

اثر سازه‌های مجاور بر رفتار لرزه‌ای^۱ تونل

محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۱*}، سجاد تیماس^۲ و فرامرز خوشنودیان^۳

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سلماس

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۲۳ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۶/۳۰)

چکیده -

واژگان کلیدی:

Influence of Neighboring Structures on Seismic Behavior of Tunnel

M. A. Lotfollahi Yaghin¹, S. Timas² and F. Khoshnoudian³

1. Department of Civil Engineering, Tabriz University

2. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Salmas

3. Department of Civil Engineering, Amir Kabir University of Technology

Abstract: *This article investigates influence of neighboring structures on seismic behavior of a tunnel by using Finite Element Method. Dynamic interaction between a tunnel and a neighboring building is studied by comparing seismic behavior and internal forces of the tunnel and building. In other words, effects of existence of a building on internal forces of a tunnel are*

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: lotfollahi@tabrizu.ac.ir

examined. This study includes several variables such as the distance between building and tunnel, soil properties, height and width of building, motivation frequency, depth of tunnel and other parameters which dominate seismic behavior of the tunnel. By changing the main parameters, the effective distance within which the adjacent building may influence the internal forces of the tunnel is determined.

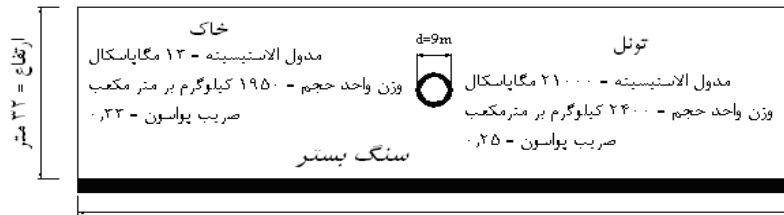
Keywords: Seismic Behavior, Interaction, Building, Tunnel, Finite Element Method.

دامنه بیشینه شتاب افقی اعمال شده	M^*	لنگر خمشی بی بعد شده پوشش تونل
قطر تونل	N	نیروی محوری پوشش تونل
فرکانس طبیعی i ام خاک	N^*	نیروی محوری بی بعد شده پوشش تونل
مدول الاستیسیته خاک	V	نیروی برشی پوشش تونل
مدول برشی خاک	V^*	نیروی برشی بی بعد شده پوشش تونل
عمق قرارگیری محور تونل از سطح زمین	V_s	سرعت موج برشی خاک
نسبت عمق قرارگیری تونل به قطر آن	x	فاصله محور تونل از محور ساختمان
عمق لایه خاک	v	ضریب پواسون
عرض مدل	θ	زاویه محیطی تونل
لنگر خمشی پوشش تونل	ρ	وزن واحد حجم خاک

۱- مقدمه

مستقل از ساختمان مجاور انجام می‌گیرد. آنچه که برای مهندس طراح مطرح می‌شود بررسی تأثیر ساختمانهای مجاور بر افزایش احتمالی نیروهای مؤثر بر رفتار لرزه‌ای تونل است. به منظور بررسی مسئله بایستی اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور بررسی شود و تمام پارامترهایی که به نوعی می‌تواند مؤثر باشد مورد بحث قرار گیرد تا در صورتی که در مجاورت تونل ساختمانی وجود داشته باشد میزان اثر آن بر روی نیروهای داخلی تونل مشخص شود. صدمات شدید وارد شده بر تونلهای مترو و سازه‌های زیرزمینی در سالهای اخیر نظیر تونل متروی دایکای کشور ژاپن، تصور مصون بودن سازه‌های زیرزمینی از اثرات زلزله را زیر سؤال برده است و طراحی لرزه‌ای تونلها به چالش کشیده شده است [۱]. در تحقیقات انجام شده در این راستا که از طریق مشاهدات کیفی و اخیراً اندازه‌گیری و محاسبات تحلیلی انجام گرفته است، حداکثر شتابهای سطحی وارد بر محیط، عمق قرارگیری، محدودیت

بیشتر سازه‌های زیرزمینی در مناطق شهری مانند تونلهای مترو در خاک کم عمق مدفون‌اند و ساختمانهای بیشماری در روی این سازه‌های زیرزمینی وجود دارند. وجود ساختمان در اطراف تونل در مناطق شهری رفتار لرزه‌ای تونل را متفاوت از تونل واقع در مناطق برون شهری و یا تونل خارج از محدوده مؤثر سازه‌ها کرده است. زمانی که یک تونل مترو توسط بارهای دینامیکی تحریک می‌شود، ارتعاش در تونل القا شده و در خاک به صورت حرکت موجی انتشار می‌یابد. وقتی که حرکت موجی به سطح زمین می‌رسد باعث ایجاد ارتعاش در ساختمانها می‌شود. در مقابل، لرزش ساختمانها تحت تحریک بارهای دینامیکی نیز باعث ارتعاش تونل می‌شود. اگر تونل یا ساختمان، تحت نیروی بحرانی مانند زلزله قرار گیرد یا فاصله بین آنها کم باشد، اندرکنش بین تونل و ساختمان ممکن است باعث ایجاد خسارت جدی به آنها شود. طراحی لرزه‌ای تونل به صورت



طول = ۱۵۰ متر

شکل ۱- مدل خاک و تونل

مجاور با در نظر گرفتن عوامل فوق است. مسئله‌ای که به‌ویژه برای سازه‌های زیرزمینی ساخته شده در مناطق لرزه‌ای بسیار مهم است.

در بخشهای مختلف این مقاله حالت‌های خاک تنها و حالت خاک با تونل مدل‌سازی شده و فرکانسهای طبیعی مدلی در دو حالت مقایسه و همچنین به استخراج منحنی پوش نیروهای داخلی پوشش تونل پرداخته شده است. در ادامه مدلی ساختمان تونل - خاک معرفی شده و اثر وجود ساختمان بر فرکانسهای طبیعی تونل مورد تحلیل قرار گرفته و با حالت‌های مدلی خاک تنها و مدلی خاک با تونل مقایسه شده است. در ادامه فاصله مؤثر ساختمان از تونل بر نیروهای داخلی تونل مورد توجه قرار گرفته است. همچنین اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور تحت پارامترهایی نظیر فرکانس بارگذاری، ابعاد سازه، عمق قرارگیری تونل مورد مطالعه قرار گرفته، نهایتاً جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی ارائه شده است.

۲- مدل خاک با و بدون تونل

۲-۱- مشخصات مدلی مورد مطالعه

به منظور امکان مقایسه و بررسی صحت تحلیل حاضر، ابتدا تحلیلهای انجام شده با نتایج روش عبدالسلام [۵] که در سال ۱۹۹۴ انجام شده مقایسه شده‌اند. مدلی و مشخصات شکل (۱) مشخصات هندسی و مصالح مورد استفاده قرار گرفته در تحلیلهای در مقاله را نشان می‌دهد. در این مقاله تونلی با مقطع دایروی به قطر ۹ m و به ضخامت ۴۰ cm از جنس بتن در نظر گرفته شده است که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰ MPa، ضریب پواسون ۰/۲۵ و جرم واحد حجم ۲۴۰۰ kg/m³ است.

سازه در لایه‌های مشخص و محدود خاک، و همچنین نسبت انعطاف‌پذیری پوشش^۵ تونل نسبت به محیط اطراف [۲] میرایی^۴ و انعطاف‌پذیری پوشش تونل در تحلیل مقطع عرضی و طولی تونل، از مهمترین عوامل مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی شناخته شده‌اند [۳ و ۴]. در تحلیل دینامیکی تونل در مقطع عرضی با استفاده از روشهای اجزای محدود، محل و میزان نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش تونل بررسی شده است [۵]. تأثیر تحریک زلزله برای تونلهای کم‌عمق نسبت به سطح زمین، بیشتر از تونلهای عمیق نشان داده شده است [۶].

علاوه بر تأثیر پارامترهای اشاره شده، در یک تونل با مقطع دایروی شکل به شعاع مشخص (۱۰ متر) محل لنگر خمشی و نیروی محوری حداکثر ایجاد شده در پوشش تونل در محدوده شانه و زانوی مقطع تونل و در عمق کم (۱۰ الی ۱۵ متری) از سطح زمین محاسبه شده است [۷]. مطالعه اثرات سازه‌های مجاور نظیر تونل دیگر بر رفتار دینامیکی یک تونل و مقایسه نتایج تحلیل با حالت تونل تکی با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر فاصله بین دو تونل، عمق قرارگیری تونلها از سطح زمین و سرعت موج برشی خاک با قطر ثابت و مشخصات ثابت پوشش تونل نشان داده است که اثر سازه مجاور یعنی تونل دوم تا فاصله‌ای محدود بین دو تونل، باعث افزایش قابل توجه نیروهای داخلی پوشش تونل (تا ۴۰٪) به‌ویژه لنگر خمشی و نیروی برشی نسبت به حالت تونل تکی می‌شود [۸].

در نتیجه، نظر به اینکه رفتار تونل متأثر از عوامل متعدد لرزه‌ای مؤثر شناخته شده از جمله مجاورت با سازه‌های دیگر است، هدف این مقاله تحلیل اندرکنش بین تونل و ساختمانهای

جدول ۱ - فرکانسهای طبیعی خاک با تونل و بدون تونل (هرتز)

فرکانس i ام	خاک بدون تونل (تحلیلی یک بعدی)	مدل خاک بدون تونل (مدل سازی دو بعدی ANSYS)	مدل خاک - تونل (مدل سازی دو بعدی ANSYS)
فرکانس اول	۰/۴۱۸۹	۰/۴۱۹۰۵	۰/۴۲۱۷۸
فرکانس دوم	۱/۲۵۶۷	۰/۵۱۵۷۴	۰/۵۱۶۹۷
فرکانس سوم	۲/۰۹۴۵	۰/۷۱۲۷۲	۰/۷۲۰۰۳

[K] است ضرایب α و β از فرمولهای زیر محاسبه شده و در مدل استفاده شده‌اند:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (۳)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = 2 \times \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1 & -1 \\ \omega_j & \omega_i \end{bmatrix} \times \frac{\omega_j \times \omega_i}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \times \begin{bmatrix} \lambda_i \\ \lambda_j \end{bmatrix} \quad (۴)$$

که در آن λ_i و λ_j درصد میرایی، ω_i و ω_j فرکانسهای زاویه‌ای λ ام و λ ام اند که در این مسئله فرکانس زاویه‌ای اول و سوم انتخاب شده‌اند. به ازای $\lambda_i = \lambda_j = 10\%$ خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.428650 \\ 0.012664 \end{bmatrix}$$

با توجه به مقادیر معلوم مسئله، فرکانسهای اول تا سوم خاک بدون تونل در جدول (۱)، به صورت یک بعدی محاسبه شده و برای برآورد درستی نتایج، با نتایج تحلیل مودال از برنامه ANSYS (مدل سازی دو بعدی خاک تنها) مقایسه می‌شود.

همچنین تحلیل مودال بر روی مدل خاک - تونل انجام شده است. همانگونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود نتایج تحلیلهای مدل سازی ANSYS و محاسبات روش تحلیلی نشان می‌دهد که فرکانسهای دوم و سوم در روش تحلیلی به علت فرض یک بعدی بودن خاک و سایر فرضیات در نظر گرفته شده با فرکانسهای دوم و سوم مدل سازی متفاوت است. همچنین فرکانسهای مدل سازی در هر دو حالت خاک بدون تونل و حالت خاک با تونل تقریباً یکسان بوده و مشاهده می‌شود که وجود تونل بر فرکانسهای طبیعی و نیز شکل مودهای ارتعاشی تأثیر قابل توجهی ندارد.

تونل در داخل خاکی با مدول الاستیسیته ۱۳ MPa و جرم واحد حجم 1700 kg/m^3 و ضریب پواسون 0.33 قرار دارد. ضخامت لایه خاک ۳۲ متر بوده و تونل در مرکز لایه خاک قرار دارد. به عبارت دیگر مرکز تونل در فاصله ۱۶ متری از سطح زمین قرار دارد.

برای مدل کردن خاک از المان کرنش مسطح Plane42 مستطیلی و برای مدل کردن پوشش تونل از المان Beam3 که یک المان تک محوری با قابلیت‌های برش، کشش، فشار و خمش است استفاده شد. برای اعمال شرایط مرزی، درجات آزادی انتقالی بستر در دو بعد افقی و قائم و درجه آزادی انتقالی مرزهای کناری در یک بعد قائم محدود شد. بارگذاری وارد بر سیستم، شتاب هارمونیک سینوسی به صورت $a_g = 0.25g \cdot \sin(\omega t)$ می‌شود. فرکانس به کار رفته، بر اساس اولین فرکانس طبیعی خاک و با توجه به روابط حاکم بر محیطهای خاک همگن، با توجه به فرمول تحلیلی زیر محاسبه می‌شود:

$$f_i = \frac{V_s}{4H} \times (2i-1) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (۱)$$

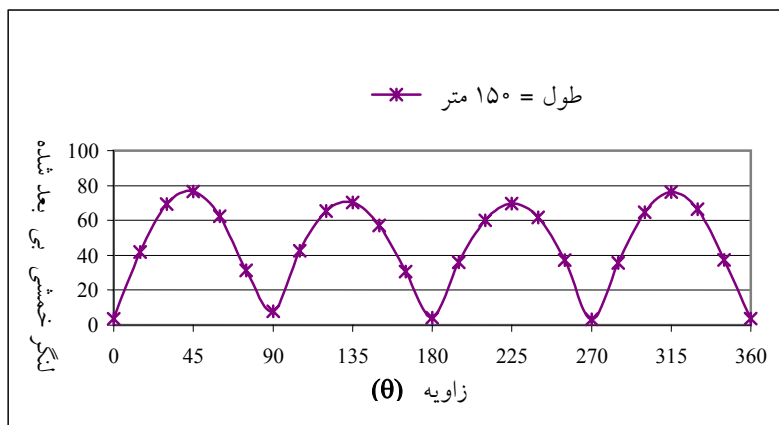
$$\Rightarrow f_1 = 0.42 \text{ Hz}$$

در معادله فوق، f_i فرکانس i ام، H عمق لایه خاک و V_s سرعت موج برشی خاک است و همچنین:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (۲)$$

در تحلیلهای رفتار مصالح خطی فرض شده و با توجه به طویل بودن تونل، مسئله به صورت کرنش مسطح^۷ در مقطع عرضی در نظر گرفته شده است.

میرایی ۱۰ درصد فرض شده است. با توجه به اینکه ماتریس میرایی [C] ترکیبی از ماتریسهای جرم [M] و سختی



شکل ۲- منحنی پوش لنگر خمشی

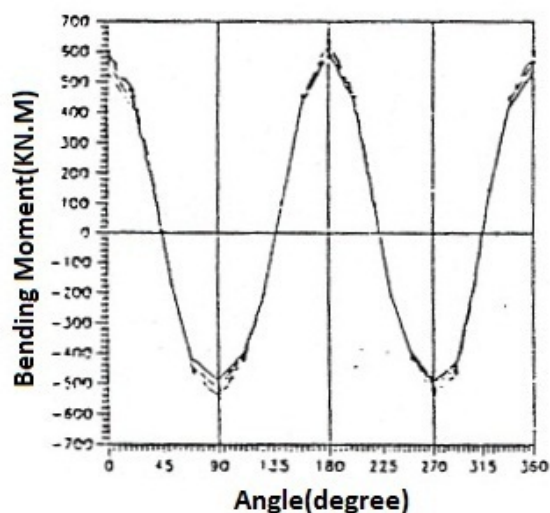
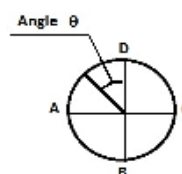
لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری پوشش تونل با توجه به نتایج تاریخچه زمانی هر کدام از آنها در نقاط مختلف به دست می‌آید که در بخشهای بعد به منظور مقایسه با نتایج مدل تونل - ساختمان آورده شده‌اند. پس از استخراج نتایج تحلیل، مقادیر حداکثر نیروهای داخلی پوشش تونل به ازای زوایای مختلف از محیط تونل (θ) ترسیم می‌شود. برای نمونه، نتایج مربوط به لنگر خمشی حداکثر در هر نقطه (هر ۱۵ درجه) در شکل (۲) و در شکل (۳) (روش عبدالسلام) نشان داده شده است. مقادیر نشان داده شده در شکل (۲) و سایر شکلها که به صورت پوش نتایج تاریخچه زمانی ارائه شده‌اند با به‌کارگیری معادله‌های زیر بی بعد شده‌اند:

$$M^* = \frac{|M|}{\rho a_g d^4}, V^* = \frac{|V|}{\rho a_g d^3}, N^* = \frac{|N|}{\rho a_g d^3} \quad (5)$$

در این معادله‌ها، M ، V ، N به ترتیب لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری ρ دانسیته پوشش تونل، d قطر تونل و a_g شتاب افقی اعمال شده است. M^* ، V^* و N^* به ترتیب مقادیر بی بعد شده لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری پوشش تونل می‌باشند.

۲-۳ - مدل تونل و ساختمان

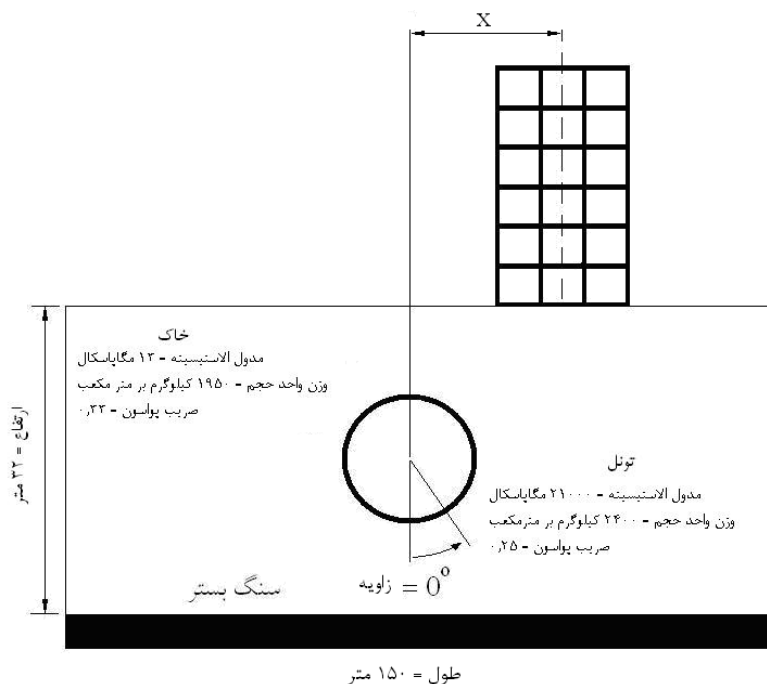
به منظور بررسی تأثیر ساختمان واقع در روی سطح خاک بر روی پاسخ تونل اجرا شده در داخل خاک از مدل شکل (۴) استفاده می‌شود. در مدل‌سازی تونل و ساختمان، ساختمان



شکل ۳- منحنی پوش لنگر خمشی (روش عبدالسلام)

۲-۲- منحنی پوش نیروهای داخلی در مدل خاک با تونل

حداکثر نیروها در هر ۱۵ درجه از محیط تونل محاسبه شده و نیروهای داخلی پوشش تونل در نقاط بین صفر تا ۳۶۰ درجه استخراج شده‌اند، موقعیت زاویه θ در مدل بعدی، شکل (۴) قابل مشاهده است. در تحلیل مسئله، انجام تحلیلها با عرضهای مختلف مدل‌سازی و مقایسه نیروهای داخلی پوشش تونل و همچنین فرکانسها، نشان داد که با انتخاب $L = 15$ متر (عرض مدل) نتایج تحلیلها تغییر نخواهد کرد. نتایج مربوط به پوش



شکل ۴ - مدل تونل و ساختمان

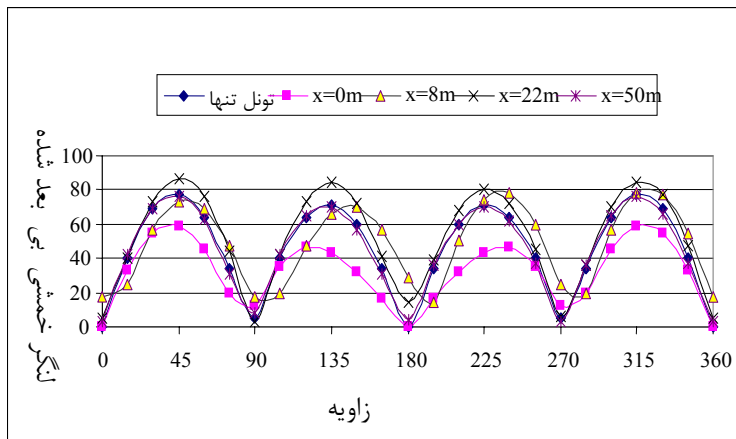
جدول ۲- فرکانسهای طبیعی اول تا سوم مدل خاک تنها، خاک با تونل و مدل خاک - تونل - ساختمان (هرتز)

	مدل خاک تنها	مدل خاک با تونل	مدل خاک - تونل - ساختمان
فرکانس اول	۰/۴۱۹۰۵	۰/۴۲۱۷۸	۰/۴۰۲۶۲
فرکانس دوم	۰/۵۱۵۷۴	۰/۵۱۶۹۷	۰/۵۲۴۴۵
فرکانس سوم	۰/۷۱۲۷۲	۰/۷۲۰۰۳	۰/۵۳۵۷۵

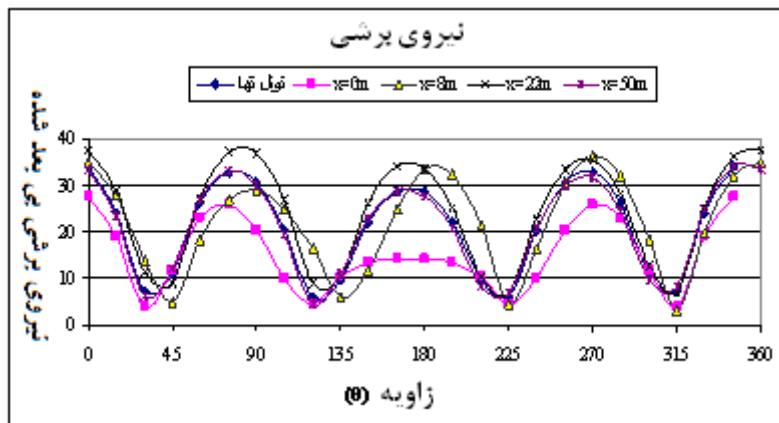
۲-۴- تأثیر ساختمان بر فرکانسهای طبیعی مدل

در جدول (۲) فرکانسهای طبیعی اول تا سوم مدل خاک تنها، مدل خاک با تونل و مدل خاک - تونل - ساختمان آمده است. همانگونه که مشاهده می شود در فرکانسهای اول و دوم وجود ساختمان اثر محسوسی بر فرکانس طبیعی مدل ندارد ولی در فرکانس سوم وجود ساختمان سبب کاهش فرکانس سیستم می شود. به عنوان مثال فرکانس طبیعی سوم مدل خاک با تونل ۰/۷۲ است ولی این فرکانس برای مدل خاک - تونل - ساختمان برابر با ۰/۵۳۵ است. یعنی میزان کاهش فرکانس برای فرکانس سوم حدود ۲۵٪ است و این امر بیانگر اثر وجود سازه در فرکانسهای طبیعی سیستم است.

مشکل از یک قاب سه دهانه ۴ متری است که دارای ۶ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر است. ابعاد تیرها و ستونها $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ فرض شده است. و مدول الاستیسیته، جرم حجمی و ضریب پواسون ساختمان به ترتیب 21000 MPa و 2400 kg/m^3 ، ۰/۲۵ فرض شده است. به عبارت دیگر ساختمان مفروض ساختمان بتنی با کاربری مسکونی و بارهای آیین نامه ایران فرض شده است. برای مدل کردن ساختمان و تونل از المان Beam3 استفاده شد. حال برای بررسی اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان مجاور آن با تغییر فاصله x نیروهای ایجاد شده در تونل محاسبه و با حالت تونل تنها مقایسه شده است، شکل (۴).



شکل ۵- منحنی پوش لنگر خمشی بی بعد شده برای تونل تنها و تونل با ساختمان برای $h = 16 \text{ m}$ و فرکانس اول



شکل ۶- منحنی پوش نیروی برشی بی بعد شده برای تونل تنها و تونل با ساختمان برای $h = 16 \text{ m}$ و فرکانس اول

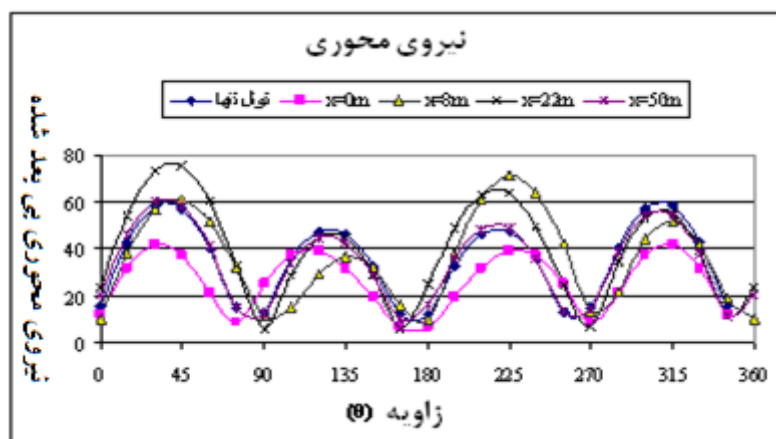
۲-۵- بررسی اثر فاصله مؤثر ساختمان از تونل

میزان اثر ساختمان مجاور بر روی نیروهای داخلی تونل بسته به فاصله ساختمان و تونل ممکن است نسبت به حالت تونل تنها اثر کاهنده یا افزایش دهنده باشد. به منظور تعیین فاصله مؤثر بین محور تونل و ساختمان (x) که در آن محدوده، نتایج تحلیلها دستخوش تغییرات می شود و نیز کاهش حجم تحلیلهای آتی، طی تحلیلهایی با تغییر فاصله x این فاصله مؤثر جستجو می شود.

نتایج تحلیلها نشان می دهد که با افزایش فاصله بین ساختمان و تونل، اندرکنش بین این دو کاهش می یابد و برای فاصله $x = 50 \text{ m}$ نتایج نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان تقریباً برابر حالت تونل تنهاست. علاوه بر این می توان پی برد

که بیشترین اثر افزایش ساختمان مجاور تونل بر نیروهای داخلی تونل شامل هر سه نیروی لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری در فاصله $x = 22 \text{ m}$ می باشد. شکلهای (۵) تا (۷) نتایج فوق را به ترتیب برای پوش لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری در فرکانس اول نشان می دهد.

مقادیر بیشینه نیروهای داخلی بی بعد شده تونل بدون ساختمان و تونل با ساختمان با فواصل متغیر x در جدول (۳) آورده شده است. قابل توجه است که در فرکانس اول در اثر وجود ساختمان مجاور تونل، در فاصله $x = 0 \text{ m}$ نیروهای داخلی پوشش تونل نسبت به حالت تونل بدون ساختمان کاهش می یابند. این کاهش برای لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری به ترتیب ۲۴٪، ۱۹٪ و ۲۸٪ است. ولی با



شکل ۷- منحنی پوش نیروی محوری بی بعد شده برای تونل تنها و تونل با ساختمان برای $h = 16 \text{ m}$ و فرکانس اول

جدول ۳- مقادیر بی بعد شده نیروهای داخلی پوشش تونل تکی و تونل مجاور ساختمان

		فرکانس اول		
		M^*	V^*	N^*
$h = 16 \text{ m}$	$x = 0 \text{ m}$	۵۹	۲۷/۵	۴۱/۵
	$x = 8 \text{ m}$	۷۸/۵	۳۶/۵	۷۱
	$x = 22 \text{ m}$	۸۷	۳۸	۷۵/۵
	$x = 50 \text{ m}$	۷۶/۵	۳۴	۶۰/۵
تونل تکی		۷۷/۵	۳۴	۵۸

به پارامترهای زیادی دارد که از آن جمله می‌توان موارد زیر را نام برد:

- فرکانس بارگذاری
- ابعاد سازه (عرض سازه و ارتفاع آن)
- عمق قرارگیری تونل

در این قسمت، هدف بررسی نقش هر یک از این پارامترها بر روی رفتار لرزه‌ای تونل در صورت وجود ساختمان مجاور آن است.

۳-۱- فرکانس بارگذاری

برای بررسی اثر فرکانس بارگذاری بر روی اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان، تحلیلهای دینامیکی برای سه فرکانس اول انجام شد. تمام خصوصیات هندسی و مکانیکی

دور شدن ساختمان از تونل در جهت افقی، نیروهای داخلی تونل افزایش می‌یابد.

بیشترین افزایش که در $x = 22 \text{ m}$ مشاهده می‌شود برای لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری به ترتیب ۱۳٪، ۱۲٪ و ۳۰٪ است. با دور شدن ساختمان از تونل اندرکنش بین ساختمان و تونل کاهش یافته و افزایش نیروهای داخلی تا فاصله $x = 50 \text{ m}$ مشاهده می‌شود ولی برای فواصل بیشتر از آن، وجود ساختمان تأثیری بر نیروهای داخلی تونل ندارد. با توجه به تحلیلهای فوق، حداکثر فاصله مؤثر x در آنالیزها، $x = 50 \text{ m}$ انتخاب می‌شود.

۳- مطالعه پارامتریک

اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور آن بستگی

جدول ۴- مقادیر بی بعد شده نیروهای داخلی پوشش تونل تنها و تونل مجاور ساختمان به ازای فرکانسهای مختلف بارگذاری

		فرکانس اول			فرکانس دوم			فرکانس سوم		
		M*	V*	N*	M*	V*	N*	M*	V*	N*
h = ۱۶ m	x = 0m	۵۹	۲۷/۵	۴۱/۵	۱۳	۵/۵	۹/۵	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	x = 8m	۷۸/۵	۳۶/۵	۷۱	۱۱/۵	۵	۹	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	x = 22m	۸۷	۳۸	۷۵/۵	۱۱	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	x = 50m	۷۶/۵	۳۴	۶۰/۵	۱۱	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵
تونل تنها h = ۱۶ m		۷۷/۵	۳۴	۵۸	۱۱/۵	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵

این فاصله در فرکانس دوم تا $x = ۲۲m$ بوده و در فرکانس سوم تغییر فاصله بین ساختمان و تونل اثر محسوسی در نیروهای داخلی تونل نداشته است.

می توان نتیجه گرفت که بیشترین اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان مجاور آن به ازای فرکانس اول ایجاد می شود و با افزایش فرکانس بارگذاری، فاصله ای که به ازای آن اندرکنش تونل و ساختمان وجود دارد، کاهش می یابد .

۳-۲- عمق قرارگیری تونل

یکی دیگر از پارامترهایی که بر روی اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان تأثیر می گذارد عمق قرارگیری تونل از سطح زمین است. به منظور بررسی این پارامتر با در نظر گرفتن مدل فوق و با تغییر دادن موقعیت تونل در ارتفاع لایه خاک و همچنین به ازای مقادیر متغیر فاصله افقی محور تونل و ساختمان با ($x = ۰, ۸, ۲۲, ۵۰m$) تحلیلهایی با سه فرکانس اول انجام شد. به عبارتی، علاوه بر متغیر عمق قرارگیری تونل از سطح زمین، اثر تغییر فاصله افقی x و فرکانسها نیز بررسی شد. تحلیلها به ازای سه حالت $h = ۸$ و ۱۶ و $۲۴ m$ (h فاصله مرکز تونل از سطح زمین) انجام شده و نتایج آنها در جدول (۵) آورده شده است.

نتایج مربوط به لنگرهای خمشی حداکثر برای دو حالت $h = ۸$ و $۲۴m$ برای فرکانس اول در شکلهای (۸) و (۹) آورده

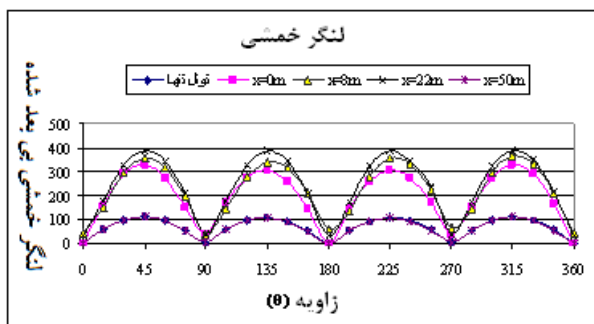
مطابق قبل بوده و تنها فرکانس بارگذاری تغییر کرده است. با تغییر فاصله x بین ساختمان و تونل، تحلیلهای دینامیکی در فرکانسهای مختلف برای حالت تونل بدون ساختمان و تونل مجاور ساختمان، با عمق قرارگیری تونل $h = ۱۶ m$ ، انجام یافته و نتایج در جدول (۴) آمده است.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که اثر اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان در فرکانس اول محسوستر بوده و با افزایش فرکانس بارگذاری، اندرکنش بین تونل و ساختمان کاهش می یابد. علت این امر را می توان در کاهش جابه جایی با افزایش فرکانس جستجو کرد. به عنوان مثال برای فرکانسهای اول و دوم، اثر اندرکنش باعث افزایش لنگر خمشی به میزان ۱۳% در هر دو فرکانس شده و برای فرکانس سوم اثر محسوسی مشاهده نشد. افزایش نیروی برشی در فرکانس اول ۱۲% و در فرکانس دوم ۲۲% و بدون تغییر در فرکانس سوم است. نیروی محوری در فرکانس اول ۳۰% افزایش می یابد و این میزان افزایش در فرکانس دوم، ۱۹% است. در حالی که در فرکانس سوم تغییری ایجاد نمی شود.

فاصله ای که در آن ساختمان بیشترین اثر افزایشی را روی نیروهای داخلی پوشش تونل دارد در فرکانس اول در $x = ۲۲m$ ولی در فرکانس دوم در فاصله $x = ۰ m$ مشاهده می شود. علاوه بر این می توان دید که تا فاصله $x = ۵۰ m$ برای فرکانس اول اندرکنش بین تونل و ساختمان وجود دارد ولی

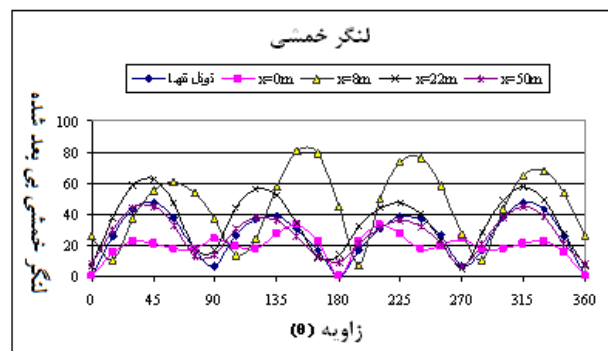
جدول ۵ - مقادیر نرمالیزه شده نیروهای داخلی پوشش تونل تنها و تونل با ساختمان به ازای h های مختلف در سه فرکانس اول

		فرکانس اول			فرکانس دوم			فرکانس سوم		
		M^*	V^*	N^*	M^*	V^*	N^*	M^*	V^*	N^*
$h = 8 \text{ m}$	$x = 0 \text{ m}$	۳۳	۱۷	۴۲	۱۷/۵	۷	۱۲	۴	۱/۵	۲/۵
	$x = 8 \text{ m}$	۸۱	۳۹	۷۷/۵	۱۴	۵	۱۰	۳	۱	۲/۵
	$x = 22 \text{ m}$	۶۲/۵	۲۶/۵	۵۷/۵	۱۲/۵	۵	۹	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	$x = 50 \text{ m}$	۴۵	۱۹/۵	۳۸	۱۳	۵	۸/۵	۴	۱/۵	۲/۵
تونل تنها $h = 8 \text{ m}$					۱۴	۵/۵	۹	۳/۵	۱/۵	۲/۵
$h = 16 \text{ m}$	$x = 0 \text{ m}$	۵۹	۲۷/۵	۴۱/۵	۱۳	۵/۵	۹/۵	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	$x = 8 \text{ m}$	۸۷/۵	۳۶/۵	۷۱	۱۱/۵	۵	۹	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	$x = 22 \text{ m}$	۸۷	۳۸	۷۵/۵	۱۱	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵
	$x = 50 \text{ m}$	۷۶/۵	۳۴	۶۰/۵	۱۱	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵
تونل تنها $h = 16 \text{ m}$					۱۱/۵	۴/۵	۸	۳/۵	۱/۵	۲/۵
$h = 24 \text{ m}$	$x = 0 \text{ m}$	۳۲۸/۵	۱۲۹	۲۰۸/۵	۸	۳/۵	۶/۵	۳	۱	۲
	$x = 8 \text{ m}$	۳۶۵	۱۴۴/۵	۲۶۰	۸/۵	۳/۵	۷	۳	۱	۲
	$x = 22 \text{ m}$	۳۸۸/۵	۱۵۱	۲۸۲/۵	۹	۳/۵	۷	۳	۱/۵	۲/۵
	$x = 50 \text{ m}$	۱۱۲	۴۳/۵	۷۵	۸	۳/۵	۶/۵	۳	۱/۵	۲/۵
تونل تنها $h = 24 \text{ m}$					۸/۵	۳/۵	۷	۳	۱/۵	۲/۵



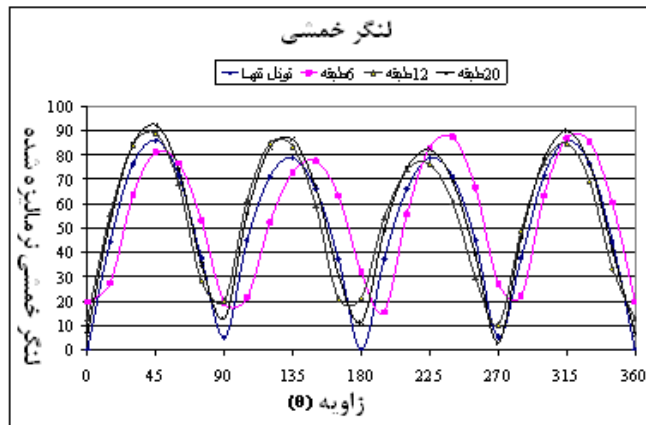
شکل ۹- منحنی پوش لنگر خمشی بی بعد برای تونل تنها و تونل با ساختمان برای $h = 24 \text{ m}$ و فرکانس اول

با دور شدن ساختمان از تونل، افزایش لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری به ترتیب ۷۱٪، ۹۵٪ و ۱۲۱٪ می شود که این امر در $x = 8 \text{ m}$ اتفاق می افتد. در فواصل ۸ تا ۵۰ متری اثر اندرکنش به صورت افزایش نیروهای داخلی تونل قابل



شکل ۸- منحنی پوش لنگر خمشی بی بعد شده برای تونل تکی و تونل مجاور ساختمان برای $h = 8 \text{ m}$ و فرکانس اول

شده است. این نتایج نشان می دهد در حالی که در فاصله $x = 0 \text{ m}$ برای تونل واقع در نزدیکی سطح زمین ($h = 8 \text{ m}$) وجود ساختمان مجاور تونل سبب کاهش نیروهای داخلی تونل می شود.



شکل ۱۰- منحنی پوش لنگر خمشی بی بعد شده برای تونل تنها و تونل با ساختمان با قاب سه دهانه و تعداد طبقات مختلف

مشاهده است ولی پس از فاصله $x=50\text{m}$ نیروهای داخلی تونل بدون تغییر باقی مانده و اثر ساختمان را دریافت نمی کنند. در حالت $h=16\text{m}$ مانند حالت $h=8\text{m}$ ، در فاصله $x=0\text{m}$ وجود ساختمان باعث کاهش نیروهای داخلی تونل شده و با فاصله گرفتن ساختمان از تونل تا فاصله مؤثر $x=50\text{m}$ ، نیروهای داخلی تونل افزایش می یابند که بیشترین اندرکنش دینامیکی در این حالت در $x=22\text{m}$ مشاهده می شود که سبب افزایش 30% نیروی محوری، 12% لنگر خمشی و 12% نیروی برشی می شود. تغییرات محسوسی در فرکانس سوم مشاهده نمی شود. می توان دید که بیشترین اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان مربوط به تونل واقع در $h=24\text{m}$ می شود. به عنوان نمونه، اندرکنش سبب افزایش لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری به ترتیب 245% ، 233% و 287% می شود که نسبت به تمام موارد دیگر بیشتر است و در فاصله $x=22\text{m}$ اتفاق می افتد.

۳-۳- ارتفاع ساختمان

مشاهده است ولی پس از فاصله $x=50\text{m}$ نیروهای داخلی تونل بدون تغییر باقی مانده و اثر ساختمان را دریافت نمی کنند. در حالت $h=16\text{m}$ مانند حالت $h=8\text{m}$ ، در فاصله $x=0\text{m}$ وجود ساختمان باعث کاهش نیروهای داخلی تونل شده و با فاصله گرفتن ساختمان از تونل تا فاصله مؤثر $x=50\text{m}$ ، نیروهای داخلی تونل افزایش می یابند که بیشترین اندرکنش دینامیکی در این حالت در $x=22\text{m}$ مشاهده می شود که سبب افزایش 30% نیروی محوری، 12% لنگر خمشی و 12% نیروی برشی می شود. تغییرات محسوسی در فرکانس سوم مشاهده نمی شود. می توان دید که بیشترین اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان مربوط به تونل واقع در $h=24\text{m}$ می شود. به عنوان نمونه، اندرکنش سبب افزایش لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری به ترتیب 245% ، 233% و 287% می شود که نسبت به تمام موارد دیگر بیشتر است و در فاصله $x=22\text{m}$ اتفاق می افتد.

برای سه حالت $h=8$ و 16 و 24m در فرکانس اول مشاهده می شود که اثر اندرکنش دینامیکی تونل - ساختمان برای $h=24\text{m}$ بیشترین اثر را نشان می دهد که علت آن نزدیکی تونل به بستر سنگی است. تغییرات h در فرکانس دوم و سوم در نیروهای داخلی پوشش تونل اثر چندانی نداشته و به عبارتی وجود ساختمان تأثیری در اندرکنش تونل و ساختمان با تغییرات عمق قرارگیری تونل نسبت به حالت تونل بدون وجود ساختمان ندارد. همچنین فاصله افقی (x) که به ازای آن بیشترین اثر ایجاد می شود به ازای

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع ساختمان بر روی اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان مجاور، تحلیلهایی انجام شد که در آنها سه گروه ساختمان با تعداد طبقات ۶، ۱۲ و ۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. تمام مشخصات هندسی و فیزیکی مصالح برای تونل و خاک و ساختمان مطابق قبل بوده و تونل در مرکز لایه خاک قرار گرفته است ($h=16\text{m}$). همچنین تحلیلهای نشان داد با توجه به اینکه بیشترین اثر اندرکنش تونل و ساختمان در $x=8\text{m}$ برای ساختمانهای با تعداد طبقات مختلف مشاهده شد، فاصله بین محور تونل و محور ساختمان $x=8\text{m}$ ثابت فرض شده و در نتیجه با فرض ثابت بودن x و h و با اعمال بارگذاری هارمونیک با دامنه شتاب $0.25g$ در فرکانس اول خاک و با تغییر تعداد طبقات از ۶ تا ۲۰ طبقه، اثر ارتفاع ساختمان بر روی اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان بررسی شد. که نتایج تحلیلهای در جدول (۵) و شکل (۱۰) آمده است. لازم به ذکر است که در این تحلیلهای تعداد دهانه قاب همانند حالت قبل در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- مقادیر ماکزیمم نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان به ازای تغییر طبقات ساختمان و $h = 16m$ و فرکانس اول

	قاب ۳ دهانه		
	M^*	V^*	N^*
تونل تنها	۸۶	۳۴	۵۸
۶ طبقه	۸۷/۵	۳۶/۵	۷۱
۱۲ طبقه	۸۹	۳۶/۵	۶۲/۵
۲۰ طبقه	۹۲	۳۷	۶۲

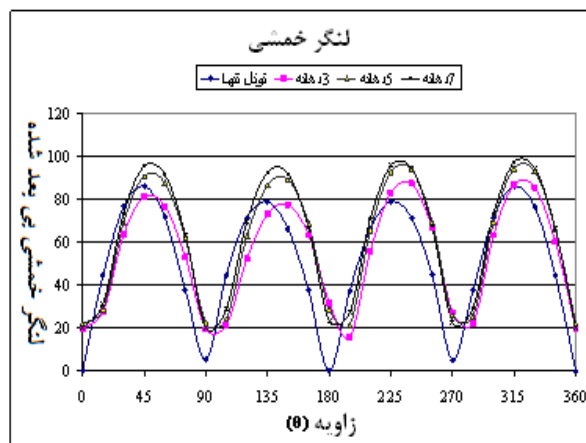
جدول ۷- تغییرات درصدی نیروهای داخلی تونل به ازای تغییر دهانه برای ساختمان ۶ طبقه نسبت به تونل بدون ساختمان

دهانه ۳			دهانه ۵			دهانه ۷		
M^*	V^*	N^*	M^*	V^*	N^*	M^*	V^*	N^*
%۲	%۷	%۲۲	%۱۰	%۱۵	%۳۹	%۱۳	%۱۵	%۴۵

۴-۳- عرض ساختمان

اثر عرض ساختمان بر روی اندرکنش دینامیکی تونل با ساختمان مجاور آن با انجام تحلیلهایی با تغییر عرض ساختمان و یا به عبارتی تغییر تعداد دهانه‌های قاب برای ساختمان مورد مطالعه (ساختمان ۶ طبقه) بررسی شد. در این قسمت تمام مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح برای تونل و خاک و ساختمان مطابق قبل است و تونل در مرکز لایه خاک فرض شده است ($h = 16m$). فاصله بین محور تونل و محور ساختمان ۸ متر در نظر گرفته شده است. با اعمال بارگذاری شتاب هارمونیک همانند مثال قبلی و با فرض ثابت بودن فاصله محور تونل از ساختمان x و h و با تغییر تعداد دهانه‌ها از ۳ به ۵ و ۷، اثر تغییر عرض ساختمان بر روی اندرکنش دینامیکی تونل با ساختمان مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت که نتایج تحلیلهای در جدول (۶) و شکل (۱۱) آمده است.

با توجه به نتایج، با افزایش عرض ساختمان از ۳ دهانه به ۷ دهانه، لنگرخمشی، نیروی برشی و نیروی محوری در اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان افزایش پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال برای قاب ۳ دهانه در اثر وجود ساختمان مجاور، نیروی داخلی تونل (لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری) به ترتیب %۲، %۷ و %۲۲ افزایش می‌یابد ولی بر روی



شکل ۱۱- منحنی پوش لنگرخمشی بی بعد شده برای تونل تنها و تونل مجاور ساختمان ۶ طبقه با دهانه‌های مختلف

با توجه به نتایج می‌توان دید که افزایش طبقات سبب افزایش کمی بر میزان اندرکنش می‌شود. به‌عنوان مثال افزایش طبقات از ۶ به ۲۰ طبقه سبب افزایش لنگر خمشی و نیروی برشی به ترتیب %۷ و %۹ در تونل مجاور ساختمان نسبت به تونل تنها می‌شود. همچنین می‌توان ملاحظه رد که اثر افزایش طبقات بر روی نیروی محوری معکوس است. به عبارت دیگر با افزایش تعداد طبقات، اثر اندرکنش دینامیکی تونل- ساختمان بر روی نیروی محوری کاهش می‌یابد.

قاب ۷ دهانه مقدار آن ۱۳٪، ۱۵٪ و ۴۵٪ است که بیشترین اثر آن بر روی نیروی محوری تونل است. بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش عرض ساختمان میزان اندرکنش دینامیکی تونل مجاور ساختمان بیشتر می‌شود و سبب افزایش بیشتر نیروهای داخلی تونل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور آن و اثر آن بر روی رفتار دینامیکی تونل مورد بررسی قرارگرفت. به همین منظور نیروهای داخلی تونل تنها با نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان مقایسه شد. با توجه به بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده موارد زیر را می‌توان ذکر کرد:

۱. اثر اندرکنش دینامیکی بین تونل و ساختمان مجاور آن بستگی به فاصله بین تونل و ساختمان دارد و با افزایش فاصله بین ساختمان و تونل اثر اندرکنش (افزایش نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان نسبت به تونل تنها) کاهش می‌یابد و اگر فاصله بین تونل و ساختمان از $6d$ (d قطر تونل) بیشتر شود وجود ساختمان تأثیری بر نیروهای داخلی ایجادشده در تونل تحت بار زلزله نخواهد داشت.
۲. اثر اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان با افزایش فرکانس بارگذاری کاهش می‌یابد. بیشترین اثر آن در فرکانس اول مشاهده شد و در فرکانس دوم و سوم اندرکنش تونل و

واژه نامه

- | | | |
|--------------------------|----------------|-----------------|
| 1. seismic behavior | 4. attenuation | 7. plane strain |
| 2. finite element method | 5. lining | |
| 3. interaction | 6. base | |

مراجع

1. Yoshida, N., Nakamura, S., Iwafuji, M., and Yoshimora, H., "Survey and Restoration of the DAIKAI Subway Station Damaged During the 1995 Hyogoken – Nanbu Earthquake," *Tunnels et Ouvrages Souterrains* – No. 138, Novembre/Decembre, 1996.
2. St-John, C. M., and Zahrah, T. F., "Asiesmic Design of Underground Sructures," *Tunneling and Uderground Space Technology*, Vol. 2 No. 2, pp. 165-197, 1987.
3. Gin-Show Liou, Chii-Hwang, "Response of a Tunnel in Soft Ground to Longitudinal Earthquake

۳. با تغییر عمق قرارگیری تونل در داخل خاک اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان تغییر محسوسی می‌کند و برای حالت $h = 24m$ و $h = 8m$ اثر اندرکنش محسوستر است. به‌عنوان مثال برای حالت $h = 24m$ اندرکنش دینامیکی تونل و ساختمان سبب افزایش بیش از ۲۰٪ نیروهای داخلی تونل مجاور ساختمان نسبت به حالت تونل تنها می‌شود.
۴. بیشترین اثر اندرکنش در تونل کم‌عمق در فاصله ۸ متری محور تونل از ساختمان و در تونل عمیق در فاصله‌ای دورتر (۲۲ متری) مشاهده شد.
۵. عریض‌تر شدن ساختمان باعث افزایش اندرکنش بین تونل و ساختمان مجاور آن به‌صورت افزایش نیروهای داخلی تونل به‌ویژه نیروهای محوری تونل می‌شود.
۶. افزایش ارتفاع ساختمان سبب افزایش اندکی در نیروهای داخلی تونل می‌شود و برای موارد بررسی شده افزایش طبقات از ۶ به ۲۰ سبب افزایش حدود ۲۰٪ در نیروهای داخلی تونل خواهد شد.
۷. در مجموع با توجه به بررسیهای انجام شده، وجود ساختمان مجاور تونل سبب افزایش نیروی داخلی تونل تحت بار زلزله خواهد شد که این افزایش بستگی به فرکانس بارگذاری، عمق قرارگیری تونل، ابعاد تونل، ابعاد و ارتفاع ساختمان دارد.

- Excitations," *Numerical Models in Geomechanics*, NNUMOG V, Balkema, Rotterdam, 1995.
4. Shahidi, A. R., and Vafaeian, M., "Analysis of Longitudinal Profile of Tunnels in the Active Faulted Zone and Designing the Flexible Lining," *Tunneling and Underground Sapce Technology*, Vol. 20, Issue 3, pp. 213-221, 2005.
 5. Abdel-Salam, S., Elsayed-Shallan, O., and Akl, A.Y., "Dynamic Analysis of Tunnels," *Tunneling of Ground Conditions*, Balkema, Rotterdam 1994.
 6. Pakbaz, M.C., and Yareevand, A., "2-D Analysis of Circular Tunnel Against Earthquake Loading," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, Issue 5, pp. 411-417, 2005.
 7. El-Nahas F. M., Abdel-Motaal M. A., and Khairy A. T. H., "Engineering Safety of Tunnels during Earthquakes," *Workshop on Safety in Tunnels and underground Structures*, RIYADH 8-9 NOV., 2006.
 8. Okumura, T., Takewaki, T., Shimizu, K., and Fukutake, K., "Dynamic Response of Twin Circular Tunnels During Earthquakes," *Proceeding of Tunnel Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, 1998.