, height parameter*

۱.بیان مسئله

پل های کابلی از نظر استاتیکی، سازه هایی با درجات نامعینی بالا می باشند. عملکرد سازه ای این پل ها به طور قابل ملاحظه ای متاثر از توزیع نیرو بین سیستم کابلی، عرشه، پایلون و ارتفاع برج ها می باشد. در این مقاله به بررسی رفتار پل های کابلی تحت تاثیر پارامتر ارتفاع برج با استفاده از نرم افزار SAP2000 می پردازیم و در انتها نتایج بدست آمده بصورت گراف توضیح داده می‌شود. مباحث مطرح شده، به‌صورت مطالعه‌ای و نظام‌مند، طرحی نوین در حوزه علمی موردنظر ارائه می‌دهد، که این موضوع، باهدف پیشبرد مرزهای علم و فناوری، می‌تواند زمینه‌ساز موضوعات تحقیقاتی جدید در آینده ای نزدیک شود. مخاطبین اصلی این مقاله، اساتید دانشگاه‌ها، دانشجویان دوره دکتری و کارشناسی ارشد، پژوهشگران شاغل در مراکز علمی، تحقیقاتی و تولیدی هستند.

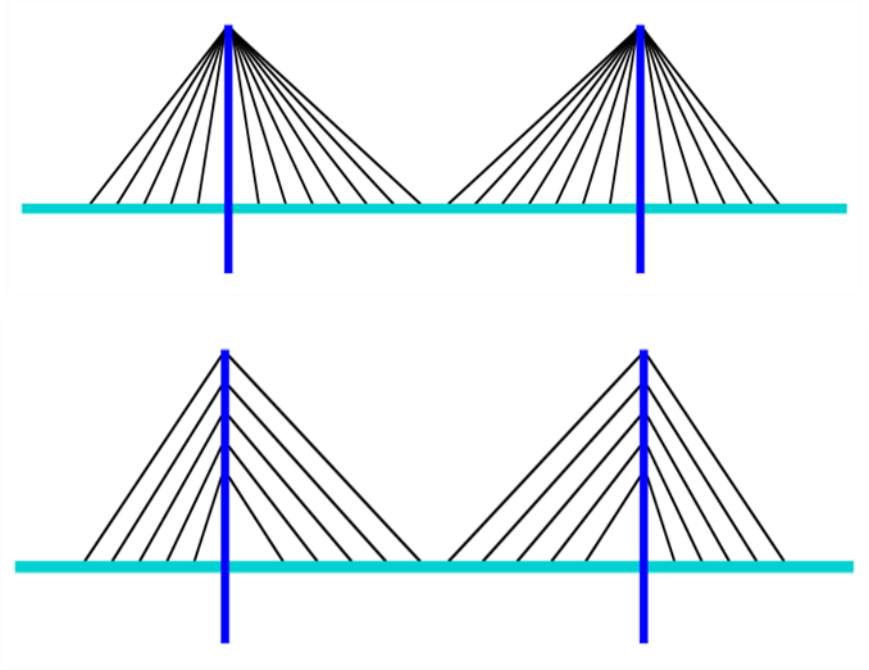
۲. مقدمه

۱,۲ تعریف پل کابلی

یک پل کابلی نوعی،یک تیر حمال(عرشه پل) پیوسته با یکیا چند برج بنا شده بالای پایه‌های پل در وسط دهانه‌است. از این برج‌ها، کابل‌ها به صورت اریب به سمت پایین (معمولاً هر دو طرف) کشیده شده و تیر حمال(عرشه پل) را نگه می‌دارد. کابل‌های فولادی بی نهایت قوی و در عین حال بسیار انعطاف پذیر هستند. کابل‌ها بسیار مقرون به صرفه می‌باشند چون سبب ساخت سازه‌ای سبکتر و باریکتر شده که در عین حال قادر به پل زدن بین مصافت‌های بیشتری است.اگرچه تنها تعداد کمی از آن‌ها برای نگه داشتن کل پل قوی هستند، انعطاف پذیریشان آن‌ها را در مقابل نیروهایی که به ندرت در نظر گرفته می‌شوند مانند باد؛ ضعیف می‌نماید (Dorka, & ,Abdel Raheem, Hayashikawa۲۰۱۱). وزن سبکتر پل یک وضع نامساعد در بادهای سهمگین و یک مزیت در مقابل زلزله محسوب می‌شود. خصوصیات منحصر به فرد کابل‌ها و به طور کلی سازه، طراحی پل را بسیار پیچیده می‌نماید. برای دهانه‌های طولانی تر، جایی که باد و نوسانات باید مورد توجه قرار گیرند؛ محاسبات بی نهایت پیچیده‌اند و عملاً بدون کمک کامپیوتر و آنالیز کامپیوتری غیر ممکن می‌باشند. اتصالات، برج‌ها، تیرهای حمال و مسیر کابل‌ها سازه‌های پیچیده‌ای هستند که مستلزم ساخت دقیق می‌باشند. (Abdel– ,Ghaffar۱۹۹۱)

۲,۲ طبقه‌بندی پل های کابلی

طبقه‌بندی واضحی برای پل های کابلی وجود ندارد. به هر حال آن‌ها می‌توانند توسط تعداد دهانه‌ها، برج‌ها و کابل‌ها و همچنین نوع تیرهای حمال از یکدیگر تمیز داده شوند. تنوع بسیاری در تعداد و نوع برج‌ها و همچنین تعداد و چینش کابل‌ها وجود دارد. برج‌های نوعی به صورت تکی، دوتایی، دروازه‌ای و یا حتی برج‌هایA شکل استفاده شده‌اند. علاوه بر این چینش کابل‌ها به طور عمده‌ای متفاوت می‌باشند. بعضی اقسام دارای چینش تکی، چنگی(موازی)، پنکه ای(شعاعی) و ستاره‌ای هستند. در بعضی موارد تنها کابل‌هاییک طرف برج به عرشه وصل می‌شوند و طرف دیگر رویبک فندانسیونیا وزنه برابری لنگر می‌اندازند(Villani, & ,Calvi, Sullivan۲۰۱۰).



شکل ۱ آرایش شعاعی و موازی در پل های کابلی

۳. مدل سازی

۱،۳ ویژگی عمومی

برای تعریف و مدل سازی یک پل جمع آوری اطلاعات زیر ضروری است:

- طول کل پل
- تعداد دهانه ها و طول هر یک از آنها
- عرض رو سازه
- مقطع رو سازه
- تعداد و ارتفاع هر یک از ستون های پایه
- مقطع ستون های پایه
- شرایط گیر داری ابتدا و انتهای ستون پایه
- هندسه تیر سر ستون اعم از عرض، طول و عمق آن
- نحوه ی اتصال رو سازه به تیر سر ستون
- هندسه کوله ها و شرایط اتصال رو سازه به کوله ها (شرایط گیر داری تکیه گاه های طرفین رو سازه)

از طرفی اطلاع از رفتار مصالح مورد استفاده در اجزاء پل نیز به شرح ضروریست:

- خواص بتن مورد استفاده در رو سازه
- خواص بتن و نیز فولاد مسلح کننده مورد استفاده در ستون های پایه
- جزئیات آرماتورهای مقطع ستون های پایه و نیز تیر سر ستون
- شرایط خاک ساخت گاه و اندر کنش آن با سازه
- نوع و مساحت اتصالات بین رو سازه و زیر سازه

۲,۳ سیستم مختصات

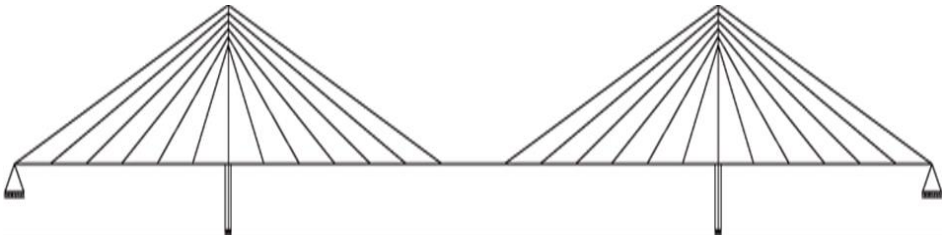
در این مقاله مختصات به قرار زیر بکار رفته است.

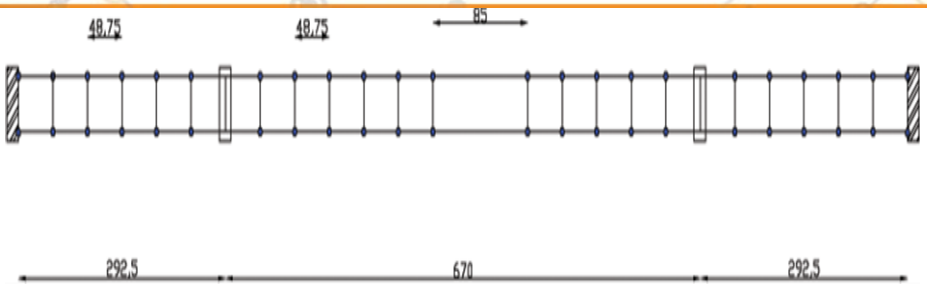
برای جهات کلی جهتXدر راستای طولی پل، جهت Yدر راستای عرضی و جهتZ در راستای قائم در نظر گرفته شده است و برای تحلیل عناصر از یک مختصات محلی با نامگذاری z،y،x استفاده است. جهت xدر راستای محوری عضو و از گره ابتدای به گره انتهایی آن امتداد دارد. نیروها و تغییر مکان‌های برشی نیز در دو راستای عمود yو z مطابق تعریف شده‌اند.

۳,۳ معرفی مدل فیزیکی واقعی از پل کابلی

پل کابلی ایستایی که در این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته پلی است که به صورت الگو در چندین مقاله معتبر داخلی و خارجی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.از جمله می توان به مقاله های THREE-DIMENSIONAL NONLINEAR STATIC ANALYSISOF CABLE-STAYED BRIDGES و بررسی پارامتری رفتارغیر خطی لرزه ای پل کابلی ایستای دهانه برزگ باعرشه جعبه ای اشاره نمود. (Nazmy, & Abdel-Ghaffar, ۱۹۹۱b)

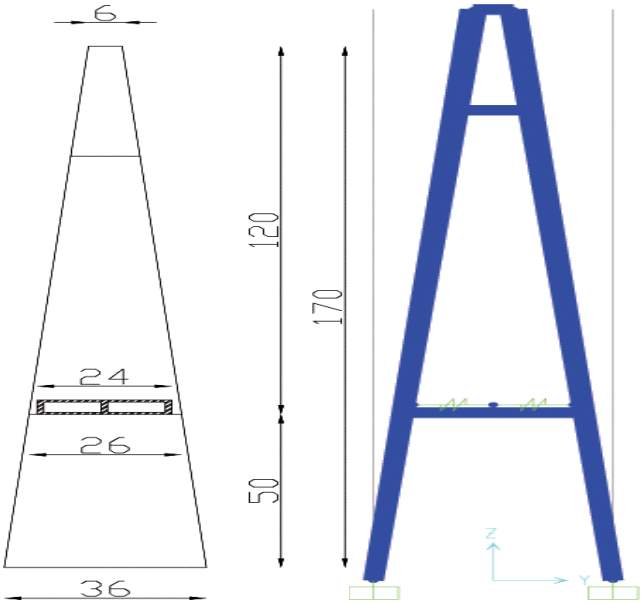
این پل کابلی ایستای مورد مطالعه پلی است از جنس بتن بطول کلی ۱۲۵۵ متر، که دارای یک دهانه اصلی بطول ۶۷۰ متر و دو دهانه کناری هر یک بطول ۲۹۲,۵ متر می باشد.(**شکل ۲**) (**کشته گر & میر, ۱۳۹۱**)





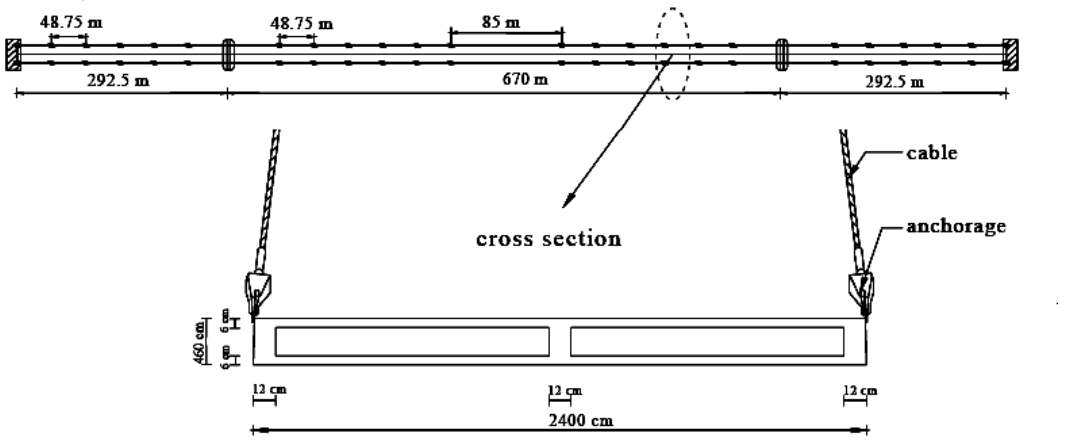
شکل ۲ مشخصات دهانه های پل کابلی (کشته گر & میر، ۱۳۹۱)

این پل دارای دو برج نگه دارنده به بصورت A شکل بوده که ارتفاع کلی آناز روی شالوده۱۷۰متر و ارتفاع قایقرانی (فاصله عرشه از روی رودخانه) برابر ۵۰ متر بوده و جنس آنها از بتن می باشد. (شکل ۳) (**Nazmy, & Abdel-Ghaffar b۱۹۹۱**)



شکل ۳ مشخصات برج های پل کابلی

این پل دارای عرشه ای جعبه ای با گوشه های قائم به ارتفاع ۴,۵ متر و عرض ۲۴ متر و ضخامت ۶۰ سانتی متر از جنس بتن طراحی شده است.طول هر یک از قطعه های عرشه برابر با ۱۸ متر است.(شکل)

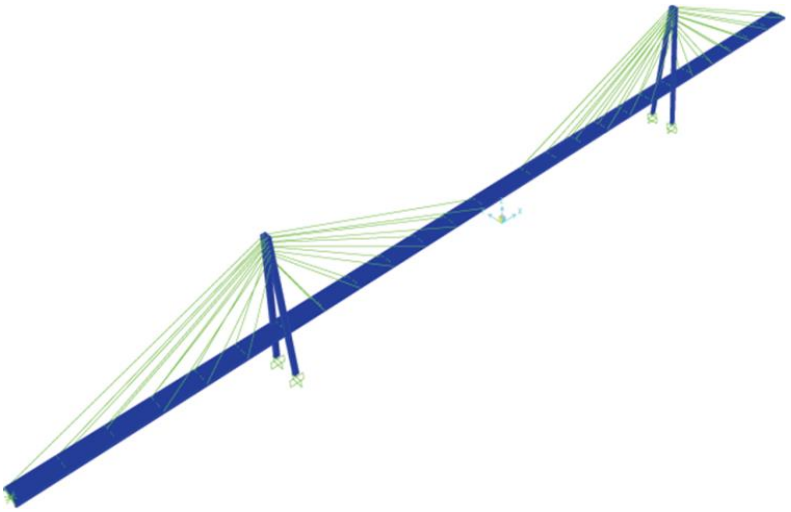


شکل ۴:جزئیات عرشه پل کابلی

عرشه این پل با استفاده از ۱۲ عدد کابل در دو دهنه کناری و ۲۴ عدد کابل در دهانه وسط به برج ها متصل شده اند. آرایش کابل ها در این پل به صورت باد بزنی وفاصله کابها در جهت طول پل برابر ۴۸,۷۵ متر و در جهت عرض پل برابر ۲۴ متر می باشد. سایر مشخصات مصالح به کار برده شده در این پل به همراه خصوصیات الاستیک آنها در جدول ۱: مشخصات مصالح پل **کابلی** ارائه گردیده است. (Nazmy, & Abdel-Ghaffar ۱۹۹۱b)

جدول ۱: مشخصات مصالح پل کابلی (کشته گر & میر, ۱۳۹۱)

چگالی $(\frac{Kg}{M^2})$	مساحت مقطع M^2	جنس مصالح	ضریب پواسون	مدول ارتجاعی $(\frac{N}{M^2})$	المان
2500	۲۰/۶۲ الی ۱۵/۷۵	بتن	۰/۲۵	$1\times 10^{10}/3$	برج
۲۵۰۰	۶۹/۳۶	بتن	۰/۲۵	$1\times 10^{10}/3$	عرشه
۱۱۲۰۰	۰/۰۴۲۳	فولاد	۰/۳	$2\times 10^{11}/00$	کابل



شکل ۵ پل کابلی مدل شده در نرم افزار sap2000

۴. تحلیل

۱,۴ مقدمه

در این قسمت ابتدا نتایج تحلیل مدل اولیه نرم افزاری و سپس نتایج مدل مرجع نشان داده می شود که در آخر جهت صحت سنجی اولیه با هم مقایسه می شوند سپس با اعمال تغییرات در هندسه سازه،(تغییر ارتفاع برج) اثرات آن را بر مشخصات سازه می سنجیم.

۲,۴ نتایج مدل اولیه در نرم افزار Sap2000

پس از مدل سازی پل بر اساس مشخصات ارائه شده در مقاله مرجع و بارگزاری های لازم در نرم افزار Sap2000، پل مذکور به روش مودال تحلیل گردید که درجدول نتایج زمان تناوب سازه بهمراه میزان مشارکت جرمی در ۱۵ مد اولیه سازه ارائه شده است.

جدول ۲:نتایج تحلیل مودال پل کابلی مدل شده در نرم افزار Sap2000

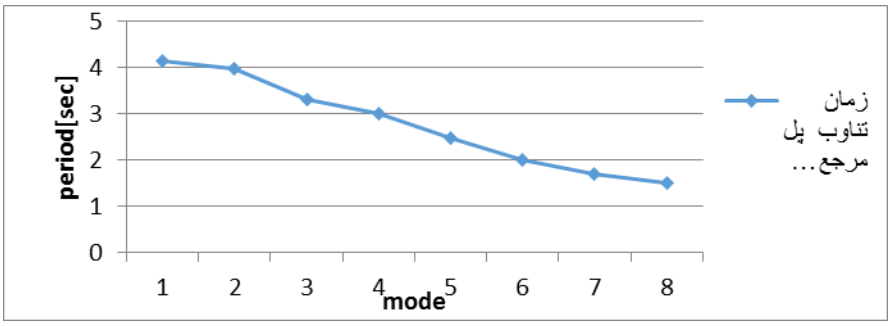
مد های نوسان	زمان تناوب سازه (ثانیه)	مقادیر مشارکت جرمی		
		UX	UY	UZ
1	3.59147	0	0.762	0
2	3.515218	0	0	0
3	3.497988	0.681	0	0
4	2.808807	0	0.000013	0.013
5	2.592291	0	0.085	0
6	1.86755	0	0	0
7	1.535875	0	0.127	0
8	1.465441	0.132	0	0
9	1.183928	0	0	0.044
10	0.820451	0.007091	0	0
11	0.773162	0	0	0
12	0.767923	0	0	0
13	0.72825	0	0	0.091
14	0.726296	0	0	0
15	0.662033	0.008029	0	0

۳,۴ صحت سنجی اولیه

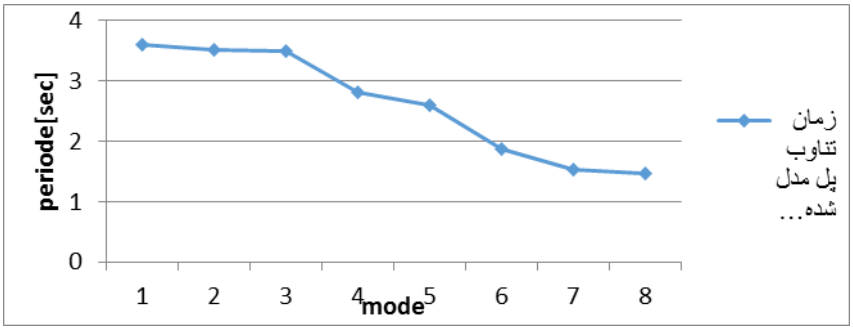
برای صحت سنجی نتایج فوق و اطمینان از صحت و سوق آنها، نتایج تحلیل مودال با نتایج استخراج شده از مقاله مرجع مقایسه شده و در جدول زیر و شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شده است. مشخص است که فرکانس های طبیعی و زمان تناوب پل شبیه سازی شده در نرم افزار مورد استفاده، نزدیک به نتایج حاصل از مرجع نتیجه شده است.

جدول ۳: مقایسه زمان تناوب پل مرجع با پل مدل شده

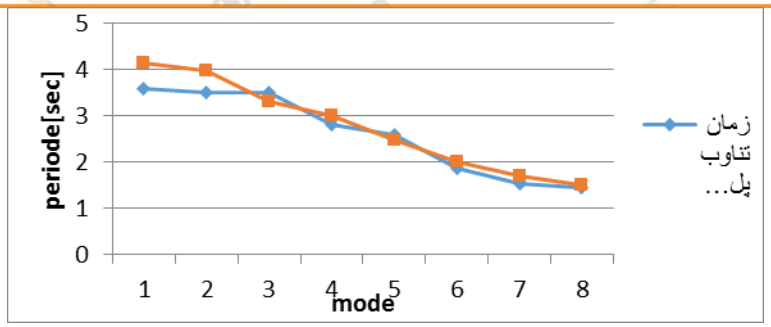
درصد اختلاف	مقدار اختلاف (ثانیه)	نتایج مرجع	نتایج شبیه سازی	
		زمان تناوب (ثانیه)	زمان تناوب (ثانیه)	شماره مد
13	0.56083	4.1523	3.59147	1
11	0.453682	3.9689	3.515218	2
-5.2	-0.174688	3.3233	3.497988	3
6.5	0.197193	3.006	2.808807	4
-3.9	-0.098191	2.4941	2.592291	5
6.6	0.13365	2.0012	1.86755	6
9.4	0.160245	1.69612	1.535875	7
2.9	0.045218	1.510659	1.465441	8



شکل ۶: زمان تناوب ۸ مد اول پل کابلی مرجع



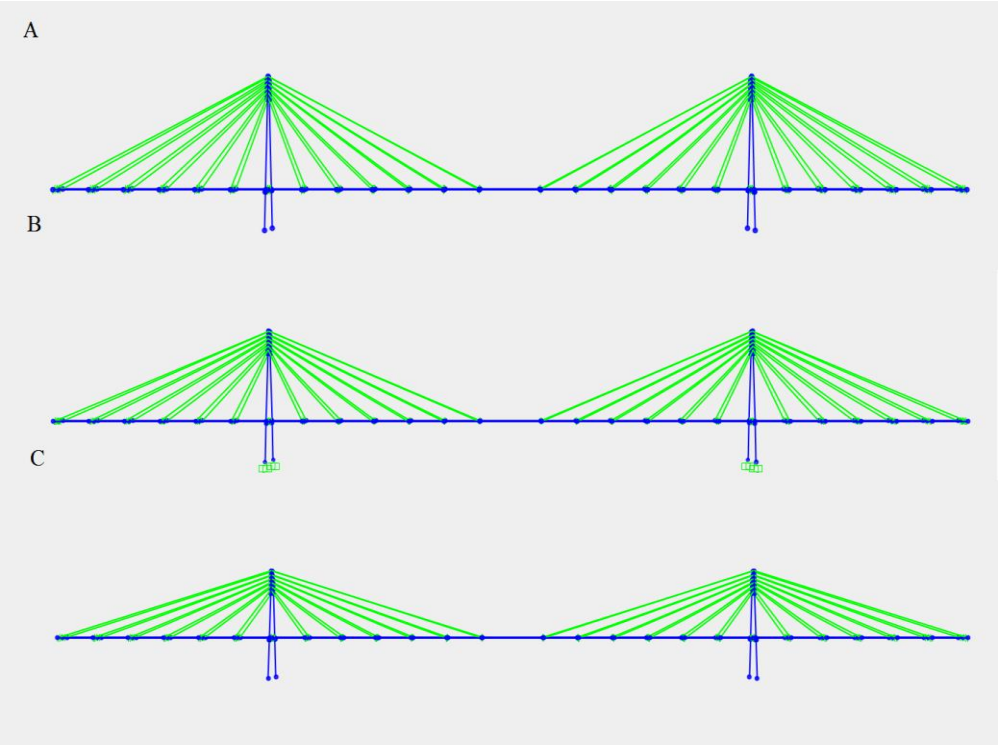
شکل ۷ : زمان تناوب ۸ مد اول پل کابلی مدل شده



شکل ۸ : مقایسه ۸ مد اول پل مرجع و مدل شده در نرم افزار Sap 2000

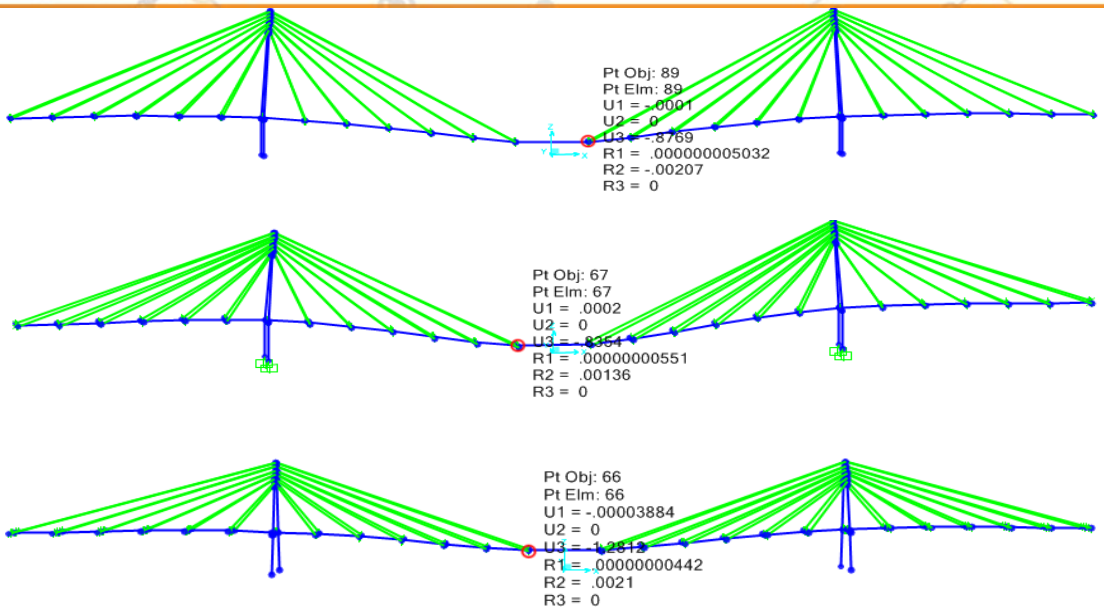
۴,۴ پل های کابلی با تغییر ارتفاع برج ها

در این قسمت به منظور بررسی تاثیر تغییر ارتفاع برجهای پل بر مشخصه‌های مودی و رفتار دینامیکی پل، از سه حالت سازه-ای با ارتفاع‌های مختلف برج استفاده می‌شود. در این حالت با گام‌های ۳۰متری ارتفاع برج افزایش یافته و ارتفاع برجها از ۱۴۰ به ۱۷۰ افزایش یافته و به ۲۰۰ می‌رسد. در شکل نمایی از هر سه مدل آورده شده است. در شکل تغییرمکان عرشه تحت بار مرده در هر سه حالت نشان داده شده است. منظور از این ارتفاع، فاصله از برتکیه‌گاه تا نوک برج است.



شکل ۹:تغییر ارتفاع در برج‌های پل به ترتیب ۲۰۰، ۱۷۰ و ۱۴۰متر

در ادامه به بررسی خصوصیات مدی این سه مدل پرداخته خواهد شد.



شکل ۱۰: تغییرمکان عرشه تحت بار مرده برای پل ها با ارتفاع برج ۱۴۰،۱۷۰ و۲۰۰ متر

همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع برج تغییرمکان وسط دهانه افزایش یافته است

جدول ۴ : مقدار تغییرمکان عرشه تحت بار مرده برای پل ها با ارتفاع برج ۱۴۰،۱۷۰ و۲۰۰ متر

پارامتر مورد نظر	پل با ارتفاع برج ۱۴۰ متر	پل با ارتفاع برج ۱۷۰ متر	پل با ارتفاع برج ۲۰۰ متر
تغییر مکان وسط عرشه تحت بار مرده	-1.28 cm	-0.84 cm	-0.88 cm

۴،۵ نتایج تحلیل مودال پل های کابلی با تغییر ارتفاع برج ها

بعد از انجام تحلیل مودال و استخراج نتایج این سه پل، در ادامه مشخصات ارتعاشی هر سه پل در جدول زیر ارائه شده است. همچنین نیروی کششی در کابل‌ها، شتاب مطلق عرشه و جابجایی عرشه نیز در قسمت‌های بعدی بررسی خواهد شد. همانطور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود زمان تناوب پل با تغییر ارتفاع برج در هر دو حالت با فزایش روبرو بوده که این افزایش در پل کابلی با ارتفاع برج ۱۴۰ متر در مد های اول چشمگیر تر می باشد.

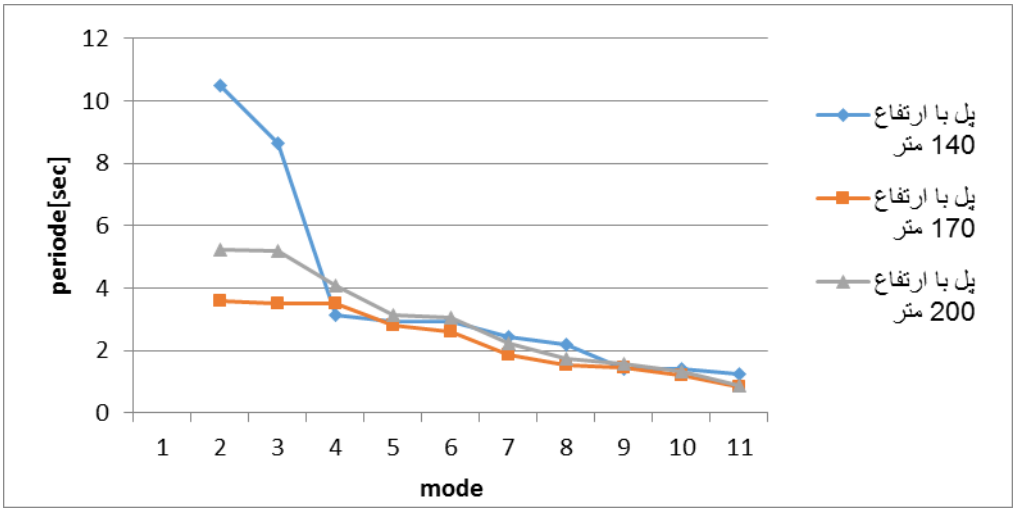
جدول ۵:مشخصات ارتعاشی برای پل های کابلی با ارتفاع متفاوت در برج ها

	مد نوسان	زمان تناوب سازه	ضریب مشارکت جرمی		
			UX	UY	UZ
پل با ارتفاع برج ۱۴۰ متر	۱	10.503589	0.774	0	0
	۲	8.63071	0	0.191	0
	۳	3.15576	0	0	0.02
	۴	2.946847	0	0	0
	۵	2.946168	0	0.741	0
	۶	2.430476	0	0	0
	۷	2.175269	0.055	0	0
	۸	1.417403	0	0	0.045
	۹	1.397612	0	0.012	0
	۱۰	1.255128	0	0.024	0

	مد نوسان	زمان تناوب سازه	ضریب مشارکت جرمی		
			UX	UY	UZ
پل با ارتفاع ۱۷۰ متر	۱	3.59147	0	0.762	0
	۲	3.515218	0	0	0
	۳	3.497988	0.681	0	0
	۴	2.808807	0	0	0.013
	۵	2.592291	0	0.085	0
	۶	1.86755	0	0	0
	۷	1.535875	0	0.127	0
	۸	1.465441	0.132	0	0
	۹	1.183928	0	0	0.044
	۱۰	0.820451	0.007	0	0

	مد نوسان	زمان تناوب سازه	ضریب مشارکت جرمی		
			UX	UY	UZ
پل با ارتفاع ۲۰۰ متر	۱	5.226969	0	0.641	0

۲	5.181881	0	0	0
۳	4.060726	0.81	0	0
۴	3.139263	0	0	0.01
۵	3.055357	0	0.219	0
۶	2.225	0	0	0
۷	1.752833	0	0.117	0
۸	1.571955	0.149	0	0
۹	1.305562	0	0	0.046
۱۰	0.872286	0.011	0	0



شکل ۱۱ مقایسه زمان تناوب پل ها با ارتفاع برج ۱۴۰،۱۷۰ و۲۰۰ متر۵

۵. نتیجه گیری

* با کاهش ارتفاع برج پل، شتاب در سه جهت کاهش داشته وبا افزایش ارتفاع برج پل تغییرات شتاب بسیار جزئی می باشد.

* بیشترین تاثیر نیروی زلزله در راستای X با افزایش ارتفاع برج اتفاق می افتد.

* بیشترین زمان تناوب در پل های کابلی به پل با ارتفاع برج ۱۴۰ متر تعلق دارد و تغییر ارتفاع، تاثیر زیادی بر زمان تناوب سازه دارد.

* کاهش در ارتفاع برج، مقدار خیز وسط دهانه را افزایش می دهد.

۶. مراجع

کشته گر, ب., & میر, م. (۱۳۹۱). بررسی پارامتری رفتار غیر خطی لرز های پل کابلی ایستایدهانه بزرگ با عرشه جعبه ای. نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد.

Abdel – Ghaffar, A. (1991). Cable-Stayed Bridges under Seismic Action. Yokohama, Japan.

Abdel Raheem, S., Hayashikawa, T., & Dorka, U. (2011). Ground Motion Spatial Variability Effects on Seismic Response Control of Cable-Stayed Bridges. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 10: 37 - 39.

Abdel-Ghaffar, A., & Nazmy, A. (1991b). 3-D nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges. structural engineering.

Abdel-Ghaffar, A., & Nazmy, A. (1991b). 3-D nonlinear seismic behavior of cable-stayed bridges. structural engineering.

Calvi, G., Sullivan, T., & Villani, A. (2010). Conceptual Seismic Design of Cable-Stayed Bridges. Earthquake Engineering, Vol. 14: 1139 – 1171.