تحلیل خطی وغیرخطی پلهای کابلی ایستا به‌کمک سری‌های‌فوریه

مجتبی ازهری* - رسول میرقادری**

خلاصه

پلهای کابلی ایستا یکی ازسیستم‌های سازه‌های متداول برای پوشانیدن دهانه‌های ۴۰۰-۲۰۰ مترمی‌باشند. کابلها دراین پلها که نقش عمده درظرفیت باربری آنها دارندمقادیرعمده‌ای ازبارقائم را ازروی عرشه‌پل گرفته‌وبه‌برج انتقال می‌دهند. سختی کابلها درطول مسیربارگذاری متغیربوده‌وبانیروی محوری وطول آن بطورغیرخطی متناسب می‌باشندوباعث رفتارغیرخطی سیستم‌خواهدگردید. دراین‌مقاله با استفاده‌ازسری‌های فوریه‌ومی‌نیمم‌کردن انرژی پتانسیل کل تحلیل خطی وغیرخطی این پلها انجام‌گرفته‌وآنالیزکامپیوتری بصورت دوروش "همگرایی تکراری" و "سختی نرمی" انجام‌گرفته‌ونتایج وسرعت همگرایی دو روش بایکدیگرمقایسه‌گردیده‌است. هم‌چنین نحوه قرار گرفتن کابلهاکه‌تفاوتهای فاحشی دررفتارخطی وغیرخطی ایجادکرده‌و نتیجتا "تاثیرقابل ملاحظه‌ای روی باربری پل خواهدگذاشت موردبررسی قرارخواهدگرفت.

مقدمه

درپلهای کابلی ایستاوپلهای معلق که هردوبرای پوشانیدن دهانه‌های بیش‌از ۲۰۰ مترکاربرددارند [۱] ونقش‌اصلی انتقال بارهای ناشی ازوزن مرده‌وبارترافیک راکابلها بعهده‌دارند. کابلها

---

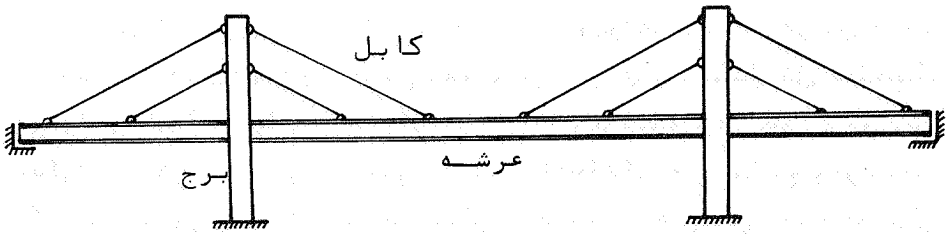
* مربی دانشکده‌عمران دانشگاه‌صنعتی‌اصفهان
** استادیار دانشکده‌عمران دانشگاه‌صنعتی‌اصفهان

نشریه تحقیقاتی فنی-مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۷، تابستان ۶۸

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

درسیستم‌پلهای معلق نقریبا " ،عمده‌بارقائم‌به‌نحوموثری ازروی عرشه پل برداشته‌و به برجها وتکیه‌گاههای انتهایی طرفین پل انتقال می‌دهد ، درصورتیکه درپلهای کابلی ایستا بعلت تورب کابلها ، مولفه قائم‌نیروی کابلها سبب خنثی کردن بارقائم‌روی پل می‌شودو مولفه افقی آن عرشه‌پل را تحت نیروی محوری فشاری قرارخواهدداد که مسائل ناپایداری عرشه‌را به‌همراه‌خواهدداشت [۲] .

اجزاء اصلی سیستم‌پل کابلی ایستا مطابق شکل عبارتنداز :

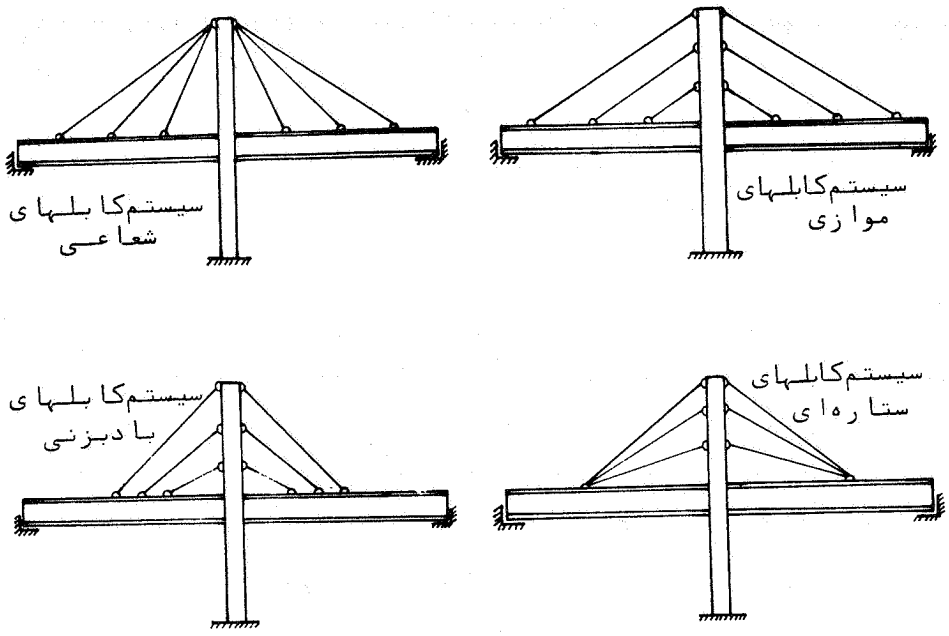


شکل (۱)

- عرشه‌تقویت شده‌پل (Stiffened Girder) که معمولا" ازتیرهای فولادی ساخته‌شده ازورق با مقطع به‌شکل I و T ویا مقطع‌قوطی شکل بسته ، تیرهای فولادی خرپایی شکل ، تیرهای بتنی مسلح معمولی و یا تیرهای بتنی مسلح پیش‌تنیده ساخته‌می‌شوند . بارهای مرده‌وزنده ازروی این عرشه‌توسط عملکردخمشی آن به‌کابلها وبرجها منتقل می‌گردد . اتصال عرشه به‌برجها بصورت ساده‌بوده‌و مستقیما "لنگرخمشی عرشه‌واردبرجها نمی‌شود .
- کابلهای مورب (Inclined cables) که درفواصل مشخص‌بارترافیک مرده‌روی عرشه‌پل را با عملکردکششی خودگرفته‌وبه‌برجها منتقل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

می‌نماید. ترتیب قرارگرفتن کابلها نسبت به‌برج وعرشه به‌روشهای مختلفی درشکل زیرنشان داده‌شده‌است [۱] و [۳].



شکل (۲)

– برجها (Pilons یا Towers) که‌بارهای منتقل شده‌توسط کابلها و عرشه‌را به‌صورت عملکردفشاری به‌زمین انتقال می‌دهد. برجها ازبتن مسلح ویا فولاد A شکل ، H شکل ویا برجهای تکی باسختی‌محوری‌نسبتا" زیادساخته می‌شود [۱] و [۳].

رفتار غیرخطی کابلها :

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

درکابلها ، چنانچه دروضعیتی بجز وضعیت قائم تحت بارگذاری قرارگیرند مقداری خیزبعلت وزن کابل خواهیم داشت ومقداری از نیروی کششی محوری داخل کابل ، صرف جبران خیزموجودمی‌گردد . بدیهی است که هراندازه که تورب کابلها کمترباشدکابلها به نحوموثرتری دربار بری سازه شرکت خواهندکرد . چنانچه مدول الاستیسته کابل درروضعیت قائم E_e باشد دروضعیت مورب مدول الاستیسته کابل ، E_i ، به‌صورت رابطه زیرخواهدبود [۳] و [۴] :

$$E_i = \frac{E_e}{1+\frac{(\gamma l \cos\alpha)^2}{12\sigma^3} E_e} \qquad (۱)$$

دررابطه‌فوق ، γ وزن مخصوص کابل ، l طول کابل ، α زاویه کابل با افق و σ تنش کششی موجوددرکابل باشد . مشاهده می‌شودکه صلبیت کابلها تنها تابع مشخصات هندسی آن نبوده بلکه بستگی به نیروی واردبر آن آنهم بصورت غیرخطی می‌باشد . مطلب فوق باعث می‌گرددکه رفتار پلهای کابلی ایستا بصورت غیرخطی بوده وباتوجه به اینکه سختی کابل، $K = \frac{E_i A}{l}$ وتنش موجوددرآن، $\sigma = E_i \frac{\Delta l}{l}$ ، بطوردرهم بهم دیگر وابسته هستندبنابراین روش حل تکراری مناسبی بایستی بکاربرده‌شود که درآن سختی کابل ونیروی داخل کابل همگراگردند . ازطرف دیگر باتوجه به تغییرطول نسبتا "زیادکابل ، Δl ، می‌توان درحل دقیق آن طول واقعی بعدازتغییرشکل کابل درمحاسبه مدول الاستیسته E_i، سختی K و تنش σ بکاربرده‌شود .

روش تحلیل

روشهای مختلفی جهت تحلیل پلهای کابلی ایستا وجوددارد ازجمله آنها ازروش کلاسیک اجزاء محدودرا می‌توان نام برد [۵] و [۶] در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

این روش سختی کل سازه با سوار کردن ماتریس سختی اعضای آن نظیر عرشه، برج و کابلها بدست آمده و با داشتن نیروهای ناشی از بار زنده و مرده و یا سایر بارگذاری ها مجهولات تغییر مکان عمومی سیستم را می‌توان تعیین نمود. سپس با داشتن تغییر مکان‌های نیروهای داخلی کلیه اجزاء سازه محاسبه می‌گردد. از آنجا که همانطور که نشان داده شد سختی کابلها فقط تابع مشخصات هندسی آن نبوده و بطور نمائی با تنش وارده بر آن متناسب می‌باشد، دستگاه معادلات بدست آمده غیرخطی بوده و ضرائب بردار مجهولات بطور ممزوجی با تغییر مکانها ارتباط دارند. بطوریکه یک روش حل تکراری که سختی کلیه کابلها در آن همگرا گردد بایستی مورد استفاده قرار گیرد.

روشی که ذیلا" مورد بررسی قرار می‌گیرد یکی از روش‌های عددی بوده و براساس می‌نیمم کردن انرژی پتانسیل کل سیستم می‌باشد. این روش برای تحلیل خطی پلهای کابلی [۷] نشان داده شده است که بسیار مناسب بوده و بسادگی قابلیت تحلیل عددی بوسیله کامپیوتر را دارد. در پلهای کابلی ایستا با توجه به اینکه شرایط انتهایی آنها بصورت مفصلی بوده و اتصال عرشه برروی برج بصورت ساده می‌باشد ولنگری به برج منتقل نمی‌گردد، می‌توان تغییر شکل سیستم را بصورت یک مجموعه سینوسی در نظر گرفت. ضرایب جملات سینوسی با استفاده از می‌نیمم کردن انرژی پتانسیل کل سیستم بدست می‌آیند. در این مقاله اثرات غیرخطی سختی کابلها و نیروهای پیش تنیدگی برروی آنها مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده خواهد شد که انتخاب شکل مناسبی برای کابلها و نیروهای پیش تنیدگی معینی در آنها می‌توان از اثرات غیرخطی آنها بکاهد[۸].

فرضیات

فرضیاتی که در تحلیل این نوع سازه‌ها می‌شوند بگونه‌ای است که با نحوه ساخت و عملکرد آنها مطابقت دارد. این فرضیات عبارتند از:

۱ - عرشه تقویت شده از کنار برجها می‌گذرد و هیچگونه لنگری به برج

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

منتقل نمی‌کند

۲ ـ تکیه‌گاه برج از پایه بصورت گیردار می‌باشد.

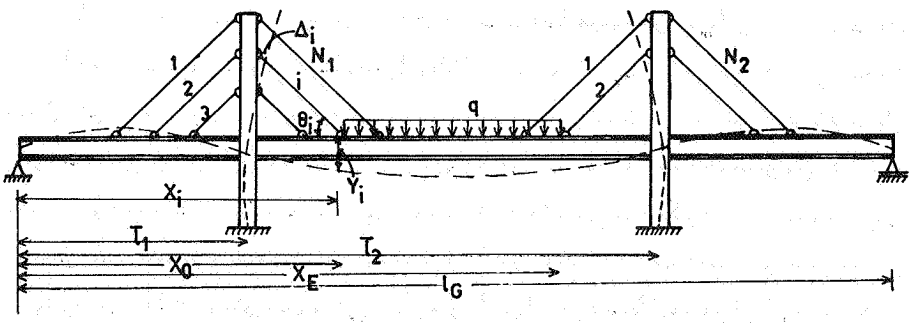
۳ ـ تمام کابلها دارای اتصال ثابت به برج می‌باشند.

۴ ـ از اثرات نیروهای محوری در عرشه پل و برج صرفنظر می‌گردد.

۵ ـ تکیه‌گاه‌های عرشه بغیر از یکی از آنها که بصورت مفصلی می‌باشد بقیه به صورت غلطکی می‌باشند.

معادلات حاکم بر رفتار پلهای کابلی ایستا :

شکل زیر یک پل کابلی ایستا به طول l_G که دارای N_1 کابل متصل به برج سمت چپ و N_2 کابل متصل به برج سمت راست بوده تحت اثر بار قائم به شدت q در طولی از عرشه قرار گرفته است.



شکل (۳)

با توجه به فرضیات چنانچه عرشه پل تحت بارگذاری q ، مولفه‌های قائم نیروی کابلها ، F_{iY} ، و نیروهای ناشی از عکس‌العمل برجها روی عرشه، R_1 و R_2 ، قرار گیرد در صورتیکه سختی خمشی عرشه EI_G باشد تغییر مکان قائم عرشه را می‌توان شامل دو قسمت زیر نوشت :

قسمت اول برای وقتیکه تحت بار q و نیروهای F_{iY} قرار گیرد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

در این صورت می‌توان تغییرشکل قائم را بصورت یک مجموعه‌سینوسی که شرایط سرحدی را ارضاء می‌کنند در نظرگرفت و با می‌نیمم‌کردن انرژی پتانسیل کل دامنه‌جملات سینوسی را تعیین نمود:

$$y = \sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin \frac{m\pi x}{l_G} \qquad (۲)$$

$$\pi = U + V_p = \int_0^{l_G} \frac{1}{2} EI_G (y'')^2 \, dx + \sum_{i=1}^{N=N_1+N_2} F_{iy} Y_i \qquad (۳)$$

$$- \int_{x_0}^{X_E} q(X) y \, dx$$

که در آن v انرژی ارتجاعی ذخیره‌شده در عرشه و V_p انرژی پتانسیل بارهای خارجی q و F_{iy} می‌باشند. برای تعادل لازم است که انرژی پتانسیل کل π می‌نیمم باشد که با قرار دادن y از رابطه (۲) در رابطه (۳) و می‌نیمم‌کردن آن ضرائب a_m بصورت زیر بدست خواهند آمد.

$$a_m = \frac{\int_{x_0}^{x_E} q(x) \sin \frac{m\pi x}{l_G} - \sum_{i=1}^{N} F_{iy} \sin \frac{m\pi x_i}{l_G}}{EI_G \left(\frac{m\pi}{l_G}\right)^4 \cdot \frac{l_G}{2}} \qquad (۴)$$

$$a_m =$$

قسمت دوم وقتیکه عرشه پل تحت بارهای R_1 و R_2 واقع شود که با اعمال بارهای واحد در محل عکس‌العمل‌ها و در نظرگرفتن تغییرشکل تیر بصورت سری‌های سینوسی با ضرائب b_m و c_m مقادیر آنها بطور مشابه عبارت خواهند بود با:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$b_m = \frac{\sin m\pi \frac{\bar{l}_1}{l_G}}{EI_G\left(\frac{m\pi}{l_G}\right)^4 \cdot \frac{l_G}{2}} \quad \text{و} \quad c_m = \frac{\sin m\pi \frac{\bar{l}_2}{l_G}}{EI_G\left(\frac{m\pi}{l_G}\right)^4 \cdot \frac{l_G}{2}} \qquad (۵)$$

ومقدار تغییرشکل کل عرشه‌پل عبارت خواهدبودبا :

$$Y = \sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin\frac{m\pi x}{l_G} + R_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin\frac{m\pi x}{l_G} + R_2 \sum_{m=1}^{\infty} c_m \sin\frac{m\pi x}{l_G} \qquad (۶)$$

که درآن تغییرمکان درمحل عکس‌العمل‌های R_1 و R_2 برابرصفرمی‌باشد یا :

$$\sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} + R_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} + R_2 \sum_{m=1}^{\infty} c_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} = 0 \qquad (۷)$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} a_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G} + R_1 \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G} + R_2 \sum_{m=1}^{\infty} c_m \sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G} = 0$$

بنابراین مقادیر عکس‌العمل‌های R_1 و R_2 ازرابطه‌های (۷) بدست‌آمده ومقدارتغییرمکان عرشه‌پل توسط رابطه (۶) تعیین می‌گردد. مقدار نیروی کابلها ، که مولفه‌قائم‌اثرآن روی عرشه‌پل برای محاسبه a_m ضروری می‌باشد ، با داشتن تغییرمکان طول کابل بدست خواهدآمدیا :

$$F_i = K_i \Delta l_i \qquad (۸)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

که درآن F_i و K_i و Δl_i به‌ترتیب نیرو، سختی وتغییرطول کابل i ام می‌باشد. مقدارتغییرطول کابلها را می‌توان با داشتن تغییرمکان عرشه پل وبرجها ازرابطه زیربدست آورد :

$$l_i = Y_i \sin \theta_i \pm \Delta_i \cos \theta_i \qquad (۹)$$

که درآن Y_i تغییرمکان قائم عرشه‌پل درمحل کابل i ام و Δ_i تغییرمکان افقی برج درمحل کابل i ام و θ_i زاویه حاده وترکابل با محورعرشه‌پل می‌باشد. علامت مثبت ومنفی به‌ترتیب نشان دهنده افزایش وکاهش طول کابل می‌باشد. ومقدار سختی کابل توسط رابطه زیرتعیین می‌گردد :

$$K_i = \frac{E_e}{1 + \frac{\gamma_i^2 (l_i + \Delta l_i)^2 \cos^2 \theta_i}{12 \left(\frac{F_i}{A_i}\right)^3}} \cdot \frac{A_i}{l_i + \Delta l_i} \qquad (۱۰)$$

تغییرمکان افقی برج درمحل کابل i ام، Δ_i ، چنانچه‌کابل به‌برج اول یا دوم‌متصل باشد به‌ترتیب ازعبارتهای زیربدست می‌آید :

$$\text{برج اول} \quad \Delta_i = \sum_{k=1}^{\frac{N_1}{2}} f_{ik}^{(1)} \left(F_k \cos\theta_k - F_{N_1+1-k} \cos\theta_{N_1+1-k}\right) \qquad (۱۱)$$

$$\text{برج دوم} \quad \Delta_i = \sum_{k=1}^{\frac{N_2}{2}} f_{ik}^{(2)} \left(F_k \cos\theta_k - F_{N_2+1-k} \cos\theta_{N_1+1-k}\right)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

که درآنها $f_{ik}^{(1)}$ و $f_{ik}^{(2)}$ به‌ترتیب ضرائب ماتریس نرمی برجهای اول و دوم بوده وچنانچه سختی خمشی برجها را به‌ترتیب E_1I_1 ، E_2I_2 و H_i ارتفاع برج ازمحل کابل i ام تا پایه باشد مقادیر ضرائب ماتریس نرمی عبارتند از :

$$f_{ik}^{(1)} = \frac{H_k^2}{6E_1I_1}(3H_i - H_k)$$

$$f_{ik}^{(2)} = \frac{H_k^2}{6E_2I_2}(3H_i - H_k) \qquad (۱۲)$$

بنابراین مقدارتغییرمکان پل ، Y ، با معلوم‌بودن ضرائب a_m ، b_m ، c_m ومقادیر R_1 و R_2 ونیروی کابلها بدست خواهدآمد. همانطورکه مشاهده می‌شود ازآنجاکه در محاسبه a_m مقدار F_{iy} بایستی معلوم باشدو محاسبه F_{iy} مستلزم تعیین تغییرمکان عرشه‌پل می‌باشد. مسئله فوق رفتاری غیرخطی داشته وبایستی ازروشهای تکراری جهت تحلیل آن کمک گرفت . ازطرف دیگرهمانطورکه در رابطه (۱۰) نشان داده شده است سختی کابل ثابت نبوده وتابع مقدارنیروی آن وطول آن می‌باشدکه با روابط فوق می‌توان اثرات غیرخطی بودن رفتارکابل را نیزدرتحلیل این‌گونه پلها درنظرگرفت .

معادلات بدست آمده برای نیروها وتغییرمکانهای اعضاءرامی‌توان ازیکی ازدوروش زیرکه دراین مطالعه موردبررسی قرارگرفته است بدست آورد :

حل معادلات حاکم‌بررفتارپلهای کابلی ایستا به‌روش "همگرایی تکراری"

همانطورکه قبلا" بیان گردیدمعادله تغییرشکل عرشه‌پل (معادله ۶) بستگی به‌مقادیر ضرائب a_m ، b_m و c_m داردکه این ضرائب به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

مقادیرنیروی کابلها مربوط می‌شود (معادله ۴) وهم‌چنین نیروی کابلها بطورغیرخطی به‌مقادیرتغییرشکل عرشه‌درنقاط اتصال به کابلها وابسته‌است (معادله ۸ و ۹ و ۱۰) بنابراین تعیین مقادیر نیروهای داخلی وتغییرمکانها بصورت یک روش همگرائی تکراری‌بدست خواهندآمد . دراین روش مراحل زیربصورت قدم‌به‌قدم‌انجام‌گرفته و در نهایت نیروها وتغییرشکلها بدست خواهندآمد :

۱ ـ مقادیراولیه‌برای نیروی کابلها (مثلا" نیروی صفربرای کلیه کابلها) انتخاب می گردد .

۲ ـ مقادیر a_m و b_m و c_m ازروابط (۴) و (۵) تعیین می‌شوند .

۳ ـ مقادیر R_1 و R_2 ازرابطهٔ (۷) بدست‌آمده ومعادله‌تغییرشکل برای هرنقطه‌درعرشه‌تیر پل ازرابطه (۶) بدست می‌آید .

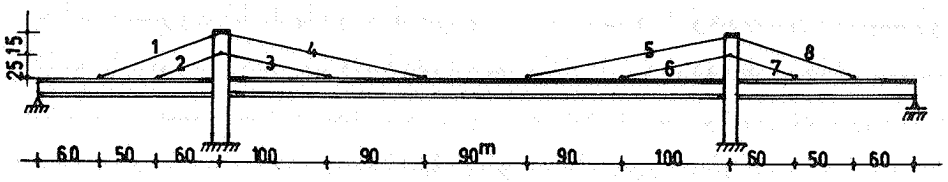
۴ ـ تغییرمکانهای افقی برجها ازروابط (۱۲ و ۱۱) تعیین ونیروی کابلها از روابط (۸، ۹، ۱۰) بدست می‌آیند . لازم‌به‌یادآوری‌است که‌دراینجا اثرات غیرخطی ماده‌ای کابلها درمحاسبات منظور گردیده‌است .

۵ ـ مقادیربدست‌آمده برای نیروی کابلها با مقادیرفرض‌شده‌دراولین قدم‌مقایسه‌گردیده‌وچنانچه‌تفاوت زیادی داشته‌باشندقدمهای اول تا پنجم‌تکرار می‌گرددتانهایتا "نیروی کلیه‌کابلها به‌سوی مقادیر حقیقی همگرا گردند .

روش فوق در مرجع [۵] برای رفتارخطی کابلها موردبررسی قرار گرفته‌است . دراینجا با درنظرگرفتن رفتارغیرخطی ماده‌ای برای کابلها یک برنامه‌کامپیوتری براساس روش همگرایی تکراری تنظیم گردیده‌ومثالهای متنوعی موردمطالعه‌قرارگرفته‌است ازآن جمله‌سازه کابلی صفحهٔ بعدتوسط این روش موردبررسی قرارگرفته‌که‌نتایج تحلیل خطی آن به‌شرح صفحه‌بعدمی‌باشد .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]



شکل (۴)

مدول الاستیسته عرشه پل، برجها و کابلها $E_G=E_1=E_2=E_e=2.1\ 10^6\ kg/cm^2$

بارگسترده و یکنواخت در طول پل $q = 6000\ kg/m$

سطح مقطع کابلها $A_i=0.01\ m^2$

ممان اینرسی عرشه پل $I_G=10\ m^4$

ممان اینرسی برجها $I_1=I_2=10\ m^4$

i	X_i (m)	Y_i (m)	Δ_i (m)	F_i kg
۱	۶۰	-۰/۱۷۷۵۱۲	۰/۱۱۱۱۴۷	۷۸۵۶۵/۳۵
۲	۱۱۰	-۰/۲۷۵۸۹۳	۰/۰۵۳۰۰۶	-۱۸۴۷۲۸/۲
۳	۲۷۰	۲/۰۳۸۹۷۵	-۰/۰۵۳۰۰۶	۹۰۲۷۰۷/۲
۴	۳۶۰	۳/۶۵۸۷۷۳	-۰/۱۱۱۱۴۷	۶۹۷۵۷۳/۶۴
۵	۴۵۰	۳/۶۵۸۷۷۳	-۰/۱۱۱۱۴۷	۶۹۷۵۷۳/۳
۶	۵۴۰	۲/۰۳۸۹۸۲	-۰/۰۵۳۰۰۶	۹۰۲۷۱۲/۶۲
۷	۷۰۰	-۰/۲۷۵۸۹۹	۰/۰۵۳۰۰۶	-۱۸۴۷۳۹/۷۲
۸	۷۵۰	-۰/۱۷۷۵۱۸	۰/۱۱۱۱۴۸	۷۸۵۶۳/۳۶

R_1=+1985137.59 kg

R_2 = +1985128.25 kg

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

ازنقاط ضعف این روش یکی اینکه وقت مصرف شده زیاد بوده و دیگر اینکه همگرایی تضمین شده‌ای برای جوابها وجود ندارد به بیان دیگر بعنوان مثال اگر در همین سازه سطح مقطع کابلها را ۵ برابر کنیم همگرایی سازه بسیار کند انجام گرفته و خطاهای محاسباتی شروع به زیاد شدن می‌کند. همانطور که از جوابها مشاهده می‌شود نیروی ایجاد شده در کابلهای شماره ۲ و ۷ منفی بوده و این مبین این مطلب است که این کابلها در تحمل باربری نقشی ندارند مسئله فوق در انتخاب سیستم کابلها، موقعیت آنها از نظر طراحی سیستم‌های پلهای کابلی ایستا بسیار قابل اهمیت می‌باشد. البته در این روش همگرایی می‌توان در هر مرحله از محاسبات چنانچه تعدادی از کابلها در فشار باشند در مرحله بعدی این کابلها را حذف نمود.

حل معادلات حاکم بر رفتار پلهای کابلی ایستا به روش ماتریس سختی ـ نرمی :

همانطور که در روش فوق ملاحظه می‌گردد از معادلات (۶) تا (۱۲) می‌توان تغییر مکان عرشه پل و برج، نیروهای داخلی آنها و همچنین نیروی کابلها را با ازای بارگذاری خارجی بدست آورد. چنانچه بار خارجی بصورت بارگسترده یکنواختی به شدت q در فاصله x_o تا x_E از ابتدای عرشه مطابق شکل اثر نماید روابط (۶) و (۷) با استفاده از (۴) و (۵) و فرض $\alpha_m = (\frac{m\pi}{l_G})^4 \frac{EIl_G}{2}$ بصورت زیر خواهد بود:

$$Y = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \left[\frac{ql_G}{m} \left(\cos\frac{m\pi x}{l_G} - \cos\frac{m\pi x_e}{l_G}\right) - \sum_{i=1}^{N} F_i \sin\theta_i \sin\frac{m\pi x_i}{l_G} \right] \sin\frac{m\pi x}{l_G} + R_1 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} \sin\frac{m\pi x}{l_G} + R_2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G} \sin\frac{m\pi x}{l_G} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha m}\left[\frac{ql_G}{m\pi}\left(\cos\frac{m\pi x_0}{l_G}-\cos\frac{m\pi x_e}{l_G}\right)-\sum_{i=1}^{N} F_i \sin\theta_i \sin\frac{m\pi x_i}{L_G}\right]$$

$$\sin\frac{m\pi l_1}{l_G}+R_1\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha_m}\sin^2\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} \qquad (۱۴)$$

$$+R_2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G}\sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G}=0 \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha m}\left[\frac{ql_G}{m\pi}\left(\cos\frac{m\pi x_0}{l_G}-\cos\frac{m\pi x_e}{l_G}\right)-\sum_{i=1}^{\infty} F_i \sin\theta_i \sin\frac{m\pi x_i}{l_G}\right]$$

$$\sin\frac{m\pi l_2}{l_G}+R_1\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin\frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G}\sin\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G}$$

$$+R_2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin^2\frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G}=0 \qquad (۱۵)$$

چنانچه مقادیر تغییر مکان عرشه پل را در محل اتصال کابلها به عرشه ، Y_i ، محاسبه نموده و فرض کنیم :

$$A_{im}=\frac{ql_G}{\alpha_m m\pi}\left(\cos\frac{m\pi x_0}{l_G}-\cos\frac{m\pi x_0}{l_G}\right)\sin\frac{m\pi x_i}{l_G}$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$\bar{A}_{1m} = \frac{q\,l_G}{m\pi\alpha_m}\left(\cos\frac{m\pi x_o}{l_G} - \cos\frac{m\pi x_e}{l_G}\right)\sin\frac{m\pi\bar{l}_1}{l_G}$$

$$\bar{A}_{2m} = \frac{q\,l_G}{m\pi\alpha_m}\left(\cos\frac{m\pi x_o}{l_G} - \cos\frac{m\pi x_e}{l_G}\right)\sin\frac{m\pi\bar{l}_2}{l_G} \qquad (۱۶)$$

در اینصورت داریم :

$$Y_i + \sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\left(\sum_{j=1}^{\infty} F_j \sin\theta_j \sin\frac{m\pi x_j}{l_G}\right)\sin\frac{m\pi x_i}{l_G}$$

$$- R_1 \sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin\frac{m\pi\bar{l}_1}{l_G}\sin\frac{m\pi x_i}{l_G}$$

$$- R_2 \sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin\frac{m\pi\bar{l}_2}{l_G}\sin\frac{m\pi x_i}{l_G} = \sum_{m=1}^{\infty} A_{im} \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\left(\sum_{j=1}^{\infty} F_j \sin\theta_j \sin\frac{m\pi x_j}{l_G}\right)\sin\frac{m\pi\bar{l}_1}{l_G}$$

$$- R_1 \sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}\sin^2\frac{m\pi\bar{l}_1}{l_G} - R_2 \sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha m}$$

$$\sin\frac{m\pi\bar{l}_1}{l_G}\sin\frac{m\pi\bar{l}_2}{l_G} = \sum_{m=1}^{\infty}\bar{A}_{1m} \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha m} \left(\sum_{j=1}^{\infty} F_j \sin\theta_j \sin \frac{m\pi x_j}{l_G} \right) \sin \frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G}$$

$$- R_1 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha m} \sin \frac{m\pi \bar{l}_1}{l_G} \sin \frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G}$$

$$- R_2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha m} \sin^2 \frac{m\pi \bar{l}_2}{l_G} = \sum_{m=1}^{\infty} \bar{A}_{2m} \qquad (۱۹)$$

درضمن با فرض علامت مثبت برای تغییرشکل برج ها ، Δ_i ، وقتی به سمت راست حرکت کنند ، برای $\frac{N_1}{2}$ و $\frac{N_2}{2}$ کابلهای سمت چپ اولین و دومین برج داریم :

$$K_i Y_i \sin\theta_i + K_i \Delta_i \cos\theta_i - F_i = 0 \qquad (۲۰\text{ـ الف})$$

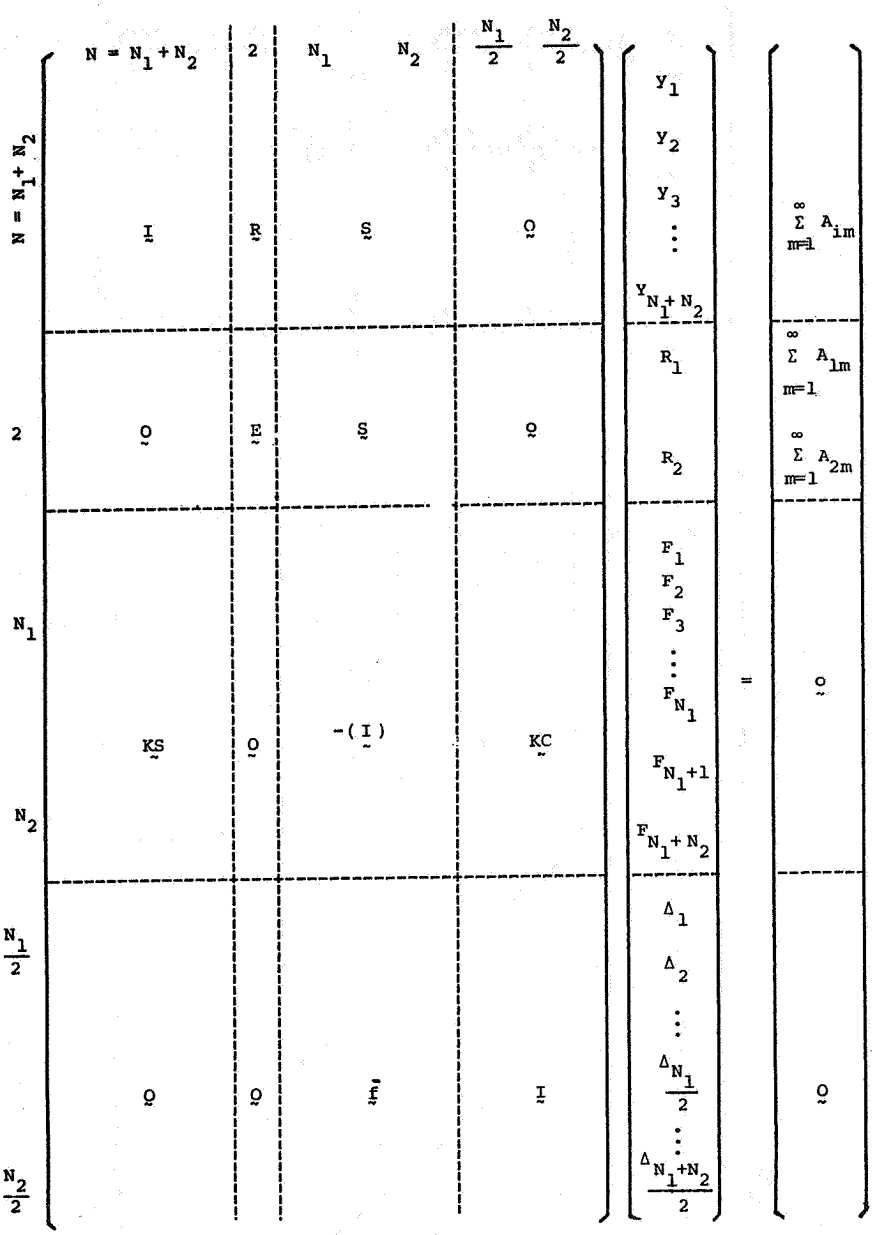
وبرای $\frac{N_1}{2}$ و $\frac{N_2}{2}$ کابلهای سمت راست اولین ودومین برج داریم :

$$K_i Y_i \sin\theta_i - K_i \Delta_i \cos\theta_i - F_i = 0 \qquad (۲۰\text{ـ ب})$$

علاوه برآن تغییرمکان برجها ، Δ ، ازروابط (۱۱) تعیین میگردند . مجموعهٔ روابط (۱۱) ، (۱۷) ، (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) شامل $2 + \frac{5N}{2}$ ومعادله و $2 + \frac{5N}{2}$ مجهول Y_i ($i = 1,N$) ، F_i ($i = 1,N$) ، R_1 و R_2 و Δ_i ، ($i = 1, \frac{N}{2}$) میباشد . چنانچه آنها را بصورت یک معادله ماتریسی بنویسیم ، مجهولات ازنوع ماتریس سختی ـ نرمی میباشد . لازم به تذکر است که تعیین مجهولات درتحلیل غیرخطی ماده ای وهندسی سیستم بآسانی میسرخواهدبود .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]



ماتریس فوق ماتریس سختی نرمی کل سازه می‌باشدکه زیرماتریس‌ها به‌شرح صفحات‌بعدهستند

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$\underset{N\times 2}{R} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_1}{l_G}\sin\frac{m\pi x_1}{l_G}\right) & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_2}{l_G}\sin\frac{m\pi x_1}{l_G}\right) \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_1}{l_G}\sin\frac{m\pi x_2}{l_G}\right) & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_2}{l_G}\sin\frac{m\pi x_1}{l_G}\right) \\ \vdots & \vdots \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_1}{l_G}\sin\frac{m\pi x_N}{l_G}\right) & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m}\left(\sin\frac{m\pi l_2}{l_G}\sin\frac{m\pi x_N}{l_G}\right) \end{bmatrix}$$

$$\underset{\frac{N}{2}\ N}{f} = \left[\begin{array}{cc|cc} \overset{(1)}{f}_{ik}\cos\theta_k & \overset{(1)}{-f}_{i,N_1+1-k}\cos\theta_k & \underline{0} & \underline{0} \\ \hline \underline{0} & \underline{0} & \overset{(2)}{f}_{i,k-\frac{N_1}{2}}\cos\theta_k & \overset{(2)}{f}_{i,\frac{3N_1}{2}+N_2+1-k}\cos\theta_k \end{array}\right]$$

$$i = 1, \frac{N_1}{2} \qquad K = 1, N_1$$

$$i = \frac{N_1}{2}+1, \frac{N_1+N_2}{2} \qquad K = N_1+1, N_1+N_2$$

$$\underset{N\times N}{K_S} = \begin{bmatrix} K_1\sin\theta_1 & & \\ & K_2\sin\theta_2 & \underline{0} \\ & & \ddots \\ \underline{0} & & K_N\sin\theta_N \end{bmatrix}$$

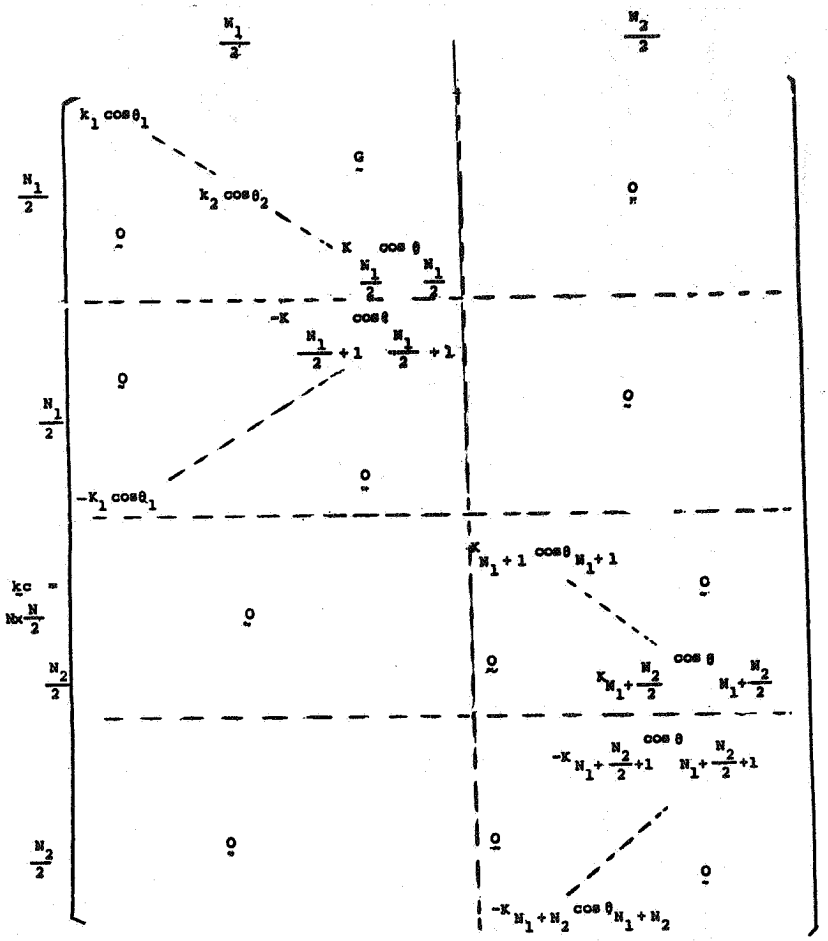
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

$$\underset{N\times N}{S} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin^2 \frac{m\pi x_1}{l_G} \sin\theta_1 & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin\theta_2 & \cdots & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin\theta_N \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin \frac{m\pi x_1}{l_G} \sin\theta_1 & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin^2 \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin\theta_2 & \cdots & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin\theta_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin \frac{m\pi x_1}{l_G} \sin\theta_1 & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin\theta_2 & \cdots & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin^2 \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin\theta_N \end{bmatrix}$$

$$\underset{2\times N}{S} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi x_1}{l_G} \sin\theta_1 & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin\theta_2 & \cdots & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin\theta_N \\ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_2}{l_G} \sin \frac{m\pi x_1}{l_G} \sin\theta_1 & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_2}{l_G} \sin \frac{m\pi x_2}{l_G} \sin\theta_2 & \cdots & \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_2}{l_G} \sin \frac{m\pi x_N}{l_G} \sin\theta_N \end{bmatrix}$$

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]



$$\underset{\sim}{E}_{2\,2} = \begin{bmatrix} -\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin^2 \frac{m\pi l_1}{l_G} & -\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi l_2}{l_G} \\ -\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin \frac{m\pi l_1}{l_G} \sin \frac{m\pi l_2}{l_G} & -\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m} \sin^2 \frac{m\pi l_2}{l_G} \end{bmatrix}$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

اگر ماتریس ضرائب دستگاه معادلات فوق را با $\underset{\sim}{SF}$ وبردار مجهولات را با $\underset{\sim}{x}$ وبردار کمیتهای حاصل از بارگذاری را با $\underset{\sim}{L}$ نمایش دهیم داریم:

$$[\underset{\sim}{SF}]\{X\} = \underset{\sim}{L} \qquad (۲۲)$$

در این صورت جواب معادله فوق عبارتست از:

$$\underset{\sim}{X} = [\underset{\sim}{SF}]^{-1} \underset{\sim}{L}$$

با استفاده از روش فوق می‌توان تحلیل خطی وغیرخطی سیستم‌های پلهای کابلی ایستا را تعیین نمود.

الف: رفتار خطی: چنانچه از رفتار غیرخطی کابلها و دیگر اعضای سازه صرفنظر شود در این صورت ضرائب ماتریس $\underset{\sim}{SF}$ بصورت ثابت ومشخص تعیین گردیده وبا استفاده از رابطه (۲۳) می توان نیروی کابلها، عکس‌العملهای برجها وتغییرمکانهای برج وعرشه را بدست آورد.

ب: رفتارغیرخطی: در این حالت ضرائب ماتریس $\underset{\sim}{SF}$ ثابت نبوده وخود تابعی از مجهولات نیرویی وتغییرمکانی سیستم می‌باشد. برای بدست آوردن مقادیر دقیق این ضرائب از روش تکراری استفاده کرده ودر هر مرحله از محاسبات، اجزاء این ماتریس را براساس هندسه و سایر مشخصات نیرویی و تغییرمکانی مرحله قبل بدست آورده ومجددا "مجهولات نیروئی وتغییرمکانی را بدست می‌آوریم واین عملیات را تا آنجا دنبال می‌کنیم تا کمیت های بدست آمده برای مجهولات نیرویی وتغییرمکانی همگرا گردند.

براساس روش فوق یک برنامه کامپیوتری تنظیم شده

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

ومسائل مختلفی موردبررسی قرارگرفته‌است . در ابتدا برای تحقیق صحت معادلات ودقت محاسبات نتایج تحلیل خطی پل کابلی ایستاکه درشکل (۴) توسط روش " همگرایی تکراری " تحلیل گردیددر اینجا نیزتوسط روش " سختی نرمی " انجام‌گرفته وبه‌شرح زیرمی‌باشد :

i	x_i m	Y_i (m)	Δ_i (m)	F_i kg
۱	۶۰	− ۰/۱۷۷۵۱۲۲	۰/۱۱۱۱۴۷۳	۷۸۵۶۹/۴۲۳
۲	۱۱۰	− ۰/۲۷۵۸۹۳	۰/۰۵۳۰۰۶	−۱۸۴۷۴۸/۶
۳	۲۷۰	۲/۰۳۸۹۳۴۱	− ۰/۰۵۳۰۰۶	۹۰۲۷۰۸/۶
۴	۳۶۰	۳/۶۵۸۶۹۹	− ۰/۱۱۱۱۴۷۳	۶۹۷۵۶۷/۵
۵	۴۵۰	۳/۶۵۸۷۰۰۱	− ۰/۱۱۱۱۴۷۳	۶۹۷۵۶۷/۵
۶	۵۴۰	۲/۰۳۸۹۳۵۲	− ۰/۰۵۳۰۰۶	۹۰۲۷۰۸/۶
۷	۷۰۰	− ۰/۲۷۵۸۹۲۴	۰/۰۵۳۰۰۶	−۱۸۴۷۴۷/۹
۸	۷۵۰	− ۰/۱۷۷۵۱۱۵	۰/۱۱۱۱۴۷۳	۷۸۵۶۹/۸

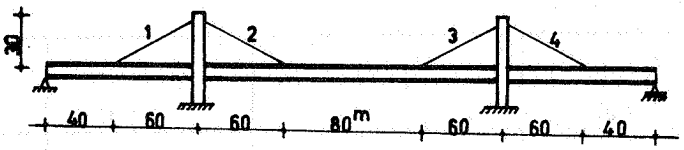
$R = 1985116.97$ kg $\qquad R_1 = 1985116.97$ kg

همانطورکه‌مشاهده‌می شودنتایج بدست‌آمده بسیارنزدیک به نتایج سازه‌فوق ازروش " همگرایی تکراری " می‌باشد.

درمثال شکل صفحه‌بعدبااستفاده‌ازروش " سختی نرمی " نتایج تحلیل خطی موردبررسی قرارگرفته‌است که‌به‌شرح صفحه‌بعدمی‌باشد :

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]



شکل (۵)

سطح مقطع کابلها = $0.1\ m^2$

ممان اینرسی برجها = $I_1 = I_2 = 20\ m^4$

ممان اینرسی عرشه پل = $I_G = 20\ m^4$

مدول الاستیسته عرشه و برج ها وکابلها = $E_G = E_1 = E_2 = E_C = 2.1\ \ 10^6\ kg/cm^2$

بارگسترده یکنواخت در طول عرشه = $2000\ kg/m$

نتایج تحلیل خطی سازه فوق عبارتست از :

i	X_i (m)	Y_i (m)	Δ_i (m)	F_i kg
۱	۴۰	۰/۰۰۰۰۹۹۷	۰/۰۰۱۶۸۸۱	۴۸۶۶۲/۰۶
۲	۱۶۰	۰/۰۱۳۱۴۳۱	— ۰/۰۰۱۶۸۸۱	۱۳۶۷۳۶/۹۸
۳	۲۴۰	۰/۰۱۳۱۴۳۱	— ۰/۰۰۱۶۸۸۱	۱۳۶۷۳۶/۹۸
۴	۳۶۰	۰/۰۰۰۰۹۹۷	۰/۰۰۱۶۸۸۱	۴۸۶۶۲/۰۶

$R_1 = 266218.3\ kg$ $R_2 = 266218.3\ kg$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

ونتایج تحلیل غیرخطی سازه‌فوق عبارتست از :

i	X_i (m)	Y_i (m)	i (m)	F_i kg
۱	۴۰	— ۰/۰۰۱۵۹۵۸	۰	۰
۲	۱۶۰	۰/۰۲۴۴۱۴۸	۰	۰
۳	۲۴۰	۰/۰۲۴۴۱۴۸	۰	۰
۴	۳۶۰	— ۰/۰۰۱۵۹۵۸	۰	۰

R_1 = 356250.5 kg R_2 = 356250.5 kg

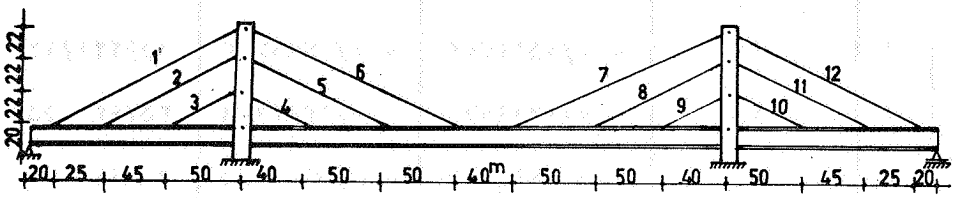
همانطورکه‌ازنتایج دوحالت " رفتارخطی " و" رفتارغیرخطی" ملاحظه می‌شودتفاوت فاحشی بین آنها وجوددارد‌بطوریکه‌درتحلیل غیرخطی نیروی تمامی کابلها صفرگردیده‌است وکابلها هیچگونه‌نقشی دربارسازه‌ایفاء نمی‌نمایند.

عامل موثردراین تفاوت زیاد، رفتارغیرخطی ماده‌ای کابلها می‌باشدکه‌توسط رابطه (۱) بیان گردید. درمثال فوق وضعیت قرارگرفتن کابلها روی سازه‌وهمچنین سختی خمشی عرشه‌پل وبرج طوری است که نیروی لازم‌برای بکارافتادن موثردرکابلها بوجودنمی‌آیدوسازه‌بصورت کاملا"خمشی عمل خواهدکرد. نکته‌فوق اهمیت زیادی درانتخاب آرایش کابلها درپلهای کابلی ایستارا داردوبوسیله‌روش آنالیزفوق می‌توان آرایش بهینه‌ومناسب را بدست آورد.

برای تحقیق موضوع اخیرسازه‌شکل صفحه‌بعدرا درنظر بگیرید:

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]



شکل (۶)

$A_1 = A_6 = A_7 = A_{12} = 0.04\ m^2$

$A_2 = A_3 = A_4 = A_6 = A_8 = A_9 = A_{10} = A_{11} = 0.018\ m^2$

عـــــرشه $I_G = 1.5\ m^4$

$E_c = E_1 = E_2 = E_4 = 2.1\ \ 10^6\ kg/cm^2$

بـــــرجهـا $I_1 = I_2 = 1\ m^4$

وزن مخصوص کابلـها $_c = 7800\ kg/m^3$

شدت بـارگسترده روی عرشه = q

نتـایج تحلیل خطی وغیـرخطی سازه شکل (۶) بـه ترتیب درجداول صفحه‌های بعدآمده است .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

i	X_i (m)	Y_i (m)	Δ_i (m)	F_i ton
۱	۲۰	− ۰/۰۵۲۲۷۰۲	+ ۰/۱۷۹۰۳۵۳	۸۵۶۲۴۱/۱۴
۲	۴۵	− ۰/۷۷۱۹۹۷	۰/۱۳۸۳۲۰۹	۳۵۷۶۳۲/۵۵
۳	۹۰	۰/۰۷۹۵۷۹۴	− ۰/۰۹۷۶۰۶۵	۴۲۸۶۷۰/۰۶
۴	۱۸۰	۰/۲۸۹۱۹۳۹	− ۰/۰۹۷۶۰۶۵	۳۵۵۲۴۷/۴۷
۵	۲۳۰	۰/۶۴۲۱۷۸۲	− ۰/۱۳۸۳۲۰۹	۵۱۵۸۸۲/۱
۶	۲۸۰	۰/۷۷۵۲۱۵۹	− ۰/۱۷۹۰۳۵۳	۷۷۶۵۶۲/۹۷
۷	۳۲۰	۰/۷۷۵۲۱۵۹	− ۰/۱۷۹۰۳۵۳	۷۷۶۵۷۲/۸۱
۸	۳۷۰	۰/۶۴۲۱۷۸۲	− ۰/۱۳۸۳۲۰۸	۵۱۵۸۷۱/۵۶
۹	۴۲۰	۰/۲۸۹۱۹۳۹	− ۰/۰۹۷۶۰۶۲	۳۵۵۲۶۰/۱۷
۱۰	۵۱۰	− ۰/۰۷۹۵۷۸۵	۰/۰۹۷۶۰۶۲	۴۲۸۶۶۹/۹۵
۱۱	۵۵۵	− ۰/۰۷۷۱۹۸۵	۰/۱۳۸۳۲۰۸	۳۵۷۶۳۳/۷۹
۱۲	۵۸۰	− ۰/۰۵۲۲۶۹۳	۰/۱۷۹۰۳۵۵	۸۵۶۲۴۴/۵۸

$R_1 = 554630.2$

$R_2 = 552626.4$

نتـــایج تحلیل خطی سازه‌شکل (۶)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

i	X_i (m)	Y_i (m)	Δ_i (m)	F_i ton
۱	۲۰	— ۰/۰۵۷۸۳۱۸	۰/۲۰۱۲۳۸۷	۸۱۶۰۷۹/۵
۲	۴۵	۰/۰۹۱۳۲۳۰	۰/۱۵۷۵۵۶۱	۳۵۸۳۱۶/۱
۳	۹۰	— ۰/۱۰۱۵۱۰۹	۰/۱۱۳۸۷۳۴	۴۶۹۸۴۳/۷
۴	۱۸۰	۰/۳۲۳۰۹۷۲	—۰/۱۱۳۸۷۳۴	۳۵۲۱۰۲/۸
۵	۲۳۰	۰/۷۳۱۹۶۲۳	—۰/۱۵۷۵۵۶۱	۵۷۲۱۲۹/۲
۶	۲۸۰	۰/۹۱۹۵۲۳۵	—۰/۲۰۱۲۳۸۷	۷۱۸۱۸۲/۹
۷	۳۲۰	۰/۹۱۹۵۲۶۷	—۰/۲۰۱۲۳۹۴	۷۱۸۱۹۴/۵۸
۸	۳۷۰	۰/۷۳۱۹۵۵۴	—۰/۱۵۷۵۵۶۲	۵۷۲۱۱۷/۲۳
۹	۴۲۰	۰/۳۲۳۰۹۹۹	—۰/۱۱۳۸۷۳	۳۵۲۱۱۶/۵
۱۰	۵۱۰	—۰/۱۰۱۵۱۰۴	۰/۱۱۳۸۷۳	۴۶۹۸۴۲/۷
۱۱	۵۵۵	—۰/۰۹۱۳۲۲۵	۰/۱۵۷۵۵۶۲	۳۵۸۳۱۷/۷
۱۲	۵۸۰	—۰/۰۵۷۸۳۱۴	۰/۲۰۱۲۳۹۴	۸۱۶۰۸۷/۲

نتایج تحلیل غیرخطی سازه‌شکل (۶)

نتایج فوق نشان می‌دهدکه‌شکل قرارگیری کابلها طوری است‌که درتمامی کابلها نیروی‌کافی برای بکارافتادن موثرایجادکرده و اثرات غیرخطی آنها را بطورقابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. لذا یک روش

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

مناسب برای کاهش اثرات غیرخطی درسازه‌های کابلی این است که کابلها را پیش تنیده کنیم که درقسمت دیگر مشروحا "به‌آن اشاره خواهد شد.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

مراجع

1. Podolny, W., Fleming, J.F., "Historical Development of Cable Stayed Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering vol. 98, No. ST9, 1972 .

2. Tang, M.C., "Design of Cable Stayed Girder Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering vol. 98, No. ST8, 1972

3. Troistsky, M.S., Cable Stayed Bridges, First ed., William Clowes and Sons, London, 1977 .

4. "Commentary On The Tentative Recommendation for Cable Stayed Bridge Structures", ASCE Jounal of Structural Engineering, vol. 103, No. ST5, 1977.

5. Baron, F., Ying Lien, S., "Analytical Studies of a Cable Stayed Girder Bridge", Computer and Structures, vol. 3, PP. 443-465, Pergamon Press 1973 .

6. Lazer, B.E., "Stiffness of Cable Stayed Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering vol, 98, No. ST7, 1972.

7. Hejab, H., "Energy Analysis of Cable Stayed Bridge", ASCE Journal of Structural Engineering, vol, 112, No. 5, 1986 .

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]

8. Lazer, B.E., Troitsky, M.S., and Douglass, M.M., "Load Balancing Analysis of Cable Stayed Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 98, No.ST8, 1972.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-23]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1368.7.1.3.1]