بررسي آزمايشگاهي رفتار لرزه‌اي ساختمان‌هاي بتني با سيستم تونلي

ساسان عشقي[i] *؛ عليرضا توافقي جهرمي[ii]

چكيده

امروزه ساختمان‌هاي تونلي در سراسر دنيا مورد استفاده هستند و در پروژه‌هاي انبوه‌سازي كاربرد فراواني دارند. سرعت بالا و كاهش هزينه‌هاي اجرايي باعث شده تا طراحي و اجراي اين ساختمان‌ها بيش از گذشته مورد توجه قرار گيرد. در مقايسه با ساير سيستمهاي سازه‌اي، مطالعات انجام شده بر روي ساختمان‌هاي تونلي بسيار كم است. در آيين‌نامه‌هاي طراحي سازه‌ها در برابر زلزله نيز تمهيدات خاصي براي تحليل و طراحي اين قبيل سازه‌ها در نظر گرفته نشده است. با توجه به لرزه‌خيزي ايران و افزايش استفاده از اين سيستم، نياز است با مطالعات بيشتر، ارزيابي دقيق‌تري از عملكرد لرزه‌اي اين ساختمان‌ها شود. در اين مقاله تلاش شده است با انجام مطالعات آزمايشگاهي بر روي دو نمونه ساخته شده با مقياس يک به پنج، به بررسي رفتار لرزه‌اي اين ساختمان‌ها پرداخته شود. در اين مطالعات آزمايش‌هاي بارگذاري رفت و برگشتي و آزمايش‌هاي ارتعاش اجباري انجام شده و مكانيسمهاي خرابي و رفتار سازه در محدوده غير خطي مطالعه شده است. هم‌چنين خصوصيات لرزه‌اي در محدوده عملكرد خطي مانند زمان تناوب مد اول ارتعاشي و آثار ترک خوردگي بر آن بررسي شده است. در ادامه به مدلسازي عددي نمونه‌ها پرداخته شده و نتايج تحليل‌هاي رايآن‌هاي برابري خوبي با نتايج به‌دست آمده از آزمايش‌ها را نشان مي‌دهد. بر اساس اين مطالعات مشخص شد ساختمان‌هاي تونلي رفتار شكل‌پذيري نشان نداده و در آن‌ها مكانيزم خرابي ترد ديده شد.

كلمات كليدي: ساختمان‌هاي تونلي، آزمايش بارگذاري رفت و برگشتي، آزمايش ارتعاشات اجباري، بتن، غيرخطي، زمان تناوب مد اول

Experimental Study of Concrete Tunnel Form Buildings

Sassan Eshghi, Alireza Tavafoghi Jahromi

ABSTRACT

The tunnel form buildings are used for mass construction in many countries. This construction method is very interesting because of its fast construction technique and low cost. But there is deficiency of researches about tunnel form building in comparison to the other conventional building systems. There are no special requirements for seismic analysis and design of this type of buildings. According to high risk of earthquake and using of this construction method in many projects in Iran, some more studies should be done to evaluate seismic behaviour of tunnel form buildings. In this paper, an experimental program was performed in which the testing of two three-story 1/5-scale of the tunnel form building were carried out to clarify the seismic behaviour of structures. The experimental program consisted of some cyclic loadings and forced vibration tests in order to study the failure mechanisms and the effects of cracking on the fundamental period. The behavior of the specimens was simulated by finite element model and a good correlation was obtained between experimental and numerical results. This study showed that the tunnel form buildings have low level of ductility and brittle failure mechanism was observed.

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۹۰/۵/۵

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۹/۲۱

[i] *نويسنده مسئول و دانشيار، پژوهشگاه بين‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله؛ s.eshghi@iiees.ac.ir

[ii] دكتري مهندسي زلزله، پژوهشگاه بين‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله؛ alireza_tavafoghi@yahoo.com

KEYWORDS : Tunnel Form Buildings, Cyclic Loading, Forced Vibration Test, Concrete, Nonlinear, Fundamental Period

۱- مقدمه

ساختمان‌هاي تونلي امروزه در كشورهاي مختلفي مانند ايران، تركيه، كره و غيره مورد استفاده است. اين ساختمان‌ها به دليل روش ساخت نيمه صنعتي بيش‌تر در انبوه‌سازي‌ها و ساختمان‌هايي كه داراي پلآن‌هاي تيپ هستند كاربرد دارد. در ايران نيز اين روش ساخت از گذشته مورد استفاده بوده است. با توجه به نياز روز افزون به توليد مسكن با روش‌هاي ارزان و سريع، اين سيستم به تازگي در انبوه‌سازي‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

ايده ساخت به روش تونلي به بعد از جنگ جهاني دوم باز مي‌گردد. به دليل آسيب ديدن بسياري از ساختمان‌ها در جنگ جهاني و نياز به تامين مسكن در اوايل دهه ۱۹۵۰، شركت ساختماني اتينورد فرانسه براي اولين بار از اين روش ساخت براي احداث سازه‌هاي خود بهره برد. بعد از آن اين روش به عنوان روش ساخت با استفاده از قالب‌هاي تونلي مورد توجه ساير كشورها نيز قرار گرفت.

در اين روش آرماتوربندي، قالب‌بندي و بتن‌ريزي در محل كارگاه انجام مي‌شود. براي افزايش سرعت اجرايي، از شبكه‌هاي آماده استفاده مي‌شود تا زماني براي آرماتوربندي صرف نشود. براي ساخت ديوارها و دال از دو قالب نيم تونل در كنار هم استفاده مي‌شود و با بتن‌ريزي بين قالب‌هاو روي آن‌ها، ديوارها و سقف در يک مرحله بتن‌ريزي مي‌شوند. با اين روش تعداد نقاط جدا از هم بتن‌ريزي و ايجاد اتصالات سرد در مقايسه با ساير سيستمهاي بتني به حداقل خواهد رسيد. با توجه به اينكه حمل و نقل قالبها بوسيله ماشين آلات انجام مي‌شود و حجم عمليات آرماتوربندي در محل نيز به حداقل ممكن كاهش يافته است، نيروي انساني مورد نياز براي اجراي اين سيستم در مقايسه با ساير روش‌ها بسيار كمتر خواهد بود.

در ساختمان‌هاي تونلي، نيروهاي ثقلي بوسيله سقف به ديوارها منتقل مي‌شوند. در واقع مجموعه سقف و ديوار، سيستم مقاوم در برابر بارهاي ثقلي را تشكيل مي‌دهند. هم‌چنين براي مقابله با نيروهاي جانبي مانند زلزله، سقف و ديوارها سيستمي مقاوم در برابر نيروهاي جانبي را نيز تشكيل مي‌دهند. در حقيقت سقف و ديوارها داراي دو نقش كليدي باربري ثقلي و باربري جانبي بصورت همزمان هستند.

بصورت معمول در ديوارهاي با ضخامت كم، از يک لايه آرماتور براي مسلح كردن استفاده مي‌شود. با توجه به وقت‌گير بودن اجراي اجزاي مرزي در ديوارها و كاهش سرعت اجرايي، از طراحي و اجراي آن‌ها صرف‌نظر مي‌شود. بعلاوه ضخامت ديوارها با توجه به شكل قالب ثابت بوده و اجراي اجزاي مرزي با ضخامت بيشتر نسبت به ديوار، حذف خواهد بود. اين عوامل باعث شده تا محصور شدگي براي بتن ديوارها تعريف نشود.

در طراحي لرزه‌اي اين ساختمان‌ها بصورت معمول از روش‌هاي مبتني بر نيرو استفاده مي‌شود. در اين روش‌ها با محاسبه زمان تناوب مد اول نوساني و با كمک ضريب رفتار مناسب، تخميني از نيروي زلزله به دست مي‌آيد كه به كمک آن مي‌توان طراحي سازه را انجام داد. تحقيقات جديد نشان مي‌دهند در ساختمان‌هاي تونلي فرمول‌هاي موجود در آيين‌نامه، تخمين مناسبي از زمان تناوب مد اول ارتعاشي را نتيجه نمي‌دهد. هم‌چنين ضريب رفتار مناسبي نيز براي اين ساختمان‌ها تعيين نشده است. درحالي‌كه اين دو عامل نقش كليدي در تخمين نيروي زلزله و طراحي لرزه‌اي دارند.

۱-۱- مروري بر ادبيات فني موجود

مطالعات انجام شده را مي‌توان در قالب دو موضوع اصلي طبقه‌بندي نمود. ۱) تخمين مناسب از زمان تناوب مد اول ارتعاشي و ۲) تخمين مناسب از ضريب رفتار.

محققان زيادي براي يافتن فرمول‌هاي تجربي در تخمين زمان تناوب مد اول ارتعاشي ساختمان‌هاي پانلي بتني تلاش كرده‌اند. Goel و Chopra در مطالعات خود با مقايسه اطلاعات بدست آمده از تعدادي ساختمان ابزار گذاري شده بعد از زلزله‌هاي مختلف در كاليفرنيا و مقايسه آن‌ها با فرمول‌هاي پيشنهادي، نشان دادند كه فرمول‌هاي تجربي آئين نامه براي محاسبه زمان تناوب مد اول ارتعاشي، بعضي مواقع خطاهاي زيادي مي‌دهد. اين موضوع باعث تخمين نامناسب از نيروي زلزله خواهد شد[۱۰].

Lee و همكارانش با مطالعه موردي پنجاه ساختمان ابزارگذاري شده، فرمولي را پيشنهاد دادند تا تقريب مناسب‌تري از زمان تناوب مد اول به دست آيد [۱۳]. در ادامه اين مطالعات Balkaya و Kalkan نيز تلاش‌هايي را براي بهبود اين فرمول‌ها انجام دادند. آن‌ها با مطالعه عددي شانزده پلان مختلف با ارتفاعات دو، پنج، ده، دوازده و پانزده طبقه و مقايسه نتايج با فرمول‌هاي آيين‌نامه‌اي، فرمول تجربي جديدي را براي تخمين زمان تناوب مد اول ارتعاشي پيشنهاد دادند [۵]. آن‌ها مطالعات ديگري را نيز در سال ۲۰۰۴ ميلادي انجام دادند و با گسترش مدلهاي عددي و افزايش ارتفاع ساختمان‌ها تا بيست طبقه،

فرمول ساده‌تري را نيز پيشنهاد نمودند [۷].

مطالعه ديگري نيز توسط توافقي و عشقي در سال ۲۰۰۸ ميلادي انجام شد و نشان داده شد كه به غير از ارتفاع، بكارگيري ساير عوامل مورد بررسي توسط محققان گذشته، طور حتم به نتايج دقيق‌تري منجر نمي‌شود. در اين مطالعات نشان داده شد كه استفاده از عامل ارتفاع ساختمان، مناسب‌ترين تقريب را براي تخمين زمان تناوب مد اول ساختمان نتيجه مي‌دهد [۱۵].

زمينه ديگر تحقيقات، بر روي محاسبه ضريب رفتار ساختمان‌هاي تونلي متمركز شده است. Balkaya و Kalkan با انجام تحليل‌هاي عددي بر روي يک مدل سه بعدي در دو و پنج طبقه تلاش نمودند تا نشان دهند كه تحليل‌هاي دو بعدي و سه بعدي برخلاف سيستمهاي قابي، در سيستمهاي تونلي نتايج متفاوتي را نشان مي‌دهند [٦]. در اين مطالعات اثر اتصال دال به ديوار در توزيع نيروي جانبي مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد اين اتصال نقش مهمي در انتقال و توزيع نيرو بين ديوارهاي برشي دارد. در سال ۲۰۰٤ ميلادي نيز با انجام تحليل‌هاي بر روي همان مدل، تلاش نمودند تا ضريب رفتاري را بر مبناي حاصل ضرب سه پارامتر R_μ (ضريب شكل‌پذيري)، R_S (ضريب افزايش مقاومت) و R_R (ضريب فراواني) طبق (۱) ارايه دهند [۷].

$$R = R_\mu R_S R_R \qquad (۱)$$

در اين مطالعات ضريب فراواني برابر با واحد در نظر گرفته شده و ضريب افزايش مقاومت و شكل‌پذيري به ترتيب برابر با ۱/۹٦ و ۲/۰ برآورد شدند كه در نتيجه ضريب رفتار برابر با ٤ بدست آمده است.

در كنار مطالعات عددي، آزمايشي توسط Yüksel و Kalkan در سال ۲۰۰۷ ميلادي انجام شد. اين آزمايش بر روي دو نمونه ساخته شده از يک واحد تونلي با مقياس يک به پنج در چهار طبقه انجام شد [۱۸]. آرماتورهاي مورد استفاده در ديوارها ۰/۱۵ درصد سطح مقطع بوده و بارگذاري بر روي دو نمونه در طبقه بالايي بصورت رفت و برگشتي انجام شد. ديوارها يكبار در راستاي قوي و يكبار در راستاي ضعيف بارگذاري شد. در اين آزمايش‌ها خرابي بسيار ترد در پاي ديوار رخ داده است. سپس مدلسازي اين آزمايش انجام شد و به كمک يک مدل اجزاي محدود، نمونه‌هاي آزمايشگاهي مورد مطالعه عددي قرار گرفت. نتايج آزمايش‌ها با نتايج تحليل‌هاي عددي برابري قابل قبولي دارند هم‌چنين موقعيت ترک‌ها، بار نهايي و تغيير مكان در مدلهاي عددي تقريب مناسبي را نشان مي‌دهد.

Yüksel و Kalkan مطالعات خود را در سال ۲۰۰۸ ميلادي ادامه دادند. آن‌ها مدلهاي ساخته شده براي آزمايش را دوباره با تغيير مشخصات آرماتورهاي طولي ديوارها تحليل نموده و اثر تغيير درصد آرماتورهاي طولي را مطالعه كردند [۱۲].

مطالعه ديگري توسط عشقي و توافقي در سال ۲۰۱۰ ميلادي انجام شد كه در آن يک پلان پنج طبقه مورد بررسي قرار گرفته و ضريب رفتار براي اين پلان خاص محاسبه شده است [۹].

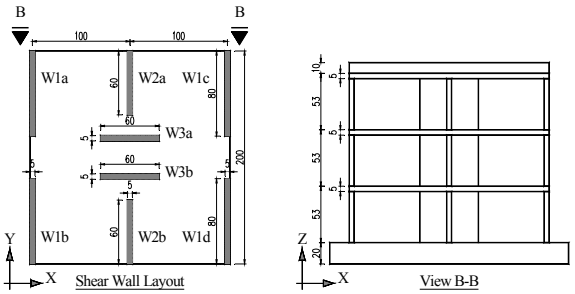
بصورت خلاصه مطالعات انجام شده بر روي ضريب رفتار سازه‌هاي تونلي بسيار كم بوده و فقط به موارد اشاره شده محدود مي‌شود. همين موضوع نشان‌دهنده لزوم وجود مطالعات كلي‌تري است كه بتوان ضريب رفتار را با اطمنيان بهتري در فرايند طراحي لرزه‌اي استفاده نمود.

۲- انجام مطالعات آزمايشگاهي

براي درک بهتر از رفتار لرزه‌اي ساختمان‌هاي تونلي تحت اثر بارهاي رفت و برگشتي، دو نمونه از سازه‌هاي تونلي مورد مطالعه آزمايشگاهي قرار گرفته است.

با توجه به امكانات موجود، دو نمونه با مقياس يک به پنج از ساختمان‌هاي تونلي در محل آزمايشگاه سازه پژوهشگاه بين‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله ساخته شده و مجموعه آزمايش‌ها بر روي اين نمونه‌ها انجام شد. ساخت نمونه‌ها با مقياس بزرگتر و تعداد بيشتر مي‌تواند نتايج دقيق‌تري را همراه داشته باشد كه در عمل با توجه به امكانات موجود غير ممكن بوده است.

ابعاد نمونه‌ها طوري انتخاب شده كه در ضمن حفظ مدل سه بعدي و ايجاد المان‌هاي مختلف براي بررسي رفتار لرزه‌اي دقيقتر، در كوچک‌ترين ابعاد بتوان مدل واقعي از اين ساختمان‌ها احداث شود. پلان انتخاب شده، شباهت زيادي به پلان‌هايي دارد كه در حال حاضر براي ساخت اين ساختمان‌ها استفاده مي‌شود. از نظر ارتفاع، نمونه‌ها در سه طبقه احداث شد تا با در نظر گرفتن محدوديت‌هاي آزمايشگاه، برآورد مناسبي از عملكرد دال‌ها و ديوارها نشان دهد. پلان و مقاطع نمونه‌هاي ساخته شده در شكل (۱) نشان داده شده است[۱].



شكل (۱): نماي كلي و ابعاد و اندازه نمونه‌هاي آزمايشگاهي

به طور كلي در آزمايش‌هاي انجام شده بر روي نمونه‌ها دو هدف اصلي وجود دارد. هدف اول بررسي رفتار غير خطي اين ساختمان‌ها در مقابل بارهاي رفت و برگشتي بوده تا اول مكانيسم عملكرد اين سازه‌ها، نحوه توزيع بار و شيوه خرابي مورد مطالعه قرار گيرد و دوم مبناي مناسبي براي تائيد درستي مدلسازيهاي رايانه‌اي در بخشهاي آينده مطالعات باشد.

هدف دوم بررسي رفتار اين ساختمان‌ها در محدوده خطي و شناسايي رفتار ديناميكي آن‌ها بوده است. در اين راستا انجام آزمايش‌هايي براي محاسبه زمان تناوب ساختمان در راستاي طولي و عرضي، محاسبه تغييرات زمان تناوب با تغيير جرم سازه، تفاوت زمان تناوب سازه ترک خورده و ترک نخورده و محاسبه اشكال مدهاي نوساني بوده است.

با توجه به محدود بودن تعداد نمونه‌ها، اين اهداف در قالب آزمايش‌هايي بر روي دو نمونه صورت گرفته است. ابتدا نمونه اول با ابزارگذاري در راستاي محور X در محدوده خطي مطالعه شده است و مدهاي نوساني در اين راستا به همراه مدهاي پيچشي تحريک شده است. هم‌چنين براي تكميل اين آزمايش‌ها از ضربه چكش نيز در مطالعات ارتعاش اجباري استفاده شده است. بعد از اتمام اين مطالعات، نمونه اول بوسيله جک هيدروليكي ۲۵ تني تحت بارگذاري رفت و برگشتي قرار گرفته و رفتار سازه در محدوده غير خطي بررسي شده است.

بعد از اعمال بار و ترک خوردن نمونه اول، ابزارگذاري مجددي روي آن انجام شده و مطالعات ارتعاشات اجباري بر روي نمونه ترک خورده انجام شده است. خلاصه آزمايش‌ها صورت گرفته بر روي نمونه اول را مي‌توان در قالب جدول (۱) ارايه نمود.

جدول (۱): خلاصه آزمايش‌هاي انجام شده بر روي نمونه اول

نام آزمايش	نوع آزمايش
FV-SP1-X-NM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-NM-SY	ارتعاشات اجباري
CL-SP1-1	بارگذاري رفت و برگشتي
FV-SP1-X-CNM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP1-X-CNM-SY	ارتعاشات اجباري

FV-SP1-X-NM-S1,S2: اين آزمايش بر روي نمونه اول انجام شده كه بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. دو دستگاه ارتعاش‌دهنده بر روي بام نصب شده‌اند و ساختمان را در راستاي X بصورت هم‌فاز مرتعش نمودند. سه شتاب‌نگاشت بر روي هر طبقه مدل و فنداسيون نمونه نصب شده و در مجموع دوازده شتاب‌نگاشت، حركات ساختمان را در راستاي X ثبت نمودند. دستگاه‌هاي ارتعاش‌دهنده در مدت زمان يک دقيقه و چهل و پنج ثانيه فركانس‌هاي ۱ تا ۱۰۰ هرتز را جارو كرده‌اند. دستگاه نيروسنج متصل به ارتعاش‌دهنده نيز ميزان نيروي وارد به سازه توسط هر كدام از آن‌ها را ثبت نموده است.

FV-SP1-X-NM-ST1,ST2: مشابه آزمايش قبل، اين آزمايش بر روي نمونه اول انجام شده كه بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. با اين تفاوت كه دو دستگاه ارتعاش‌دهنده با اختلاف فاز نود درجه ساختمان را در راستاي X مرتعش نمودند.

FV-SP1-X-NM-H1,H2: اين آزمايش بر روي نمونه اول انجام شده كه بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي

آن نبوده است. توسط ضربه چکش به بام ساختمان بر روي محور تقارن در راستاي X ساختمان مرتعش شده است.

FV-SP1-X-NM-H3,H4: ايـن آزمـايش بـر روي نمونـه اول انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سـازه‌اي روي آن نبوده است. توسط ضربه چکش به بـام سـاختمان بـر روي گوشه دال در راستاي X ساختمان مرتعش شده است.

FV-SP1-X-NM-SY: اين آزمايش بر روي نمونه اول انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. توسط ضربه چکش به ميانه ارتفاع ديواره مياني در راستاي X ساختمان مرتعش شده است. از آنجايي که مجموع شتاب‌نگاشتها از راه دو کانال ارتعاشات را ثبت نمودند، از اين آزمايش براي بدست آوردن اختلاف فاز در ثبت نتايج توسط هر يک از کانال‌ها استفاده شده است. دستگاه نيروسنج نيز ميزان نيروي وارد به سازه توسط چکش را ثبت نموده است.

FV-SP1-X-CNM-S1,S2: اين آزمايش بر روي نمونه اول پس از بارگذاري رفت و برگشتي انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است.

FV-SP1-X-CNM-ST1,ST2: اين آزمايش بر روي نمونه اول بعد از بارگذاري رفت و برگشتي انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. با اين تفاوت که دو دستگاه ارتعاش‌دهنده با اختلاف فاز نود درجه ساختمان را در راستاي X مرتعش نمودند.

FV-SP1-X-CNM-H1,H2: اين آزمايش بر روي نمونه اول بعد از بارگذاري رفت و برگشتي انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. توسط ضربه چکش به بام ساختمان بر روي محور تقارن در راستاي X ساختمان مرتعش شده است.

FV-SP1-X-CNM-H3,H4: اين آزمايش بر روي نمونه اول بعد از بارگذاري رفت و برگشتي انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. توسط ضربه چکش به بام ساختمان بر روي گوشه دال در راستاي X ساختمان مرتعش شده است.

FV-SP1-X-CNM-SY: اين آزمايش بر روي نمونه اول بعد از بارگذاري رفت و برگشتي انجام شده که بارگذاري قائمي غير از بار اجزاي سازه‌اي روي آن نبوده است. توسط ضربه چکش به ميانه ارتفاع ديواره مياني در راستاي X ساختمان مرتعش شده است.

آزمايش‌هاي انجام شده بر روي نمونه دوم مشابه آزمايش‌هاي نمونه اول است با اين تفاوت که براي بررسي خصوصيات ديناميکي، آزمايش‌هاي ارتعاشات اجباري در دو جهت X و Y انجام شده است و در هر جهت نمونه با وجود جرم‌هاي اضافي نيز مطالعه شده است. جرم‌هاي اضافي در تمام طبقات ساختمان به ميزان ۱۰۰ کيلوگرم در هر متر مربع و توسط قطعات سربي به نمونه اعمال شده‌اند.

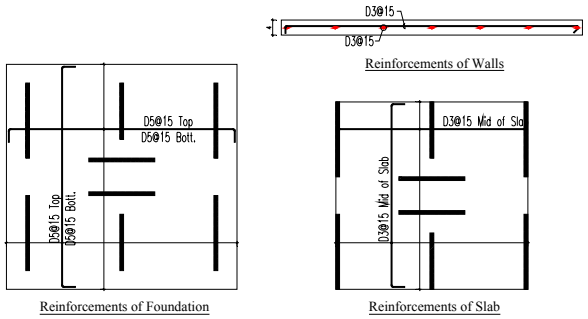
بعد از اعمال بار و ترک خوردن نمونه دوم (تا مرز ترک خوردگي ابتدايي)، ابزارگذاري مجددي روي نمونه دوم انجام شد و مطالعات ارتعاشات اجباري بر روي نمونه ترک خورده انجام شده است تا زمان تناوب ساختمان بعد از ترک خوردن نيز مطالعه شود. بعد از انجام اين آزمايش‌ها، بارگذاري رفت و برگشتي ادامه يافته تا نمونه به مرز خرابي رسيد. خلاصه آزمايش‌هاي انجام شده بر روي نمونه دوم را مي‌توان در قالب جدول (۲) ارايه نمود.

جدول (۲): خلاصه آزمايش‌هاي انجام شده بر روي نمونه دوم

نام آزمايش	نوع آزمايش
FV-SP2-X-NM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-NM-SY	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-AM-SY	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-NM-SY	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-S2	ارتعاشات اجباري

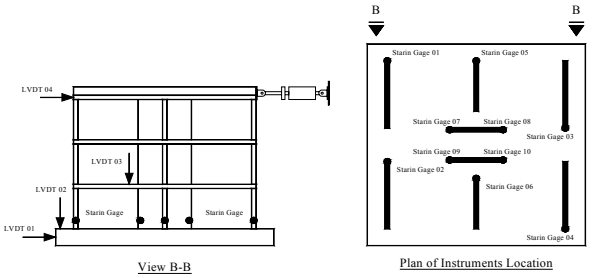
نام آزمايش	نوع آزمايش
FV-SP2-Y-AM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-Y-AM-SY	ارتعاشات اجباري
CL-SP2-1	بارگذاري رفت و برگشتي
FV-SP2-X-CNM-S1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-S2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-ST1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-ST2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-H1	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-H2	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-H3	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-H4	ارتعاشات اجباري
FV-SP2-X-CNM-SY	ارتعاشات اجباري
CL-SP2-2	بارگذاري رفت و برگشتي

براي ثابت نمودن نمونه‌ها به كف صلب آزمايشگاه، هر نمونه بوسيله ٢٤ بولت نمره ٢٥ به كف متصل شده‌اند. مشخصات مصالح بتن و آرماتورهاي مورد استفاده شده مقياس نشده‌اند و فقط مقياس ابعادي در انجام آزمايش در نظر گرفته شده است. هرچند براي بتن‌ريزي در ضخامت كم ديوارها و دال‌ها از دانه‌بندي‌هاي كوچكتر استفاده شده و بيش‌ترين ابعاد درشت دانه به ١/٢٥ سانتي‌متر محدود شده است. هر نمونه روي شالوده مجزا بنا شده و ساير مشخصات مدلهاي آزمايشگاهي در شكل (٢) نشان داده شده است.



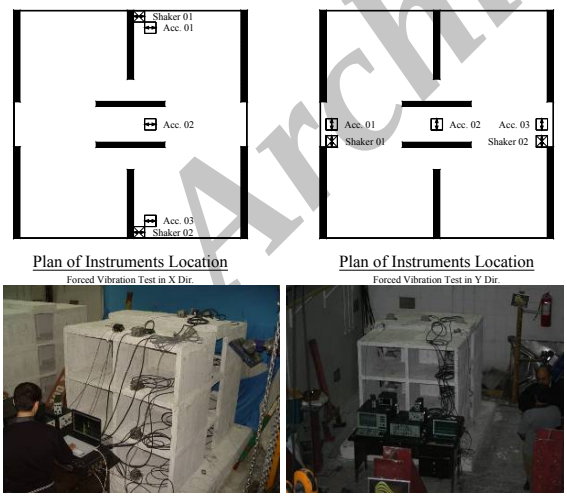
شكل (٢): مشخصات آرماتورگذاري در نمونه‌هاي آزمايشگاهي

هر دو نمونه مشابه هم بوده و بصورت مشابه بارگذاري شده‌اند تا نتايج قابل مقايسه باشند. براي اعمال بارهاي رفت و برگشتي به نمونه‌ها از ورق‌هاي فولادي در دو انتهاي نمونه استفاده شده كه به كمك چهار بولت نمره ٢٥ در طول نمونه بهم متصل شده‌اند. براي مطالعه دقيقتر مدل، به جز اطلاعاتي كه توسط جك هيدروليكي (نيرو – تغيير مكان) در اختيار بوده، چهار عدد LVDT (تغيير مكان‌سنج) براي بررسي تغيير مكان بام، تغيير مكان فنداسيون (براي بدست آوردن خطاي لقي‌هاي احتمالي) و تغيير مكان دال در طبقه اول روي نمونه نصب شده‌اند. هم‌چنين در محل اتصال ديوارها به فنداسيون، كرنش‌سنج‌هايي به آرماتورهاي انتهايي هر ديوار متصل شده تا تغييرات كرنش در آرماتورها، در حال بارگذاري مطالعه شوند. محل نصب LVDT و پلان جاگذاري كرنش‌سنج‌ها در شكل (٣) نشان داده شده است.



شكل (٣): موقعيت ابزارگذاري در نمونه‌هاي آزمايشگاهي

آزمايش ارتعاشات اجباري به كمك دو دستگاه ارتعاش دهنده و ١٢ حس‌گر شتاب‌نگاشت انجام شد و چيدمان دستگاه‌هاي اشاره شده در شكل (٤) نشان داده شده است.



شكل (٤): چيدمان ابزار اندازه‌گيري در نمونه‌هاي آزمايشگاهي براي آزمايش‌هاي ارتعاشات اجباري.

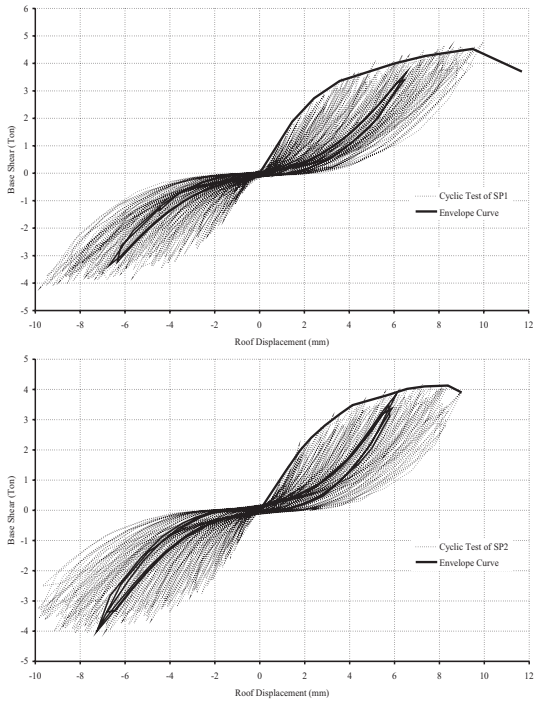
٣- نتايج آزمايش‌ها بارگذاري رفت و برگشتي

پس از شروع بارگذاري ترك‌هاي ابتدايي در محل اتصال

دال به ديوار طبقه اول در محل ديوارهاي W1 اتفاق افتاد. هم‌چنين با افزايش تغيير مكان، اين ترک‌ها به محل اتصال دال به ديوار طبقات دو و سه نيز گسترش يافت. با افزايش تغيير مكان، ترک‌هايي نيز در پاي ديوار W3 در محل اتصال به فنداسيون بوجود آمدند. همزمان با ظاهر شدن اين ترک‌ها، اتصالات دال به ديوار در محل ديوار W2 نيز دچار ترک خوردگي شدند. در تغيير مكان معادل ۵ ميلي‌متر همه اتصالات دال به ديوار مربوط به ديوارهاي W1 و W2 در تمام طبقات، اتصال ديوارهاي W1 به فنداسيون و قسمتي از اتصال ديوار W3 به فنداسيون دچار ترک خوردگي شدند. با افزايش تغيير مكان، اتصال دال به ديوار در محل ديوار W3 دچار پانچ شده و حد فاصل دو ديوار W3aو W3b ترک خورد. اين ترک خوردگي به تدريج ادامه يافته و امتداد اين ترک‌ها در كل دال نمايان شد. اتصال دال به ديوار در محل ديوار W2 نيز روي دال ترک خورد. محل اين ترک‌ها با فاصله از ديوار روي دال اتفاق افتاد. بعلاوه جداشدگي ديوار W3 از فنداسيون گسترش يافته، بطوري‌كه بيشتر ديوار از روي فنداسيون جدا شد. غير از ترک‌هايي كه در محل اتصال دال به ديوار وجود داشته، در محل اتصال، اين ترک‌ها در دال طبقات نيز اتفاق افتاد. به‌طوري‌كه هر محل اتصال هم از ناحيه ديوار دچار ترک خوردگي شده و هم از ناحيه دال.

در تغيير مكان معادل ۱۰ ميلي‌متر، همه نقاط اتصال، هم در ديوار و هم در دال دچار ترک خوردگي شدند. بعلاوه محل اتصال ديوار به فنداسيون ديوارها نيز ترک خورده و در اين زمان، دال طبقه اول نيز از محل اتصال به ديوار W3 به طور كامل پانچ مي‌شود. در حقيقت مكانيسم خرابي نهايي را مي‌توان در سه مورد خلاصه نمود :الف) مفصل شدن اتصال ديوارها به فنداسيون. ب) پانچ شدن اتصال دال به ديوار در محل اتصال ديوار W3 در طبقه اول. ج) مفصل شدن اتصالات دال به ديوار در تمامي اتصالات. اين موارد درشكل (۵) آورده شده است. نمودار نيرو تغيير مكان بام براي نمونه‌ها در شكل (٦) نشان داده شده است.

شكل (۵): نحوه خرابي در اتصال ديوار به فنداسيون، اتصالات دال به ديوار و دال طبقه اول در نمونه‌هاي آزمايشگاهي.



شكل (٦): نمودار نيرو- تغيير مكان بام براي نمونه‌هاي اول و دوم.

براي بررسي درستي مدلسازيهاي عددي، نمونه‌هاي آزمايشگاهي بوسيله نرم‌افزار TNO Diana مدلسازي شدند. براي مدلسازي رفتار بتن از مدل نرم‌شدگي Hordijk استفاده شده كه در آن عامل G_f به‌عنوان انرژي آزاد شده ترک، h_{cr} به عنوان عرض حداكثر ترک و f_t به عنوان تنش كششي حداكثر، عوامل اصلي به شمار مي‌آيند [۱۱]. براي مدل رفتاري بتن در فشار نيز از مدل رفتاري بتن محصور نشده كه توسط Popovics ارايه شده و توسط Thorenfeldt تكميل شد استفاده شده است [١٦]. در مدلسازي آرماتورها از مدلهاي پلاستيک ون ميسس استفاده شده است. آرماتورهاي بصورت لايه‌اي تعريف شده كه پيوند كاملي بين آن‌ها و بتن در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدلسازيهاي عددي در جدول (۳) و جدول (٤) ارايه شده است.

براي رسيدن به نتيجه مناسب، چهار مدل عددي با نسبت‌هاي مختلف از h_{cr} و G_f انتخاب شده است كه مدل شماره دو برابري بهتري با نمونه‌هاي آزمايشگاهي دارد. مشخصات هر كدام از مدل‌هاي عددي در جدول (۵) آورده شده است. نمودار نيرو تغيير مكان بام، حاصل از آزمايش و نتايج مدل‌هاي عددي در شكل (۷) نشان داده شده است.

جدول (۳): مشخصات مصالح فولاد مورد استفاده در مدلسازي عددي نمونه‌هاي آزمايشگاهي (سيستم آحاد SI).

مدول يانگ	۱/۸۷e۱۱
نسبت پواسون	۰/۳۰
F_y	۲/۸e۸
F_u	۴/۳e۸
ε_u	۰/۱
ون ميسس	پلاستيسيته
پيوستگي كامل	پيوند
سخت شدگي كرنشي	سخت شدگي

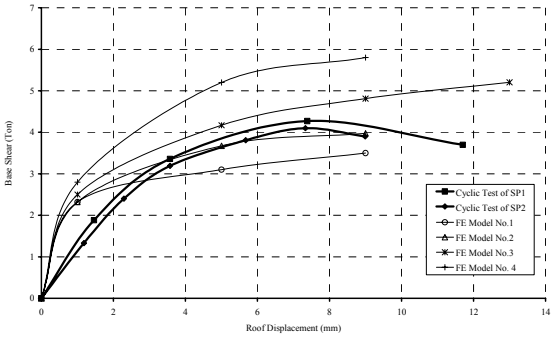
جدول (۴): مشخصات مصالح بتن مورد استفاده در مدلسازي عددي نمونه‌هاي آزمايشگاهي (سيستم آحاد SI).

مدول يانگ	۲۳۰۰۰
نسبت پواسون	۰/۲۰
تنش كششي	۱/۸
تنش فشاري	۳۰
انرژي آزاد شده ترک	(جدول (۵)) G_f
عرض ترک	(جدول (۵)) h

جدول (۵): مشخصات تحليل‌هاي انجام شده در مدلسازي عددي نمونه‌هاي آزمايشگاهي (سيستم آحاد SI).

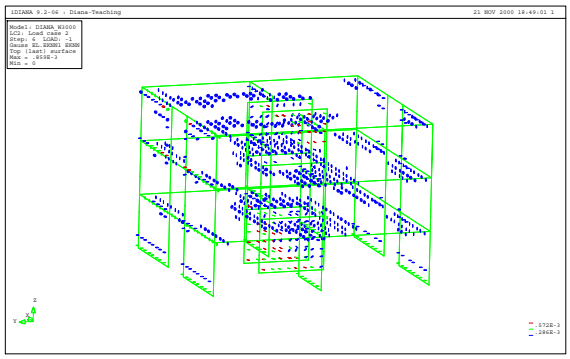
شماره مدل	G_f	h
N0. 1	۲۵	۱
N0. 2	۵۰	۱
N0. 3	۷۵	۱
N0. 4	۱۰۰	۱

در مدلسازيهاي عددي از المان ۸ نقطه‌اي صفحه‌اي استفاده شده كه براي انتگرال‌گيري از ۸ نقطه گاوس كمک گرفته مي‌شود. در مجموع ۸۲۲ المان در مدلسازي‌هاي عددي بكار رفته است.



شكل (۷): نمودار نيرو تغيير مكان بام در نمونه‌هاي آزمايشگاهي و نتايج حاصل از تحليل‌هاي عددي

نتايج بدست آمده از تحليل رايانه‌اي مدل شماره دو برابري قابل قبولي با نتايج آزمايشگاهي نشان مي‌دهد. همانطور كه در شكل (۸) نشان داده شده، ترک‌هاي پاي ديوارها، محل اتصال دال به ديوار و ترک‌هاي روي دال در مدلهاي رايانه‌اي نيز مشهود است [۱۴].



شكل (۸): الگوي ترک خوردگي ديوارها و دال‌ها در مدل رايانه‌اي

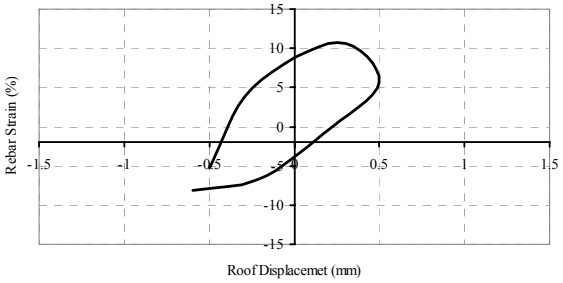
همان‌طور كه در شكل (٦) نشان داده شده است، منحني هيستررزيس بدست آمده از آزمايش‌هاي رفت و برگشتي نشان مي‌دهد كه در هر دوره بارگذاري، مقدار انرژي جذب شده توسط سازه بسيار اندک است. علت اين امر را مي‌توان در موارد زير خلاصه نمود:

الف) با توجه به مكانيسمهاي خرابي اشاره شده در قسمت قبل، خرابي‌هاي اوليه ناشي از ترک خوردگي اتصالات دال به ديوار بصورت خمشي است. با توجه به موقعيت قرارگيري آرماتورها دال و ديوار در يک لايه، در عملكرد خمشي آرماتورها مشاركت چنداني نخواهند داشت و با توجه به بارگذاري رفت و برگشتي، تار پاييني و بالايي در اعضاي خمشي هر دو دچار ترک خوردگي شده و در عمل سخت‌شدگي آرماتور و جذب انرژي آن‌ها، نقش چنداني در منحني هيستررزيس نخواهد داشت.

ب) هيچ يک از اتصالات (در محل اتصال دال به ديوار و ديوار به فونداسيون) شكل‌پذيري نداشته‌اند. در حقيقت به دليل شكل آرماتورگذاري در دال و ديوار، تمهيدي براي تامين شكل‌پذيري در آن‌ها وجود ندارد. در مقايسه با ساير سازه‌ها كه در اتصالات قدرت جذب انرژي بالايي وجود دارد (در اتصال تير به ستون در سازه‌هاي بتني با جزئيات خاموت‌گذاري يا چشمه اتصال در سازه‌هاي فولادي) در عمل اتصال شكل‌پذيري در سازه وجود ندارد تا بتواند در بارهاي رفت و برگشتي با ايجاد تغيير شكل‌هاي ماندگار جذب انرژي منحني هيستررزيس را افزايش دهد.

ج) در اتصال ديوار W3 به فونداسيون نيز كه بصورت خمشي عمل نموده، جزئياتي از شكل‌پذيري رعايت نشده است. به عنوان مثال، محصور نشدن آرماتورها در اجزاي مرزي، يا نبود اجزاي مرزي در لبه ديوارها، باعث شده كه در بارگذاري رفت و برگشتي، بتن در كرنش‌هاي پايين‌تر دچار ترک خوردگي شده و كشش و فشار ايجاد شده يكباره به آرماتور منتقل شده است. منحني ازدياد طول آرماتور در پاي ديوار W3 شكل (۹) نشان مي‌دهد كه در تغيير مكان جانبي نمونه، كرنش آرماتورهاي طولي در تغيير شكل‌هاي حدود ۲ ميلي‌متر بام، به حد جاري شدن رسيده‌اند. با افزايش تغيير مكان جانبي، آرماتور ديوارها پاره شده و در منحني هيسترزيس بدون اثر خواهند بود.

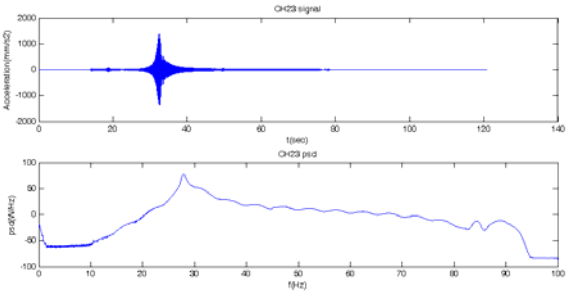
ساير ديوارها كه در جهت ضعيف بارگذاري شده‌اند، به علت قرارگيري آرماتورها در لايه مياني، شكل‌پذيري چنداني ندارند. در اين ديوارها پس از خرد شدن بتن در فشار، در عمل بدون شكل‌پذيري چنداني، مفصل پلاستيک در پاي ديوار توانايي جذب انرژي چنداني را نخواهد داشت.



شكل (۹): تغييرات كرنش آرماتورهاي طولي در ديوار W3

٤- نتايج آزمايش‌هاي ارتعاشات اجباري

در انجام آزمايش‌هاي ارتعاشات اجباري، به كمک نيروسنج متصل به دستگاه ارتعاش‌دهنده، مقدار نيروي وارد به سازه قابل ثبت بوده است. دوازده شتاب‌سنج در چهار تراز (يک تراز روي فنداسيون و سه تراز در طبقات) مقدار شتاب را در نقاط مختلف اندازه‌گيري نمودند تا اطلاعات موجود براي انجام آناليزهاي آينده و بررسي مدل در محدوده خطي قابل دستيابي باشد. در شكل (۱۰) خروجي شتاب‌سنج دوم روي بام و تابع چگالي فركانسي آن در آزمايش FV-SP1-X-NM-S1 از آزمايش ارتعاش اجباري روي نمونه اول به عنوان نمونه ارايه شده است.



شكل (۱۰): آزمايش FV-SP1-X-NM-S1، شتاب‌سنج دوم روي طبقه بام و تابع چگالي فركانسي.

با توجه به آزمايش‌ها ارتعاشات اجباري انجام شده، امكان محاسبه زمان تناوب مد اول سازه وجود دارد. از طرف ديگر زمان تناوب مدهاي نوساني را از نتايج تحليل مي‌توان استخراج نمود و مقايسه اين اعداد نشان‌دهنده دقت مدلسازي عددي در حوزه رفتار خطي سازه است.

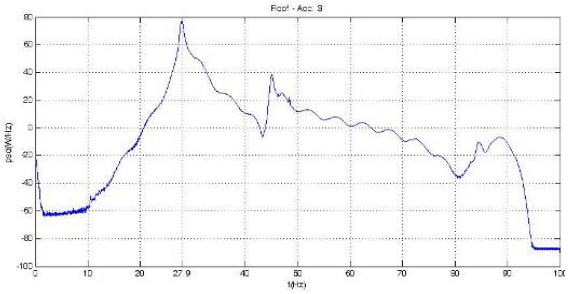
براي استخراج زمان تناوب مدهاي نوساني سازه از روي نتايج آزمايش ارتعاشات اجباري، روش‌هاي گوناگوني وجود دارد. روش‌هاي موجود را مي‌توان در دو دسته عمومي تقسيم بندي نمود: دسته اول روش‌هايي هستند كه در آن‌ها با داشتن ارتعاشات ورودي و خروجي بصورت همزمان، به شناسايي رفتار سازه پرداخته شده است. به اين روش‌ها در اصطلاح شناسايي مدها از روي ورودي – خروجي[1] گفته مي‌شود. دسته دوم روش‌هايي هستند كه فقط با داشتن ارتعاشات خروجي به شناسايي رفتار سازه پرداخته مي‌شود. به اين روش‌ها اصطلاحاً شناسايي مدها از روي خروجي[2] گفته مي‌شود.

براي استفاده از روش اول و لرزاندن سازه از وسايل مختلفي مانند چكش يا دستگاه‌هاي ارتعاش‌دهنده در ابعاد مختلف استفاده مي‌شود. دسته دوم روش‌ها براي مواردي كاربرد دارد كه امكان ايجاد ارتعاشات اجباري و ثبت آن‌ها وجود ندارد. بسته به بزرگي ابعاد سازه شايد نتوان دستگاه لرزاننده مناسب را در محل مناسب نصب نمود. يكي ديگر از محدوديت‌هاي موجود مربوط به چگونگي بهره‌برداري سازه است. به عنوان مثال شايد نتوان بهره‌برداري يک پل را براي نصب لرزاننده و ثبت ارتعاشات متوقف نمود. در اين سازه‌ها شناسايي ارتعاشات ورودي نيز امكان‌پذير نيست. در حقيقت ارتعاشات ورودي، اجباري نخواهد بود.

يكي از ساده‌ترين روش‌هاي نوع دوم براي شناسايي زمان تناوب سازه روش شناسايي نقاط بيشينه[3] ناميده مي‌شود. در زمان ارتعاش مدهاي نوساني، در صورتي كه فركانس بار ورودي با فركانس ارتعاش اصلي سازه هم‌خواني داشته باشد،

پاسخ‌ها دچار تشديد خواهند شد. از اين رو درصورتي كه بارگذاري ورودي بصورت جاروي فركانسي انجام شده باشد، با مطالعه پاسخ خروجي سازه و تبديل پاسخ از حوزه زماني به حوضه فركانسي، مي‌توان فركانس تشديد يافته را ديد.

براي محاسبه زمان تناوب اصلي سازه، از همين روش استفاده شده است. به عنوان مثال پاسخ بدست آمده از آزمايش ارتعاشات اجباري در نمونه اول در شرايطي كه نمونه سالم بوده و ارتعاشات بصورت جاروي فركانسي در جهت محور X صورت گرفته، ثبت شده است. همانطور كه در شكل (١١) ديده مي‌شود پاسخ فركانسي شتاب سنج دوم نصب شده روي بام در فركانس ٢٧/٩هرتز دچار حالت تشديد شده است. پاسخ بدست آمده از ساير شتاب‌سنج‌ها نيز تشديد در اين فركانس را نشان مي‌دهد.



شكل (١١): آزمايش FV-SP1-X-NM-S1، پاسخ فركانسي شتاب‌سنج دوم روي طبقه بام.

محاسبه زمان از روي مدلسازي كامپيوتري نشان مي‌دهد كه فركانس مد اول سازه برابر ٢٨/٥هرتز است كه با نتايج تحليل برابري خوبي دارد. اگر به همين ترتيب از نتايج آزمايش‌ها بر روي نمونه‌هاي اول و دوم استفاده شود، مي‌توان نتايج محاسبه فركانس در حالت ترک نخورده را در قالب جدول (٦) تا جدول (١١) خلاصه نمود.

جدول (٦): فركانس اولين مد نوساني در جهت X، بدون جرم اضافه

نوع آزمايش	هرتز
FV-SP1-X-NM-S1	٢٧/٩
FV-SP1-X-NM-S2	٢٨/٠
FV-SP2-X-NM-S1	٢٩/١
FV-SP2-X-NM-S2	٢٩/١
FV-SP1-X-NM-H1	٢٨/٧
FV-SP1-X-NM-H2	٢٨/٧
FV-SP2-X-NM-H1	٢٩/٨
FV-SP2-X-NM-H2	٢٩/٨
مدل رايانه‌اي	٢٨/٥

جدول (٧): فركانس اولين مد نوساني پيچشي، بدون جرم اضافه

نوع آزمايش	هرتز
FV-SP1-X-NM-ST1	٤٤/١
FV-SP1-X-NM-ST2	٤٤/٠
FV-SP2-X-NM-ST1	٣٨/٤
FV-SP2-X-NM-ST2	٣٨/٣
FV-SP1-X-NM-H3	٤٤/٧
FV-SP1-X-NM-H4	٤٤/٦
FV-SP2-X-NM-H3	٣٩/٣
FV-SP2-X-NM-H4	٣٩/٣
FV-SP2-Y-NM-ST1	٣٨/٨
FV-SP2-Y-NM-ST2	٣٨/٩
مدل رايانه‌اي	٤٧/١

جدول (٨): فركانس اولين مد نوساني در جهت Y، بدون جرم

نوع آزمايش	هرتز
FV-SP2-Y-NM-S1	٣٩/٧
FV-SP2-Y-NM-S2	٣٩/٨
FV-SP2-Y-NM-H1	٣٩/٥
FV-SP2-Y-NM-H2	٣٩/٦
مدل رايانه‌اي	٥٠/٠

جدول (٩): فركانس اولين مد نوساني در جهت X، با جرم اضافه

نوع آزمايش	هرتز
FV-SP2-X-AM-S1	٢٦/٥
FV-SP2-X-AM-S2	٢٦/٧
FV-SP2-X-AM-H1	٢٧/٢
FV-SP2-X-AM-H2	٢٧/٢
مدل رايانه‌اي	٢٦/٠

جدول (١٠): فركانس اولين مد نوساني پيچشي، با جرم اضافه

نوع آزمايش	هرتز
FV-SP2-X-NM-ST1	٣٥/١
FV-SP2-X-NM-ST2	٣٥/١
FV-SP2-Y-NM-ST1	٣٦/٠
FV-SP2-Y-NM-ST2	٣٦/١
FV-SP2-X-NM-H3	٣٥/٥
FV-SP2-X-NM-H4	٣٥/٢
مدل رايانه‌اي	٤٢/٨

جدول (١١): فركانس اولين مد نوساني در جهتY، با جرم اضافه

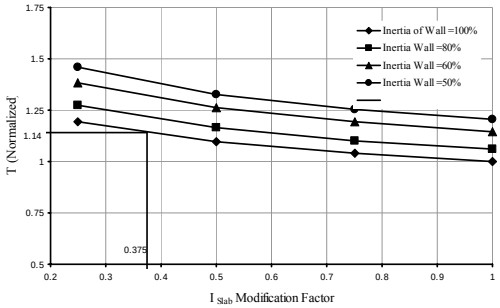
نوع آزمايش	هرتز
FV-SP2-Y-NM-ST1	٣٦/٤
FV-SP2-Y-NM-ST2	٣٦/٥
FV-SP2-Y-NM-H1	٣٧/٤
FV-SP2-Y-NM-H2	٣٧/٥
مدل رايانه‌اي	٤٥/٤

همانطور که دیده مي‌شود نتايج در راستاي X برابري خوبي با نتايج آزمايش که از روش‌هاي مختلف بدست آمده دارد، اما در راستاي ديگر و در راستاي پيچشي بواسطه اثر بيشتر خطاي ساخت نمونه‌ها اختلافاتي وجود دارد.

آزمايش ديگري که در فصل قبل بدان اشاره شده است، محاسبه زمان تناوب سازه ترک‌خورده در مقابل سازه بدون ترک‌خوردگي است. در طراحي سازه‌ها بر حسب نيرو، براي برآورد نيروي استاتيکي معادل (يا انجام محاسبات بر اساس روش شبه ديناميکي) نياز به برآوردي از زمان تناوب مد نوساني اول سازه حين وقوع زلزله مي‌باشد. سازه در حين وقوع زلزله دچار ترک خوردگي شده و سختي آن نسبت به سازه ترک نخورده افت خواهد کرد. براي برآورد صحيح از نيروي زلزله و زمان تناوب سازه، آيين‌نامه‌ها، پيشنهاد استفاده از ضرايب کاهش سختي براي اجزاي مختلف سازه را دارند. در آيين‌نامه طراحي ACI براي دال‌ها استفاده از ضريب ۰/۲۵ و براي ديوارها ضريب ۰/۷۰ براي کاهش سختي پيشنهاد شده است. اين ضرايب مشابه ضرايب استفاده شده در مبحث نهم مقررات ملي ساختمان است. هم‌چنين در مبحث ششم مقررات ملي ساختمان براي محاسبه زمان تناوب سازه، پيشنهاد شده که اين ضرايب به ميزان ۵۰% افزايش يابد. در حقيقت، ضريب ترک‌خوردگي براي دال‌ها معادل ۰/۳۷۵ و براي ديوارها برابر ۱/۰ است.

در تحليل‌هاي انجام شده در محدوده خطي، اثر ضرايب ترک‌خوردگي بررسي شده است. براي دال‌ها ضرايب ترک خوردگي از مقدار ۲۵% تا ۱۰۰% و براي ديوارها از ۵۰% تا ۱۰۰%، مطالعه شده است.

براي بررسي نتايج زمان تناوب محاسبه شده براي مد اول نوسان در حالتي که همه ضرايب ترک‌خوردگي دال و ديوار برابر ۱۰۰% بوده به‌عنوان واحد انتخاب شده است. با تغيير سختي ديوار و دال، زمان تناوب مد اول نوساني محاسبه شده و نسبت به واحد مقايسه شده است.



شکل (۱۲): بررسي تغييرات زمان تناوب مد اول نوساني با تغيير ضريب ترک خوردگي دال.

همان‌طور که ديده مي‌شود بر خلاف ساير سيستمهاي سازه‌اي، ميزان تغييرات سختي دال به‌طور تقريب به همان اندازه که تغييرات سختي ديوار در جابجا کردن زمان تناوب مد اول نوساني نقش دارد، تعيين‌کننده است. اگر آزمايش FV-SP2-X-NM-S1 ملاک مقايسه باشد، فرکانس ارتعاشي مد اول نوساني بدست آمده از آزمايش، برابر ۲۹/۱ هرتز است. فرکانس ارتعاشي مد اول نوساني در حالتي که سازه ترک‌خورده باشد (نتايج بدست آمده از آزمايش FV-SP2-X-CNM-ST1) برابر با ۲۵ هرتز بدست آمده است. تغييرات زمان تناوب در حالت ترک‌خورده و ترک‌نخورده برابر نسبت فرکانس‌هاي محاسبه شده (نسبت ۲۹/۱ به ۲۵ هرتز) يعني برابر با ۱/۱۶ است. با مشاهده نتايج بدست آمده از نمودارها در صورتي‌که بخواهيم مشابه مبحث ششم مقررات ملي ساختمان ضريب ترک‌خوردگي ديوارها را برابر با ۱۰۰% و دال را به ميزان ۳۷۵% فرض کنيم، طبق شکل (۱۲) نسبت فرکانس‌ها برابر با ۱/۱۴ محاسبه شده که تقريب مناسبي به نظر مي‌رسد.

۵- نتيجه‌گيري

در اين مقاله تلاش شده است با انجام مطالعات آزمايشگاهي بر روي دو نمونه از سازه‌هاي تونلي با مقياس يک به پنج، رفتار لرزه‌اي اين سازه‌ها مورد بررسي قرار گيرد. نتايج آزمايش‌هاي بارگذاري رفت و برگشتي نشان مي‌دهند، شکست نمونه‌ها بصورت ترد اتفاق افتاده و بيشترين خرابيها مربوط به اتصال ديوار به فنداسيون است. هم‌چنين پانچ شدن دال بخصوص در طبقه اول و خرابي در اتصالات دال به ديوار مکانيسمهاي خرابي بعدي اين سامانه مي‌باشد. بعلاوه نتايج آزمايش‌هاي ارتعاشات اجباري نشان مي‌دهند، ترک‌خوردگي دال‌ها نقش موثري در تغيير زمان تناوب مد اول نوساني سازه دارد و ضرايب ترک‌خوردگي مبحث ششم مقررات ملي ساختمان تقريب مناسبي را براي برآورد زمان تناوب اين نمونه‌ها نتيجه مي‌دهد. بررسي ضريب رفتار سازه‌هاي تونلي، برآورد زمان تناوب مد اول نوساني و مکانسيم خرابي ساختمان‌هاي تونلي مواردي هستند که نياز به بررسي مطالعات عددي و آزمايشگاهي بيشتري دارند.

۶- سپاسگزاري

اين مقاله بر اساس بخشي از يافته‌هاي پروژه پژوهشي به شماره ۷۳۶۱ مولفان در پژوهشگاه بين المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله تهيه گرديد. به اين وسيله از حمايت پژوهشگاه و همکاري صميمانه کارشناسان آزمايشگاه مهندسي سازه در انجام آزمايشات قدرداني و سپاسگزاري مي‌شود.

۷ - مراجع

[۱] توافقي جهرمي، عليرضا، "بررسي رفتار لرزه‌اي ساختمانهاي پانلي بتني با سيستم تونلي"، پايان نامه دكتري مهندسي زلزله، پژوهشگاه بين المللي زلزله شناسي و مهندسي زلزله، ۱۳۹۰

[۲] ACI, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary, (ACI 318R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.

[۳] ASCE, "Minimum Design Load for Buildings and other Structures", ASCE Standard ASCE/SEI 7-05, American Society of Civil Engineers, 2005.

[۴] ATC, "Quantification of Building Seismic Performance Factor", Report No. ATC-63, prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2009.

[۵] Balkaya C, Kalkan E, "Estimation of Fundamental Periods of Shear-Wall Dominant Building Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 32, No. 7, pp. 985-998, 2003.

[۶] Balkaya C, Kalkan E, "Nonlinear Seismic Response Evaluation of Tunnel Form Building Structures", Computers & Structures. Vol. 81, pp. 153-165, 2003b.

[۷] Balkaya C, Kalkan E, "Seismic Vulnerability, Behavior and Design of Tunnel Form Buildings", Engineering Structures. Vol. 26, No.14, pp. 2081-2099, 2004.

[۸] Cornelissen H. A. W., Hordijk D. A., Reinhardt H. W, "Experimental Determination of Crack Softening Characteristics of Normal Weight and Lightweight Concrete", Heron. Vol. 31, No. 2, pp. 45-56, 1986.

[۹] Eshghi S., Tavafoghi A., "Estimating a Response Modification Factor (R) for Tunnel Form Concrete Building Structures", 14ECEE. Paper ID:704, 2010.

[۱۰] Goel R.K, Chopra A.K, "Period Formulas for Concrete Shear Wall Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 4, pp. 426-433, 1998.

[۱۱] Hordijk, D.A, "Local Approach to Fatigue of Concrete", PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.

[۱۲] Kalkan, E, Yuksel, B, "Pros and Cons of RC Tunnel Form (Box-type) Buildings", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 17, No. 3, pp 601-617, 2008.

[۱۳] Lee L, Chang K, Chun Y, "Experimental Formula for the Fundamental Period of RC Buildings with Shear Wall Dominated Systems", Structural Design of Tall Buildings. Vol. 9, No. 4, pp. 295-307, 2000.

[۱۴] Tavafoghi, A. and Eshghi, S. (2011), "Evaluation of behavior factor of tunnel-form concrete building structures using Applied Technology Council 63", The Structural Design of Tall and Special Buildings, DOI: 10.1002/tal.710, 2011.

[۱۵] Tavafoghi A., Eshghi S., "Seismic Behavior of Tunnel Form Buildings", 14WCEE. Paper ID:14_05-03-0175, 2008.

[۱۶] Thorenfeldt E., Tomaszewicz A., and Jensen J. J, "Mechanical Properties of High-Strength Concrete and Applications in Design", Symp. Utilization of High-Strength Concrete, Stavanger, Norway, 1987.

[۱۷] TNO DIANA, "Finite Element Analysis User Manuals, Version 9.2", Delft, The Netherlands, 2007.

[۱۸] Yuksel B, Kalkan E, "Behavior of Tunnel Form Buildings under Quasi-Static Cyclic Lateral Loading", Structural Engineering & Mechanics, Vol. 27, No. 1, 2007.

۸ - زير نويس

[1] Input-output Modal Identification
[2] Output only Modal Identification
[3] Peak Picking