بررسي ناپايداري ديناميكي سازه‌هاي صنعتي سه‌بعدي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي با تداوم محدود و پله‌اي

كريم عابدي دانشيار گروه عمران، دانشكده عمران، دانشگاه صنعتي سهند تبريز

محمد حسين حبشيزاده مربي گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامي - واحد مرند

چكيده

يكي از مسائل مهمي كه در سازه‌هاي صنعتي از اهميت ويژه‌اي برخوردار بوده و بايستي مورد توجه قرار گيرد، بررسي اثرات ضربه‌هاي ناشي از بارگذاري ماشين آلات (از قبيل دستگاه پرس، پانچ، برش و غيره) بر روي رفتار ناپايداري چنين سازه‌هائي مي‌باشد. در آئين نامه‌هاي مختلف براي اعمال اثرات ضربه، از ضرائب تبديل بارهاي ضربه‌اي به بارهاي استاتيكي معادل استفاده شده است. با توجه به طبيعت بارهاي ضربه‌اي كه به صورت ديناميكي (تابع زمان) به سازه وارد مي‌گردند، بررسي ناپايداري اين سازه‌ها بايستي با توجه به معيارهاي تحليل ناپايداري ديناميكي مورد بررسي و تحليل قرار گيرد. در اين مقاله، نمونه‌اي از رفتار ناپايداري ديناميكي سازه‌هاي سه‌بعدي صنعتي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ناشي از بارگذاري ماشين آلات قابل نصب در طبقه اول اين سازه‌ها، توسط تحليلهاي ديناميكي غيرخطي (هندسي و مصالح)، مورد ارزيابي قرار گرفته است. براي اعمال ضربه ماشين آلات از ضربه‌هاي به شكل نيم سينوسي، مثلثي و مستطيلي و با زمانهاي تداوم مختلف و همچنين بار ضربه‌اي پله‌اي، استفاده شده است. در نهايت نتايج به دست آمده از تحليلها، با معيارهاي معرفي شده آئين نامه‌اي مورد مطابقت قرار گرفته و توصيه‌هائي براي بهبود طراحي اينگونه سازه‌ها پيشنهاد گرديده است.

كلمات كليدی: ناپايداري ديناميكي[۱]، تحليل ديناميكي غيرخطي، بارگذاري ضربه‌اي، ساختمان‌هاي صنعتي، ناكاملي اوليه[۲]

Investigation into the Dynamic Instability Behaviour of 3D Industrial Structures Subjected to the Finite Duration and Step Impulsive Loading

K. Abedi Faculty of Civil Eng., Sahand University of Technology

M. Habashizadeh Faculty of Civil Eng., Islamic Azad University, Mrand Branch

Abstract

One of the most significant problems in the dynamic behaviour of industrial structures is the effect of impulsive loading of industrial machinery on the instability of these structures. In design codes, the effects of impulsive loading have been represented by appropriate coefficients in order to transform the dynamic loads into the equivalent static loads. However due to the dynamic nature of impulsive loads, investigation into the instability behaviour of these structures should be undertaken considering the dynamic instability criteria. In the present paper, dynamic instability behaviour of three dimensional industrial space structures subjected to the impulsive loading of industrial machinery, set up in the first floor of these buildings, have been investigated using (geometric and material) nonlinear dynamic analysis. The half-sine-wave, triangular and rectangular impulsive loads with different time duration as well as step loading have been used to apply the impulsive effects of industrial machinery on this type of structures. The obtained results from the nonlinear dynamic analyses have been used to compare with the design criteria presented by design codes and some recommendations have been suggested to modify the design of these structures.

Key words: Dynamic instability, Nonlinear dynamic analysis, Impulsive loading, Industrial structures, Initial imperfection.

1- Dynamic Instability
2- Initial Imperfection

۱- مقدمه

ناپايداري ديناميكي را ميتوان براي توصيف بسياري از مسائل و پديده‌هاي فيزيكي در سـازه‌ها از قبيل: تشديد پارامتريك[۱]، نيروي در امتـداد عضو[۲] چرخيـدن شفتهاي دوار[۳]، اندركنش مايع و جامد[۴]، پاسخ عمومي سازه‌ها به بارهاي ديناميكي (از قبيل ضربه و زلزله) و چندين نوع مسائل ديگر بكار برد [۱۷].

در حالت كلي پديده ناپايداري به دو صورت استاتيكي و ديناميكي در سازه‌ها رخ مي‌دهد. اگر بار بحراني به صورت استاتيكي (بدون ارتباط بار با زمان) وارد شده و هيچگونه ارتعاشي در پاسخ سازه در نظر گرفته نشود، در اينحالت ناپايداري كلاً در طبقهبندي اول قرار مي‌گيرد. ولي چنانچه ناپايداري در يك بار بحراني بانضمام يك فركانس ارتعاش بحراني غيرصفر، در سازه رخ دهد در اينحالت ناپايداري از نوع ديناميكي خواهد بود. كليه پديده‌هاي ناپايداري داراي طبيعت ديناميكي مي‌باشند؛ اما ممكن است تعدادي از اين پديده‌ها را با يك دقت مناسب به صورت مدلهاي استاتيكي مورد بررسي قرار داد. لازم به ذكر است كه در ناپايداري ديناميكي بايستي اثرات توزيع جرم و ميـرائي اوليه سيستم در تحليلها در نظر گرفته شوند [۱۴].

مطالعات در خصوص ناپايداري ديناميكي در سال ۱۹۳۳ توسط Taub و Koinig آغاز شده است. آنها يك ستون ناكامل انحنادار و با تكيهگاههاي ساده را كه تحت اثر بار محوري ناگهاني و با زمان تداوم معين[۵]قرار گرفته بود، مورد بررسي قرار دادند. همچنين Stoker نيز تعاريفي براي پايداري و معيارهاي نسبي و همچنين برآورد شرايط بحراني كه سالها مورد بحث قرار گرفته بودند به دست داد [۱۹و۱۸]. برخي از اين معيارها، در مسائل تئوري كنترل[۶] ناپايداري و كنترل سازه هواپيما، و زمينه‌هاي ديگرمورد استفاده بوده است. Bolotin (1964) به مسائل تحريك پارامتريك[۷] يا تشديد پارامتريك پرداخته است كه در مورد فهم ناپايداري ديناميكي قابل بحث مي‌باشند [۱۱].

Ziegler (1968) [۲۱] نيز، پاسـخ سيستمهاي پايستار را تحت اثر بارهاي پايستار مورد بررسي قرار داده است. در سالهاي اخيـر نيز، مطالعات تحليلي و آزمايشگاهي سيستمها و المانهاي سازه‌اي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي شديد[۸]توسط Florence و Lindberg انجام گرديده است. در سال ۱۹۶۲، Budiansky و Roth طي مقاله‌اي تشخيص شـرايط بحـراني را تحت اثر بارهاي ناگهـاني، با استفاده از روش معادلات حركت ارائه نمودند [۱۳]. پس از ايشان در سال ۱۹۶۵، Simitses و Hoff شرايط بحراني را با استفاده از روش مجموع انرژي پتانسيل مشخص نمودند. درطي سالهاي ۱۹۶۷ و ۱۹۶۸ نيز Hoff و Hsu با استفاده از روش Total Energy-Phase Plane توانستند شرايط بحراني را مشخص سازند.

بارگذاري ضربه‌اي و بارگذاري ناگهاني با مقدار ثابت و زمان تداوم نامحدود را ميتوان در طبقهبندي ناپايداري ديناميكي در نظر گرفت. سازه‌هاي بارگذاري شده توسط اين نوع از بارها، از نظر استاتيكي داراي ناپايداري نقطه حدي و يا ناپايداري نقطه دوشاخگي مي‌باشند. براي اينگونه بارگذاريها، مفهوم ناپايداري ديناميكي را به اينصورت بيان ميشود: "براي مقادير كوچك بارگذاري، سيستم در نزديكي نقطه تعادل استاتيكي متناظر با دامنه نوسانات كوچك، ارتعاش خواهد نمود. با افزايش مقدار بارگذاري، بعضي از سيستمها داراي نوسانات بزرگي خواهند بود و يا اينكه يك واگرائي كلي در حركت ارتعاشي سيستم رخ خواهد داد". براي وقوع چنين پديده‌اي بايد سيستم داراي دو يا چند موقعيت تعـادل استاتيـكي بوده و اين سيستم با عبـور از نزديكي يك نقطه تعادل استاتيكي ناپايدار، به موقعيت تعادل بعدي برسد. با توجه به مطالب فوق، مفهوم ناپايداري ديناميكي همواره براي سيستمهائي قابل توصيف و تشريح مي‌باشد كه تحت اثر بارهاي استاتيكي، داراي رفتارناپايداري دوشاخگي مي‌باشند [۱۷].

ساختمانهاي صنعتي كاربرد وسيعي در ايجاد سالنهاي صنعتي و كارخانه‌ها داشته و بررسي رفتار چنين سازه‌هائي از دهها سال قبل مورد توجه محققين بوده است. يكي از مسائل مهمي كه در اين نوع سازه‌ها از اهميت ويژه‌اي برخوردار بوده و بايستي مورد توجه قرار گيرد، بررسي اثرات ضربه‌هاي ناشي از بارگذاري ضربه‌اي ماشين‌آلات بر روي ناپايداري چنين سازه‌هائي مي‌باشد كه در آئين‌نامه‌هاي مختلف براي اين منظور، از ضرائب

1- Parametric resonance
2- Follower force
3- Whirling of rotating rhafts
4- Fluid – solid interaction
5- Specified duration
6- Control theory
7- Parametric excitation

8- Intense loads

تبديل بارهاي ضربه‌اي به بارهاي استاتيكي معادل استفاده شده است. با توجه به طبيعت بارهاي ضربه‌اي، كه به صورت ديناميكي (تابع زمان) به سازه وارد مي‌گردند، ناپايداري اين سازه‌ها بايستي با توجه به معيارهاي تحليل ناپايداري ديناميكي مورد بررسي و تحليل قرار گيرد. به همين منظور در اين مقاله تحليلهاي ناپايداري ديناميكي براي ساختمانهاي صنعتي سه‌بعدي تحت اثر انواع اشكال بارهاي ضربه‌اي و با زمانهاي تداوم مختلف ناشي از بارگذاري ضربه‌اي ماشين‌آلات ارائه گرديداند. اهداف مقاله حاضر را مي‌توان به صورت زير بيان نمود:

- ارائه الگوريتمي براي بررسي ناپايداري ديناميكي ساختمانهاي صنعتي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي
- بررسي رفتار غيرخطي ديناميكي ساختمانهاي صنعتي فضائي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات
- بررسي تطبيقي معيارهاي معرفي شده آئين‌نامه‌اي و ارائه توصيه‌هائي براي بهبود طراحي اينگونه سازه‌ها.

لذا در اين مقاله تحليلهاي ناپايداري ديناميكي براي ساختمانهاي صنعتي فضائي تحت اثر انواع اشكال بارهاي ضربه‌اي و با زمانهاي تداوم مختلف ناشي از بارگذاري ضربه‌اي ماشين‌آلات ارائه مي‌گردد.

۲- معيارهاي بحراني جهت ارزيابي ناپايداري ديناميكي تحت اثر بارهاي ضربهاي

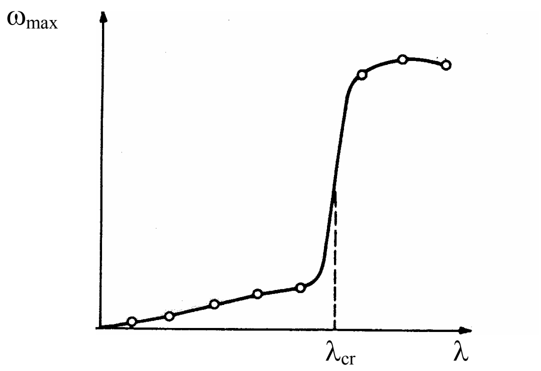
معيارهاي بحراني ناپايداري ديناميكي براساس مفاهيم و روشهاي ارائه شده توسط محققين مختلف جهت ارزيابي شرائط بحراني براي سيستمهاي سازه‌اي تحت اثر بارگذاري ضربه‌اي، به سه طبقه زير تقسيم ميگردند [۱۷]:

۲-۱- روش معادلات حركت

در سال ۱۹۶۲ آقايان Budiansky و Roth از اين روش براي به دست آوردن شرائط بحراني بارگذاري فشاري پوسته‌هاي كروي نازك، كم عمق و گيردار استفاده نمودند [۱۳]. در اين روش، معادلات حركت سيستم به صورت معادله (۱) براي چندين مقدار از ضرائب بار اعمال شده، به صورت عددي حل گرديده، و انتخاب ضرائب بار از مقادير كوچك آغاز ميشود.

$$M\ddot{a} + C\dot{a} + Ka = {}^{t}R \qquad (۱)$$

براي مقادير كوچك پارامتر بار (λ)، با توجه به شكل (۱)، سيستم داراي نوسانات كوچكي ميباشد. دامنه حداكثر پاسخ با افزايش پارامتر بار به آرامي افزايش پيدا مي‌كند (ω_{max}). در برخي از ترازهاي بار λ، دامنه حداكثر پاسخ (ω_{max}) داراي يك جهش بزرگي خواهد بود، كه مقدار λ متناظر با اين جهش به عنوان پارامتر بار بحراني ديناميكي (λ_{cr}) شناخته خواهد شد.



شكل ۱ - معيار ناپايداري ديناميكي معرفي شده توسط Budiansky و Roth

۲-۲- روش Total Energy – Phase Plane

اين روش در سال ۱۹۵۴ توسط Hoff و Bruce و در سالهاي ۱۹۶۶ و ۱۹۶۷ توسط Hsu مورد استفاده قرار گرفته است. بر طبق اين روش، شرائط بحراني با توجه به مشخصههاي Phase-Plane سيستم به دست خواهد آمد. با استفاده از اين روش، شرائط بحراني كرانههاي بالائي و پائيني قابل ارزيابي ميباشند.

۲-۳- روش مجموع انرژي پتانسيل

اين روش در سال ۱۹۶۴ توسط Hoff و Bruce، و در سال ۱۹۶۷ توسط Simitses مورد استفاده قرارگرفته است. براساس اين روش، شرائط بحراني ديناميكي، به مشخصه‌هاي پتانسيلي سيستم مربوط خواهد بود. همچنين اين روش براي سيستمهاي پايستار قابل كاربرد ميباشد. با استفاده از اين روش نيز، شرائط بحراني كرانه‌هاي بالائي و پائيني قابل ارزيابي ميباشند.

همچنين براي اطلاعات بيشتر در مورد روشهاي فوق ميتوان به مرجع [۹] رجوع نمود.

با توجه به مطالب فوق و بررسي معيارهاي بحراني ناپايداري ديناميكي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي، به نظر مي‌رسد كه مي‌توان از معيارهاي بار بحراني معرفي شده توسط Budiansky و Roth ؛ كه بر مبناي استفاده از روش حل معادلات حركت استوار مي‌باشد، استفاده نموده و ناپايداري ديناميكي قابهاي صنعتي را نيز تحت اثربارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات بررسي نمود.

۳- روش عددي براي بررسي ناپايداري ديناميكي

در اين بخش به بررسي و تحليل ناپايداري ديناميكي قابهاي صنعتي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ناشي از بارگذاري ماشين‌آلات مي‌پردازيم. تمامي تحليل‌ها توسط نرمافزار 13.3 , 13.2 Lusas انجام گرديده است. مباني برنامه نويسي و تحليل اين نرمافزار براساس روش عددي عناصر محـدود[1] استوار مي‌باشد و Lusas نرمافـزار مناسـبي براي تحليـلهاي غيرخطي (هندسي و مصالح) استاتيكي و ديناميكي ميباشد. همچنين كليـه تحليلهاي انجام شده داراي شرايط غيرخطي هندسي و مصالح ميباشند. براي اطلاع بيشتر از مباني كلي تحليلهاي غيرخطي مي‌توان به مباني نظري نرمافزار Lusas يا كتب روشهاي عناصر محدود مراجعه نمود [۹]. لازم به يادآوري است كه جهت ارزيابي صحت تحليلهاي ناپايداري ديناميكي انجام شده و تعيين پريد و مقادير ويژه سازه‌ها، مثالهايي از مرجع [۳] انتخاب و پس از مدلسازي و تحليل، نتايج با مقادير عددي حاصل از روشهاي دستي مقايسه گرديده كه حاكي از صحت مدلسازي عناصر محدود براي تحليلهاي ناپايداري ديناميكي مي‌باشد. براي اطلاعات بيشتر مي‌توان به مرجع [۹] مراجعه نمود. همچنين بررسي ناپايداري ديناميكي سازه‌هاي صنعتي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ناشي از بارگذاري جرثقيل با استفاده از تحليلهاي دوبعدي غيرخطي هندسي و مصالح انجام گرفته و نتايج با مقادير آيين‌نامه‌اي مقايسه گرديده است [۱۰].

لازم به ذكر است كه در كليه تحليلهاي انجام شده، براي مدلسازي از فرم معمول ساختمانهاي صنعتي كه در اصطلاح عـام "سـوله" (قـابهاي شـيبدار) گفتـه مي‌شود، استفـاده شده است؛ ولي به عنوان تحقيقات بعدي مي‌توان فرمهاي ديگر ساختمانهاي صنعتي را نيز با توجه به روش ارائه شده، مورد تحليل و بررسي قرار داد [۹].

۳-۱- مراحل تحليل

بعد از انتخاب اوليه هندسه و مقاطع فرضي مدل، مـراحل تحليـل به صورت زير خواهد بود:

۱- تحليل استاتيكي جهت طراحي اصلي سازه [۵،۶، ۷و۸]

۲- تحليل كمانش خطي[2] جهت تعيين مود اول كمانش، و اعمال ناكاملي اوليه به سازه در جهت كمانش مود اول

۳- تحليل مقادير ويژه[3]؛ جهت تعيين مقادير ويژه، پريد حداكثر سازه و تعيين ضرائب ميرائي ريلي براي اعمال در ماتريسهاي سختي و جرم، براي ايجاد ماتريس ميرائي سازه

۴- تحليل ناپايداري استاتيكي غيرخطي (هندسي و مصالح) جهت تعيين بار بحراني استاتيكي (براي سازه ناكامل).

۵- تحليلهاي ديناميكي غيرخطي (هندسي و مصالح) با ضرائب بار مختلف، جهت به دست آوردن بار بحراني ناپايداري ديناميكي سازه ناكامل

۳-۲- تحليل ناپايداري ديناميكي ساختمان‌هاي صنعتي سه بعدي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات باتداوم محدود[4]

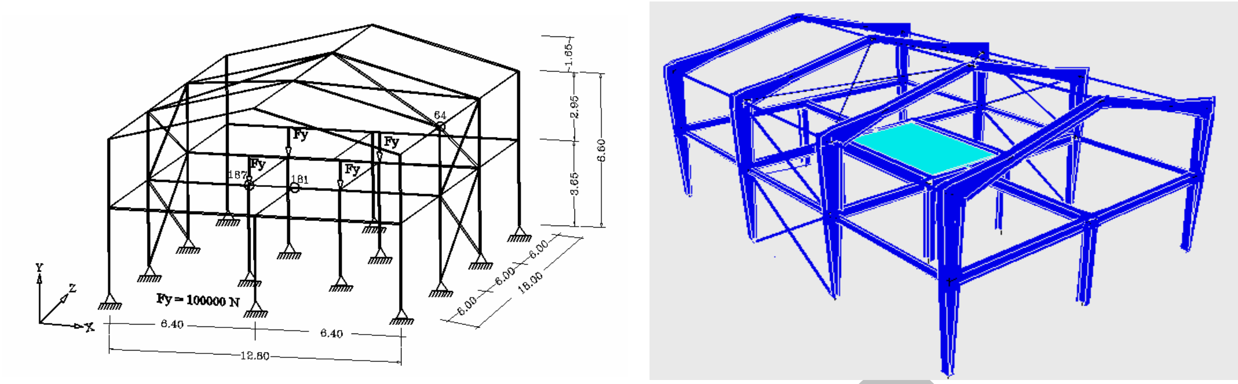
در اين مطالعه مدلهاي مختلفي مورد تحليل قرار گرفته‌اند ولي در اين مقاله صرفاً به ارائه يك مدل اشاره مي‌شود. مدل مـورد مطالعـه بـه صورت يك سازه صنعتي دو طبقه بـا دهانه ۱۲/۸۰ متر انتخاب گرديده است كه طراحي اين سازه توسط يكي از دفاتر مهندسي انجام شده و لذا از تحليل اوليه براي تعيين مقاطع اين سازه صرفنظر گرديده و تحليلهاي كمانش خطي، ناپايداري استاتيكي، تعيين مقادير ويژه و تحليلهاي ناپايداري ديناميكي بر روي اين سازه انجـام شده است. همچنين بررسي ناپايداري ديناميكي اين سـازه براي انواع اشـكال بارهاي ضـربه‌اي (نيـم مـوج سينـوسي، مثلثـي، مستطيلي) و با زمانهاي تداوم بار مختلف و بار ضربه‌اي پله‌اي انجام گرديده است. شكل كلي سازه سه ُبعدي مورد تحليل و ابعاد دهانه‌ها و چشمه‌ها در شـكل (۲) نشـان داده شـده اسـت [۹] .

1- Finite Element

2- Linear buckling

3- Eigenvalues

4- Finite duration impulsives



شکل ۲ – شکل كلي سازه سه‌ُبعدي تحت اثر بار ضربه اي ماشين آلات (Fy)

۳-۳- فرضيـات مـورد استفـاده در تحليـلها

لازم به ذكر است كه فرضيات زير در مدلسازي اين سازه سه بعدي در نظر گرفته شده است:

-تمامي تكيهگاههاي سازه به صورت مفصلي ثابت در نظر گرفته شدهاند

-تمامي اتصالات سازه به صورت صلب كامل در نظر گرفته شدهاند

-محل قرارگيري دستگاه ايجاد كننده نيروهاي ضربه‌اي (كه ميتواند دسـتگاه پرس، پانچ، برش و غيره باشد) در وسط دهانه دوم، با توجه به محل اعمال نيروهاي ضربه‌اي در شكل (۲)، در نظر گرفته شده است

-فرض مي‌شود كه تيرهاي تحمل كننده دسـتگاه، سختي كافي جهت انتقال مستقيم نيروهاي ضربه‌اي به بالاي ستونها را داشته باشند

-غيرخطي بودن مصالح به صورت الاستو ـ پلاستيك كامل در نظر گرفته شده است

-در انتخاب نوع مشبندي المانهاي تيرها و ستونها از المان تيري ضخيم[1] (يا تير Timoshenko) استفاده شده است

-نوع مشبندي اعضاي بادبنديهاي سازه، المان Bar (خرپائي) ميباشد

-تنش تسليم فولاد $\sigma_y = 2.4 \times 10^8 \ (N/m^2)$ در نظر گرفته شده است.

۳-۴- اَشكال بارهاي ضـربهاي و زمانهاي تداوم بار آنهـا

براي بررسي اثرات بارهاي ضربه‌اي و مقايسه آنها با هم، كلاً از چهار نوع شكل بار ضربه‌اي و زمانهاي تداوم بار به شرح ذيل استفاده شده است:

۱-بارگذاري ضربه‌اي به شكل نيم موج سينوسي و زمانهاي تداوم:

$T_d = 0.05 \ , \ 0.1 \ , \ 0.15 \ sec$

۲-بـارگـذاري ضربـه‌اي به شـكل و مثلثي زمانهــاي تــداوم:

$T_d = 0.05 \ , \ 0.1 \ , \ 0.15 \ sec$

۳- بـارگـذاري ضربــه‌اي بـه شكل مستطيلي و زمانهاي تداوم:

$T_d = 0.05 \ , \ 0.1 \ sec$

۴- بارگذاري پله‌اي[2] با زمان تداوم نامحـدود[3] ؛

در شكل (۳) بارهاي ضربه‌اي نيم‌سينوسي، مثلثي و مستطيلي با زمان تداوم ۰/۰۵ ثانيه نشان داده شده است و در ادامـه به نتايج به دست آمده از اعمال چنين بـارهـاي ضربه‌اي به سازه مورد نظر اشاره مي‌گردد .

۳-۵- تحليـل كمـانش خطي[4]

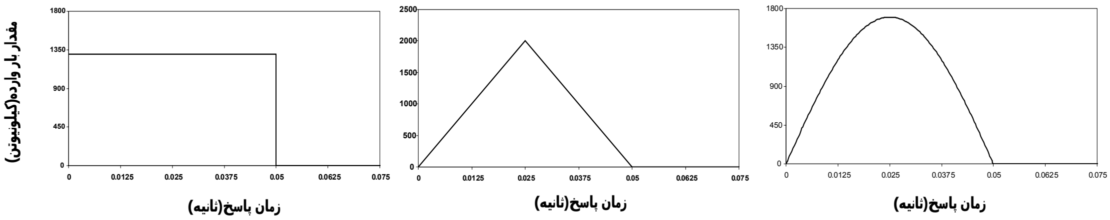
بعد از انتخاب مدل مورد نظر جهت تحليلهاي ناپايداري استاتيكي و ديناميكي بايستي يك ناكاملي مناسب بر روي مـدل سازه‌اي اعمال گردد؛ به همين منظور قبل از انجام چنين تحليلهائي، يك تحليل كمانش خطي بر روي مدل انجام شده و مود اول كمانش به دست آمده، جهت اعمال ناكاملي در سازه، در نظر گرفته مي‌شود. شـكل (۴) نشان دهنده مود اول كمانش مدل ســازهاي مورد استــفاده بــوده كه بر اين اساس ناكاملي به گرههاي اصلي سازه اعمال شده است.

1- Thick beam

2- Step loading

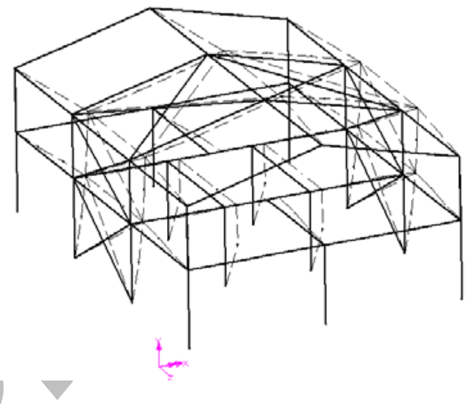
3- Infinite duration

4- Linear Buckling Analyses



الف- بار ضربه‌اي نيم سينوسي　　ب- بار ضربه‌اي مثلثي　　پ- بار ضربه‌اي مستطيلي

شكل ۳ – انواع اشكال بارهاي ضربه‌اي با زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec



شكل ۴ - مود اول‌كمانش خطي مدل سازه‌اي

با توجـه به شكـل (۴) براي ايجـاد ناكاملي در مدل سازه‌اي مذكور، در قابهاي كنـاري از ناكاملي در جهت X كلـي سيستم و به مقـدار $e_x = 2.5$ mm، و در قـابهاي ميـاني از ناكاملـي در جهت X كلي سيستم و به مقــدار $e_x = 5.0$ mm به گـرههاي اصلـي مـدل اعمـال شـده‌اند، استفاده شده است. (براساس نسبت ميزان ناكاملي به طول ستون كه معمولاً در محدوده $1/1000 < e / L < 1/500$ در نظر گرفته ميشود).

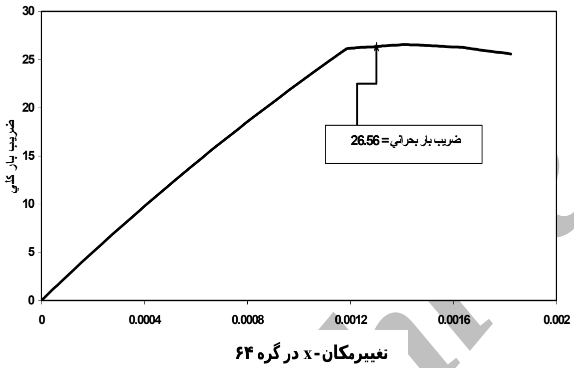
۳-۶- تحليـل ناپايداري استاتيـكي

براساس ناكاملي اعمال شده و همچنين بار مبناي وارد بر سـازه (بـا توجــه به شـكل (۲) و در نظر گرفتن بار ضربه‌اي به صــورت بار استاتيــكي ثابت)، تحليـل ناپايداري اسـتاتيــكي غيرخطي هندسي و مصالح بر روي اين سازه انجام شده و ضريب بار بحراني براي ناپايداري استاتيكي اين سازه با توجه به شــكل (۵) برابر ۲۶/۵۶ به دست آمده است.

۳-۷- تحليـل مقـادير ويژه

براي تعيين ضرائب ميـرائي ريلي، يك تحليل مقادير ويژه برروي مدل سازه‌اي انجام گرفته و ۵۰ مقدار ويژه و فركانسهاي زاويه‌اي اول سازه، از اين طريق به دست آمده است. با متوسط‌گيري از فركانسهاي زاويه‌اي اول تا پنجم، ω_ρ و ۴۶ تا۵۰، ω_σ، محاسبه شده و ضرائب ميرائي ريلي به صورت زير به دست آمده است، همچنين درصـــد ميرائي در نظر گرفته شده براي سازه مذكور برابر ۱/۵ % ($\zeta_\rho = \zeta_\sigma = 0.015$) مي‌باشد:

Rayleigh Damping Constants:
$\alpha = 0.32 \quad , \ \beta = 3.82E-04$



شكل ۵ - پاسخ ناپايداري استاتيكي سازه در گره ۶۴

۳-۸- تحليل نـاپايـداري ديناميكي ســازه تحـت اثـــر بار ضربه‌اي نيم موج سينوسي با زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec

معادلــه اصلي بار ضربه‌اي نيم‌سينوسي وارد بر ستونهاي حامل دستگاه به صورت زير ميباشد:

$$P_t = L_f F_y Sin(20\pi t) \quad (۲)$$

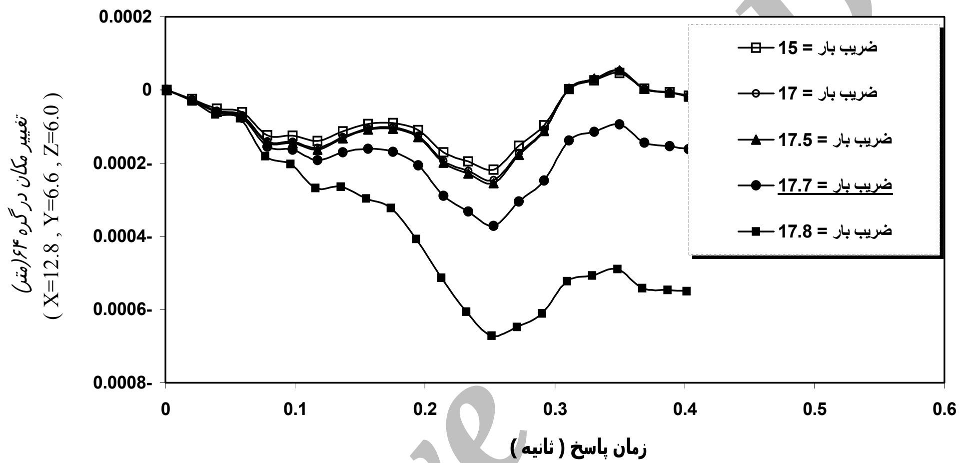
در معـادله فــوق L_f، ضــريب بـار ضــربه‌اي وارده بـوده و $F_y = 100000\,N$ در نظر گرفته مي‌شود. با توجه به معادلـه فـوق شـكل كلي بارضربـــه‌اي وارده با ضريب بار $L_f = 17.0$ در شـكل (۳-الف) نشان داده شده است.

با درنظر گرفتن بار ضربه‌اي مذكور و انجام تحليلهاي ديناميكي با ضرائب بار مختلف، نتايج حاصل براي پاسخهاي

تغيير مكان افقي گـره ۶۴ نسبـت به زمان، به صورت نمودار ارائه شده در شـكل (۶) به دست مي‌آيد. با توجه به اين شكل مشاهده مي‌شـود كـه تا ضريب بار ۱۷/۵ درسازه هيچگونه ناپايـداري به وجود نمي‌آيد، ولي با افـزايش ضـريب بار ضـربه‌اي به اندازه ۰/۲ و بيشتر، تغيير مكانهاي نسبي افزايش يافته و مخصوصاً در جهت محورهاي افقي اين افزايش مشهودتر مي‌باشد. لذا براساس معيار بحراني ارائه شـده تـوسط Roth و Budiansky، مي‌تـوان ضـريب بـار ۱۷/۷ را به عنـوان ضـريب بار بحراني‌جهت ناپايـداري ديـنـاميـكي سـازه مذكـور در نظر گرفت. با توجه به ضريب بار بحراني ديناميكي فوق و همچنين ضريب بار بحراني استاتيكي سازه، نسبت بار بحراني استاتيكي به ديناميكي، كه اصطلاحاً آنرا ضريب بزرگنمائي مي‌ناميم، براي اين نوع بار ضربه‌اي به صورت زير محاسبه مي‌شود:

D = ۲۶/۵۶ ÷ ۱۷/۷ = ۱/۵ (ضريب بزرگنمائي)

به همـين ترتيـب بـراي بارهـاي ضـربه‌اي نـيم‌سينوسـي بـا زمانهاي تداوم ۰/۱ و ۰/۱۵ ثانيه تحليـلهاي مشابهي انجام شده و نتايج تحليلها در جدول (۱) نشان داده شده است.



شـكل ۶- پاسخ ناپايداري ديناميكي در گره ۶۴ تحت اثر بار ضربه‌اي نيم سينوسي و $T_d = 0.05$ sec

جدول ۱ – نتايج تحليل ناپايداري ديناميكي براي اشكال مختلف بارهاي ضربه‌اي

شكل بارگذاري ضربه		زمان تداوم ضـــربه (ثانيه)	ضريب بار بحراني ديناميكي	ضريب بزرگنمائي
۱	ضـربه نيم‌سينوسي	۰/۰۵	۱۷/۷	۱/۵۰
۲	// //	۰/۱	۲۴/۷	۱/۰۸
۳	// //	۰/۱۵	۲۴/۷	۱/۰۸
۴	ضـربه مثلثي	۰/۰۵	۲۰/۰	۱/۳۳
۵	// //	۰/۱	۲۴/۴	۱/۰۹
۶	// //	۰/۱۵	۲۶/۴	۱/۰۱
۷	ضـــربه مستطيلي	۰/۰۵	۱۳/۹۶۱	۱/۹۰
۸	// //	۰/۱	۱۳/۹۶	۱/۹۰
۹	ضربه پله‌اي	∞	۱۳/۹۶	۱/۹۰

۳-۹ - تحليل ناپايداري ديناميكي سازه تحت اثر بارهاي ضربه‌اي مثلثي با زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec

شكل كلي بار ضربه‌اي مثلثي وارده بر سازه با ضريب بار $L_f = 20.0$ و همچنين زمان تداوم بار $T_d = 0.05$ sec، مطابق شكل (۳- ب) ميباشد. با در نظر گرفتن بار ضربه‌اي فوق به عنوان بار ديناميكي وارد بر سازه و انجام تحليلهاي ديناميكي با ضرائب بار ضربه‌اي مختلف، نتايج اين تحليلها در شكل (۷) براي پاسخ ديناميكي تغييرمكان افقي گره ۶۴ سازه نشان داده شده است. با توجه به اين نمودارها و با درنظر گرفتن معيار بحراني Budiansky –Roth، مشاهده ميگردد كه ضريب بار ۲۰/۰ را ميتوان به عنوان ضريب بار بحراني ديناميكي اين سازه تحت اثر بار ضربه‌اي مثلثي و زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec در نظر گرفت و تغييرمكانهاي نسبي سازه با افزايش ضريب بار از اين حد، به طور نامحدودي افزايش پيدا مي‌كند. همچنين با توجه به اين ضريب و ضريب بار بحراني استاتيكي اين سازه، ضريب بزرگنمائي براي اين نوع بار ضربه‌اي به صورت زير به دست خواهد آمد:

D = ۲۶/۵۶ ÷ ۲۰/۰ = ۱/۳۳ (ضريب بزرگنمائي)

به همين ترتيب براي بارهاي ضربه‌اي مثلثي با زمانهاي تداوم ۰/۱ و ۰/۱۵ ثانيه تحليلهاي مشابهي انجام شده و نتايج تحليلها در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳-۱۰ - تحليل ناپايداري ديناميكي سازه تحت اثر بارهاي ضربه‌اي مستطيلي با زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec

شكل كلي بار ضربه‌اي مستطيلي وارده بر سازه با ضريب بار $L_f = 13.0$ و زمان تداوم بار $T_d = 0.05$ sec، مطابق شكل (۳ - پ) ميباشد.

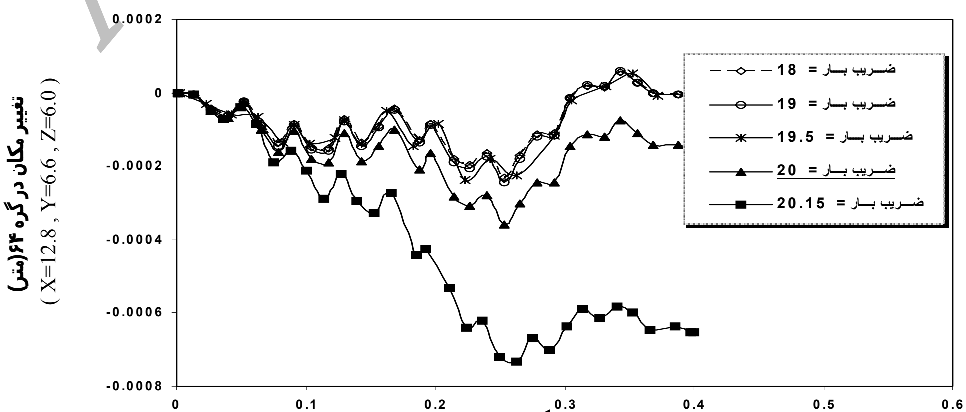
با در نظر گرفتن اين بار ضربه اي به عنوان بار ديناميكي وارد بر سازه و تحليل ديناميكي سازه با ضرائب بار ضربه‌اي مختلف، نتايج تحليلها در شكل (۸) براي پاسخ ديناميكي تغييرمكان در جهت افقي گره ۶۴ اين سازه نشان داده شده‌اند.

با توجه به شكل (۸) و با در نظرگرفتن معيار بحراني Budiansky –Roth، مشاهده مي‌گردد كه ضريب بار ۱۳/۹۶۱ را مي‌توان به عنوان ضريب بار بحراني ديناميكي اين سازه تحت اثر بار ضربه‌اي مستطيلي و زمان تداوم $T_d = 0.05$ sec در نظر گرفت. همچنين با توجه به ضريب بحراني فوق و ضريب بار بحراني استاتيكي اين سازه، ضريب بزرگنمائي براي اين نوع بار ضربه‌اي به صورت زير به دست خواهد آمد:

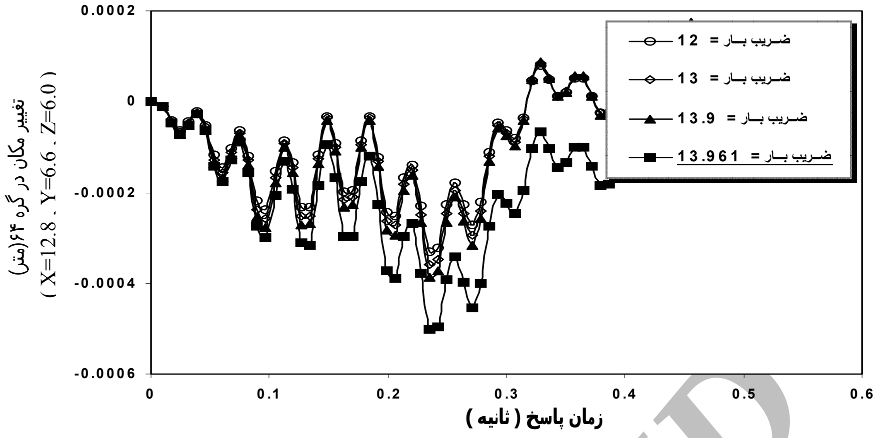
D = ۲۶/۵۶ ÷ ۱۳/۹۶۱ = ۱/۹ (ضريب بزرگنمائي)

به همين ترتيب براي بار ضربه‌اي مستطيلي با زمان تداوم ۰/۱ ثانيه تحليلهاي مشابهي انجام شده و نتايج تحليلها در جدول (۱) نشان داده شده است.

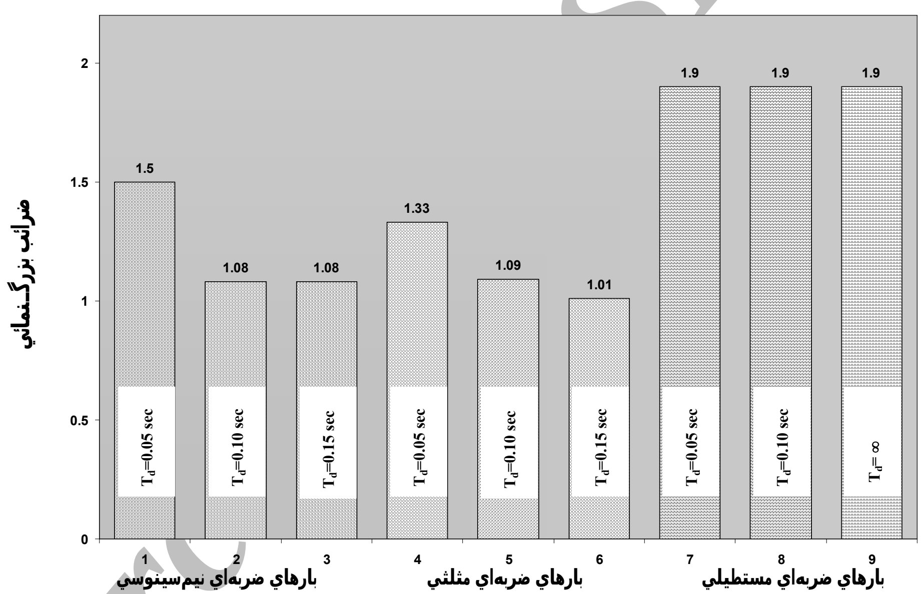
براي بار ضربه‌اي پله‌اي نيز تحليلهاي مشابهي انجام يافته و نتايج تحليلها در جدول (۱) درج گرديده است. با توجه به اين جدول مي‌توان نمودار ميله‌اي افزايش ضريب بزرگنمائي را تحت اثر بارهاي ضربه‌اي با اشكال و پريدهاي مختلف به صورت شكل (۹) در نظر گرفت.



شكل ۷- پاسخ ناپايداري ديناميكي در گره ۶۴ تحت اثر بار ضربه‌اي مثلثي و $T_d = 0.05$ sec



شـكل ۸- پاسخ ناپايداري ديناميكي در گره ۶۴ تحت اثر بار ضربه‌اي مستطيلي و T_d = 0.05 sec



شكل ۹- نمودار ميله‌اي ضرائب بزرگنمائي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي با اشكال و پريدهاي مختلف

همانگونه كه قبلاً اشاره گرديد در مطالعه حاضر قابهاي صنعتي سه بعدي متنوعي تحت اثر بارگذاري‌هاي ضربه‌اي مذكور مورد تحليل قرار گرفته‌اند. نتايج حاصل از تحليل اين قابها كمابيش مشابهت نزديكي با نتايجي دارندكه در مقاله حاضر براي يك قاب صنعتي مشخص ارائه گرديدند. بنابراين بر مبناي نتايج ارائه شده در جدول (۱) ميتوان به بحث و بررسي و نتيجه‌گيري در مورد رفتار ناپايداري ديناميكي سازه‌هاي صنعتي سه‌بعدي پرداخت.

۴- نتيجه‌گيري

در اين مقاله نمودارهاي حاصل از تحليلهاي ناپايداري ديناميكي ساختمانهاي صنعتي فضائي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات نشان داده شده است. مي‌توان تحليلهاي فوق را برروي سازه‌هاي صنعتي به صورت پارامتريك و با ابعاد و شرائط مرزي مختلف و ساير عوامل مؤثر نيز انجام داده و از تجزيه و تحليل نتايج اين تحليلها، توصيه‌هاي عمومي و جامع‌تر طراحي را ارائه نمود. در اين قسمت به ارائه نتايج كلّي حاصل از تحليلهاي انجام شده و ارائه توصيه‌هائي براي طراحي اينگونه سازهها خواهيم پرداخت. اگرچه افق و حوزه اين نتايج و توصيه‌ها محدود

به حالاتي مي‌باشد كه براي تحليل در نظر گرفته شده بودند، ولي احتمال مي‌رود كه اين نتايج و توصيه‌ها داراي حوزه تأثير و كاربرد عمومي‌تر و جامع‌تري باشند. اين نتايج و توصيه‌ها عبارتند از:

-بارهاي ضربه‌اي مستطيلي از نظر ضريب بار ناپايداري ديناميكي، داراي بدترين شرائط جهت ايجاد ناپايداري در سازه‌ها مي‌باشند و برعكس بارهاي ضربهاي مثلثي داراي شرائط مناسبتري هستند. به عبارت ديگر، ضريب بار لازم براي ايجاد ناپايداري ديناميكي در اثر ضربه‌هاي مستطيلي كمتر از بارهاي ضربه‌اي مثلثي مي‌باشد.

-حداكثر تغييرمكان افقي سازه، براي حالتهاي بحراني و غيربحراني، تقريباً در محدوده زماني ۰/۲ الي ۰/۳ ثانيه رخ مي‌دهد و ضريب بار و شكل ضربه اثر چنداني در موقعيت حداكثر تغييرمكان ندارد؛ كه اين زمان حدود ۰/۳ الي ۰/۵ برابر پريد اصلي سازه ميباشد.

-حداكثر تغييرمكان قائم سازه براي حالتهاي بحراني و غيربحراني، همواره در محدوده زمان تداوم بار ضربه‌اي رخ داده و متاثر از شكل ضربه نميباشد.

-بارهاي ضربه‌اي نيم‌سينوسي، عليرغم اينكه در زمانهاي تداوم كوچكتر داراي ضريب بزرگنمائي بزرگتري نسبت به ضربههاي مثلثي ميباشند؛ به علت ايجاد دامنه نوسانات پائينتر و ميرائي سريعتر ارتعاش قائم سازه داراي بهترين پاسخ ديناميكي مي‌باشند.

-توصيه مهم طراحي: با توجه به نتايج به دست آمده از تحليلها، ضربه‌هاي مستطيلي داراي ضريب بزرگنمائي ۱/۹۰، ضربه‌هاي نيم‌سينوسي داراي ضريب بزرگنمائي ۱/۵۰ و ضربه‌هاي مثلثي داراي ضريب بزرگنمائي ۱/۳۳ مي‌باشند ($T_d = 0.05$ sec). در آئين‌نامه‌ها براي اعمال اثر ديناميكي بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات، ضريب واحد ۱/۵۰ براي معادل استاتيكي كليه اشكال بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات توصيه شده است. اگرچه شايد توجيه و مبناي تئوريك ضريب تبديل مذكور متفاوت از توجيه و مبناي تئوريك ضريب بزرگنمائي حاصل از تحليلهاي ناپايداري ديناميكي سازه‌هاي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي ماشين‌آلات باشد، ولي به نظر مي‌رسد با توجه به مطالعات انجام يافته موردي در خصوص قابهاي فضائي تحليل شده، تفكيك اين ضرائب آئين‌نامه‌اي براساس شكل بار ضربه‌اي و زمان تداوم آنها ضرورت داشته باشد.

-برخي از ماشين‌آلات به تغييرمكانهاي ايجاد شده حساس بوده و ميرائي سريع سازه در اينگونه ماشين‌آلات داراي اهميت فراواني مي‌باشد. لذا با توجه به نتايج به دست آمده، ميرائي سازه تحت اثر بارهاي ضربه‌اي نيم‌سينوسي سريعتر از ساير اشكال بارهاي ضربه‌اي بوده و بهتر است در اين نوع ماشين‌آلات از بارهاي ضربه‌اي نيم‌سينوسي استفاده گردد .

مراجع

[۱] برگي، خسرو؛ "ديناميك سازهها"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.

[۲] Bathe, K.J.، ترجمه عابدي، كريم؛ "روشهاي عناصر محدود"، مجلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتي سهند تبريز، ۱۳۷۸.

[۳] Chopra, A.K.، ترجمه طاحوني، شاپور؛ "ديناميك سازهها و تعيين نيروهاي زلزله"، انتشارات علم و ادب، ۱۳۷۷.

[۴] Clough, R. and Panzien, J.، ترجمه گل افشاني، علياكبر؛ "ديناميك سازهها"، انتشارات دانشگاه صنعتي شريف، ۱۳۷۷.

[۵] فخر ياسري، سيروس و پوروشسب، رستم؛ "طرح و محاسبه سالنهاي صنعتي سبك و سنگين"، انتشارات دهخدا، ۱۳۶۵.

[۶] طاحوني، شاپور ؛ "طراحي سازه هاي فولادي"، انتشارات دهخدا، ۱۳۷۰.

[۷] وارسته، مهدي؛ "طرح و محاسبه قابهاي شيبدار"، انتشارات آستان قدس رضوي، ۱۳۷۷.

[۸] وزارت مسكن و شهرسازي، "آئين نامه حداقل بار وارده بر ساختمانها و ابنيه فني (تجديد نظر در استاندارد ۵۱۹)"، انتشارات مديريت، ۱۳۷۹.

[۹] حبشيزاده، محمدحسين؛ "تحليل ناپايداري ديناميكي ساختمانهاي صنعتي تحت اثر بارهاي ضربه‌اي" پايان‌نامه كارشناسي ارشد سازه، دانشگاه صنعتي سهند تبريز، آبانماه ۱۳۸۰.

[۱۰] عابدي، كريم و حبشي‌زاده، محمدحسين "تحليل ناپايداري ديناميكي قابهاي صنعتي دوبعدي تحت اثر

بارهاي ضربه‌اي"، مجله بين‌المللي علوم مهندسي، جلد چهاردهم، شماره ۲، سال ۱۳۸۲.

[11] Bolotin, V.V., "The Dynamic Stability of Elastic Systems," Holden-Day, San Francisco, 1964.

[12] Budiansky, B.,"Dynamic Buckling of Elastic Structures: Criteria and Estimates," Proceeding of the International Conference on Dynamic Stability of Structures, Pergamon, New York; pp. 83-106, 1967.

[13] Budiansky, B. and Roth, R.S. "Axisymmetric Dynamic Buckling of Clamped Shallow Spherical Shells," Collected Papers on Instability of Shell Structures. NASA TN D-1510, 1962.

[14] El Naschie, M.S., "Stress, Stability and Choas in Structural Engineering and Energy Approach," McGraw Hill – Inc, 1990.

[15] Galambos, T.V., "Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures," John Wiely & Sons, Inc. New York, 1998.

[16] Narayanan, R. and Roberts, T.M., "Structures Subjected to Dynamic Loading, Stability and Strength," Elsevier Applied Science Publishers, 1991.

[17] Simitses, G.J., "Dynamic Stability of Suddenly Loaded Structures," Springer, New York, Berlin; Heidelberg, 1990.

[18] Stoker, J.J., "On the Stability of Mechanical Systems," Commun. Pure Appl. Math., VIII, 1955, 133-142.

[19] Stoker, J.J., "Non-Linear Vibrations in Mechanical and Electrical Systems," vol II , Interscience , London , 1950.

[20] Trahair, N.S. and Bradford, M.A., "The Behaviour and Design of Steel Structures to As 4100," E & FN Spon, 1998.

[21] Ziegler, H. "Principles of Structural Stability," Blaisdell, Waltham, Mass, 1968.