

## نأثیر شکل هندسی پایه پل بتنی واقع در مسیر جریان بر روی رفتار سازه‌های آن

محمد سجاد دینی<sup>۱</sup>، مهدیار خانپور<sup>۲</sup>، فرهنگ فرحبند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه مهندسی عمران دانشگاه آزاد تهران غرب

۲- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد تهران غرب

۳- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد تهران غرب

msd120@yahoo.com

### چکیده

پل های بتنی از عناصر حیاتی راه های هر کشور محسوب می شوند. شکل هندسی پایه ی پل های بتنی نقش به سزایی در ارتباط با نیروها ی موثر در طراحی ایفا می کند. یکی از عوامل مهم در اجرای یک پل مرحله ی ساخت پایه ی پل و نصب آن قبل از بارگذاری عرشه می باشد. در این تحقیق به منظور بررسی تغییر شکل سازه ای پایه ی پل و همچنین بررسی ایجاد ترک و گسترش در بتن و پل های بتنی، از روش مدل سازی به روش اجزای محدود توسط نرم افزار ansys تحت تاثیر نیرو های وزن، هیدرواستاتیک، هیدرودینامیک، زلزله و خاک استفاده شده است. در نهایت رفتار سازه ای به همراه خروجی های ترک و گسترش آن مورد مطالعه قرار می گیرد. مهمترین دستاورد این پژوهش بررسی رفتار غیر خطی بتن و سازه بعد از ایجاد ترک می باشد. همچنین در انتهای این پژوهش علاوه بر بررسی ترک و گسترش آن، جابجایی سازه و تنش های حاصله از این نیروها را نیز

کلمات کلیدی: پایه ی پل، جابجایی، المان محدود، گسترش ترک، رفتار سازه ای

### ۱. مقدمه

پل ها از جمله مهمترین و پرکاربرد ترین سازهایی هستند که از دیرباز مورد استفاده قرار گرفته اند. تجربه طولانی احداث پل نشان می دهد در دهه های گذشته یکی از مهمترین عوامل در اجرای پل ها، شکل هندسی پایه ها می باشد. یکی از مشکلاتی که اخیراً بر سر اجرای پل ها قرار گرفته است، صدماتی است که به پایه ی پل قبل از اجرا و نصب عرشه وارد می شود که می توان از مهمترین آنها می توان به ترک و گسترش آن تحت نیروهای وارده می باشد. حال می توان با بررسی و مشاهده ی عوامل ایجاد ترک و مکان ایجاد اولین ترک ها و همچنین مسیر گسترش ترک در پل ها از هزینه های گزاف ساخت مجدد پایه ی پل و ترمیم آن جلوگیری کرد و از تخریب آن و یا کاهش عمر پایه ها ممانعت به وجود آورد. همچنین با مشاهده رفتار غیر خطی بتن بعد از ترک و همچنین شکل پذیری بتن قبل از خرابی کامل می توان به طور کامل رفتار پایه پل را مورد بررسی قرار داد. شایان ذکر است که در انتها میزان تنش و جابجایی پایه پل مورد بررسی قرار داد.

### ۲. روش تحقیق

تحقیقات انجام گرفته تاکنون علاوه بر حالت یک بعدی انجام شده و فقط میزان تأثیر شکل پایه پل روی جریان سیال عبوری تجزیه و تحلیل کرده اند. در خیلی از تحقیقات انجام رفته روی پایه ی پل بحث ابستگی و تأثیر آن بر روی خرابی پایه ی پل مورد مطالعه قرار گرفته است. برای نمونه فلاح در سال ۱۳۹۰ به پژوهشی با عنوان بهسازی طرح هندسی شکل پایه ها پرداخت و در تحقیق وی، شکل هندسی پایه پل را با اثر نیروهای مؤثر مورد بررسی قرار داد تا با بدست آوردن الگوی بهینه در مقطع هندسی پایه پل، از صدمات ناشی از تخریب پل ها را کاهش دهد. بدین منظور بهسازی شکل هندسی پایه پل به کمک مدل سازی به روش اجزای محدود و توسط نرم افزار ANSYS تحت اثر عوامل زمین لرزه، نیروی باد، نیروی

هیدرودینامیکی ناشی از جریان آب و نیروی ناشی از گرادیان حرارتی و همچنین اثر آبستگي موضعی توسط نرم افزار HEC-RAS مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. [1]

اما در این پژوهش با توجه به عوامل مختلف تاثیرگذار از جمله جریان، زلزله، خاک و نیروی هیدرواستاتیک، بحث ترک و گسترش آن هم مورد مطالعه قرار گرفته است. حال با توجه به موارد بالا و استفاده از روش اجزای محدود بهترین نرم افزار ANSYS می باشد. با توجه به شکل پایه و مدل سازی می توان نیروهای مدنظر را بر روی پایه اعمال و با توجه معیار ترک لحظه شروع ترک و گسترش آن و میزان مقاومت سازه در برابر نیروها مورد بررسی قرار داد.

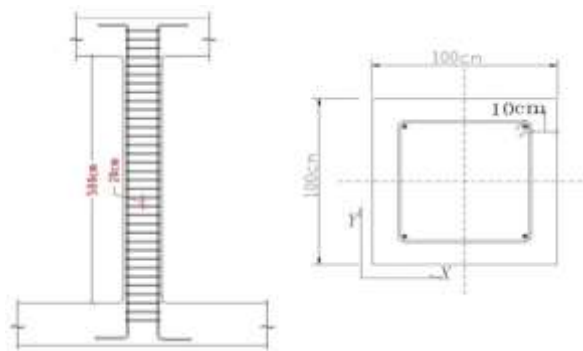
### ۳. معرفی مواد و مشخصات ستون و واحد ها

به منظور مدل سازی سازه مورد مطالعه در این تحقیق لازم است در ابتدا مشخصات بتن و آرماتور مورد استفاده را طبق جدول زیر در نرم افزار وارد کنیم:

جدول ۱- مشخصات مصالح

مصالح	مشخصات فیزیکی	
بتن	$f'_c = 245 \frac{kg}{cm^2}$	ضریب پواسون: ۰,۳
فولاد	$f_y = 3000 \frac{kg}{cm^2}$	ضریب پواسون: 0.2

ابعاد ستون مورد مطالعه در این پژوهش به شکل زیر می باشد:



شکل ۱- ابعاد و شکل مقطع مربعی مورد مطالعه

مطابق شکل ابعاد ستون یک در یک متر می باشد و ارتفاع ستون ۵ متر می باشد. همانطور که در شکل بالا قابل ملاحظه است نحوه استقرار آرماتورها و خاموت قابل رویت می باشد.

لازم به تذکر است که ۱ متر از ارتفاع ستون داخل شمع فرض شده و به ارتفاع یک متر از روی شمع، پایه ی پل مستغرق در آب می باشد.

با توجه به تقارن موجود در مدل و نیروها و به منظور سهولت در حل مساله، در این پژوهش نصف پایه ی مورد نظر را مدل سازی شده است.

#### ۴. معرفی نیروها

در این قسمت به معرفی نیروهای مورد استفاده در این تحقیق می پردازیم:

##### ۴-۱ نیروی وزن

یکی از نیروهای اعمال شده روی سازه مورد نظر نیروی وزن سازه می باشد که با توجه به خصوصیات تعریف شده المان ها به صورت خودکار توسط خود برنامه مورد محاسبه قرار می گیرد. کفایت برای محاسبه ی نرم افزار، میزان شتاب گرانش زمین به همراه مشخصات فیزیکی مصالح در نرم افزار اعمال گردد. لازم به ذکر می باشد که ضریب گرانش در این پژوهش ۹،۸۱ متر بر مجذور ثانیه فرض شده است. [2]

##### ۴-۲ فشار هیدرواستاتیک

فشار هیدرواستاتیک عبارت است از فشار وارد شده توسط سیال در حال تعادل که به علت نیروی جاذبه اعمال می گردد. فشار هیدرواستاتیک را می توان بوسیله یک جزء مکعبی بینهایت کوچک از سیال تحلیل کرد همانطور که می دانیم نیروی هیدرواستاتیکی یک نیروی مثلثی می باشد که به ارتفاع آب و سیال بستگی داشته و از طریق رابطه زیر بدست می آید: [3]

$$P = \gamma \times H \quad (1)$$

##### ۴-۳ فشار هیدرودینامیک

نیروی هیدرودینامیکی عبارت است از نیروی بوجود آمده در اثر حرکت مکانیکی و عملکرد سیالات یا مایعات در حال حرکت می باشد، اولین چیزی که در این رابطه باید دانست این است که فشار تنها زمانی ایجاد می شود که مقاومتی در برابر جریان سیال وجود داشته باشد. [4]

در آیین نامه های بارگذاری پل ها فشار ناشی از جریان آب روی پایه ها توسط رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$P = 51.2 \times KV^2 \quad (2)$$

که در آن :

P : فشار وارده بر حسب کیلوگرم بر مترمربع

V : سرعت آب بر حسب متر بر ثانیه

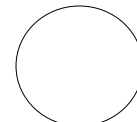
K : ضریبی که با توجه به شکل پایه، از شکل ۳-۱ بدست می آید :



$$K = 0.67$$



$$K = 1.375$$



$$K = 0.5$$

شکل ۲- مقادیر توصیه شده برای شکل پایه در آیین نامه بارگذاری پل ها

همانطور که مشهود می باشد شکل مقاطع پل ها در آیین نامه به سه زیر مجموعه کلی تقسیم گردیده که در تحقیق حاضر این مسأله نیز بگونه خیلی دقیق تر توسط مدلسازی با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. وجه تمایز دیگر مدلسازی با روش اجزای محدود و فرمول مندرج در آیین نامه در چگونگی اثر فشار آب بر پایه پل می باشد. توزیع فشار در آیین نامه بصورت یکنواخت فرض گردیده

سرعت جریان رودخانه در این تحلیل ۳ متر بر ثانیه فرض شده است که سرعت متوسط آب در رودخانه ی کارون می باشد

#### ۴-۴ فشار خاک

به منظور بررسی بهتر و مشابه به مدل واقعی، مدل سازی نیروی خاک با توجه به معادله دیفرانسیل درجه چهارم وینکلر بصورت فنر محاسبه و استفاده شده است. با توجه به آزمایش خاک دو محوره در محیط آزمایشگاه و وارد کردن نیرو به مقدار مشخصی خاک، می توان نمودار نیرو-جابجایی آن را ترسیم نمود. لازم به ذکر است شیب این نمودار  $K$  و یا همان سختی فنر معادل می باشد. با استفاده از سختی فنر می توان میرایی آن را محاسبه نمود.

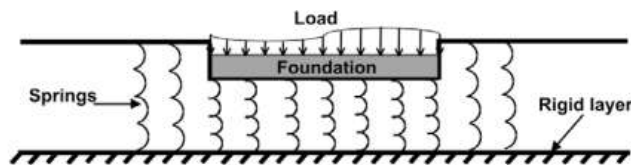
به همین منظور از روابط ذیل برای معادل سازی خاک به صورت فنر استفاده می شود: [5]

$$q = k \times y \quad (۳)$$

$$K_s = k \times B \quad (۴)$$

$$q_x = k \times B \times y = K_s \times y \quad (۵)$$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + (K_s \times y) = 0 \quad (۶)$$



شکل ۳- نمایی شماتیک از مدل خاک و فنر وینکلر

#### ۴-۵ نیروی زلزله

به منظور بررسی و دستیابی به نتایج مورد نیاز لازم است نیروی زلزله را نیز مدل سازی شده است. با توجه به اینکه برای دستیابی به خروجی های مربوط به ترک و گسترش آن لازم است از تحلیل استاتیکی در ANSYS استفاده شود، لذا لازم است برای مدل سازی نیروی زلزله از روش معادل استاتیکی که در آیین نامه ۲۸۰۰ به صورت کامل شرح داده شده استفاده شود که در این پژوهش این مقدار برابر ۳۰ درصد نیروی وزن می باشد. [7]

با اعمال این نیروها مشاهده می شود که پایه ی پل مد نظر دچار ترک و بحران خاصی نمی شود. به همین دلیل و همچنین مشاهده ی نیرویی که سازه تحت تاثیر آن دچار اولین ترک شود، نیروی زلزله را بصورت صعودی و فزاینده وارد می شود.

نتیجه ی حاصله ی دیگر از افزایش نیروی زلزله، مشاهده رفتار پایه ی پل بعد از ترک و همچنین مسیر و گسترش ترک در پایه ی پل می باشد. علاوه بر این می توان رفتار غیر خطی بتن را نیز مورد مطالعه قرار داد. به همین منظور پارامتر نیروی زلزله را به زمان وابسته کرده تا بتوان نحوه شروع ترک و گسترش آن را مشاهده کرد.

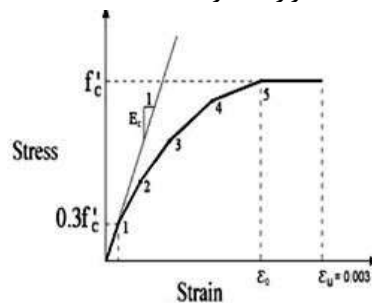
#### ۵. روش تحلیل

به منظور رسیدن به نتایج مطلوب لازم است علاوه بر انتخاب نوع تحلیل مناسب پژوهش که با توجه به نیاز به خروجی ترک در این مطالعه تحلیل استاتیکی می باشد.

تمامی بارها به روش استاتیک و یا استاتیک معادل مورد بررسی قرار گرفته اند اما برای دستیابی به مدل ترک و گسترش آن می‌توان بار و نیروی مورد نظر را در step و sub step و وابسته به زمان بر روی جسم وارد کرده تا بتوان رفتار آن را تحت تاثیر بار در گذر زمان مورد بررسی قرار داد. نحوه اعمال هر نیرو مشخصات آنها به طور کامل در قسمت های قبل مورد بررسی قرار گرفت. [3]

#### ۱-۵ معیار گسیختگی مصالح

در این پژوهش رفتار بتن در محدوده کشسان و پیش از ترک خوردگی در کشش به صورت خطی و در فشار بر مبنای پیشنهاد آئین نامه ACI318 به صورت غیرخطی مانند شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود. برای نقاط نظیر منحنی تنش - کرنش نشان داده شده در شکل ۴، از رابطه های ۷ الی ۹ در این پژوهش استفاده می‌شود. الگوی پنج عاملی ویلیام و وارکندر که برای الگوسازی رفتار غیرخطی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. [6]



شکل ۴- رفتار الاستیک غیرخطی بتن در فشار

(۷)

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}$$

(۸)

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}$$

که در روابط فوق،  $\varepsilon$  و  $f$ ، کرنش و تنش بتن و  $E_c$  ضریب کشسانی بتن میباشد. مقدار  $f'_c$  نیز از رابطه ۹ و با داشتن ضریب کشسانی بتن به دست می‌آید.

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \quad (۹)$$

سطح گسیختگی بتن را میتوان با داشتن پنج عامل که شامل مقاومت کششی بتن در آزمایش کشش ساده،  $f_t$ ، مقاومت تک محوره در آزمایش فشار ساده،  $f'_c$ ، مقاومت دو محوره فشاری بتن،  $f_{cb}$ ، مقاومت تک محوره فشاری بتن به همراه تنش هیدرواستاتیک،  $f_1$ ، و مقاومت دو محوره فشاری بتن به همراه تنش هیدرواستاتیک،  $f_2$ ، می‌باشند، تعیین کرد. تنش هیدرواستاتیک نیز از رابطه ۱۰ بدست می‌آیند.

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۱۰)$$

که در این رابطه فوق  $\sigma_h$  تنش هیدرواستاتیک و  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  تنش های اصلی می‌باشند. بنا به الگوی مورد بحث مذکور، ضابطه شکست بتن ناشی از وارد شدن تنش های چندمحوره به صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود:

(۱۱)  $\frac{F}{f_c} - S \geq 0$  که در آن  $F$  تابعی از تنشهای اصلی و  $S$  سطح شکست می باشد که به وسیله تنشهای اصلی و عاملهای الگوی ویلیام-وارکر مشخص می شود.

افزون بر این، بنا به این الگو، سطح گسیختگی را با داشتن دست کم دو عامل  $f_t$  و  $f_c$  می توان تعیین کرد و سه عامل دیگر را میتوان به صورت رابطه های ۱۳ الی ۱۵ در نظر گرفت. [6]

$$f_{cb} = 1.2 f_c \quad (12)$$

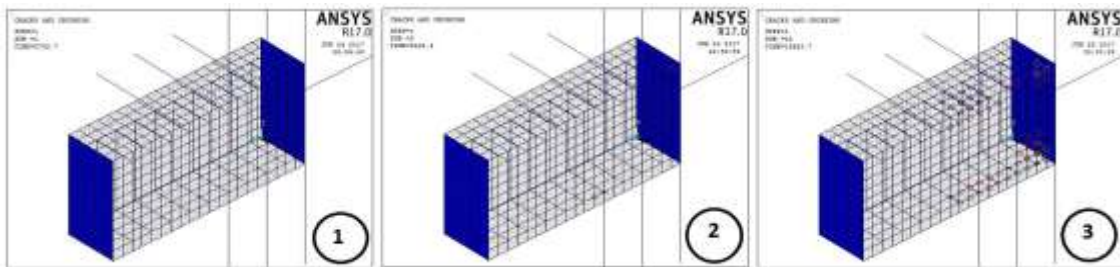
$$f_{cb} = 1.45 f_c \quad (13)$$

$$f_{cb} = 1.725 f_c \quad (14)$$

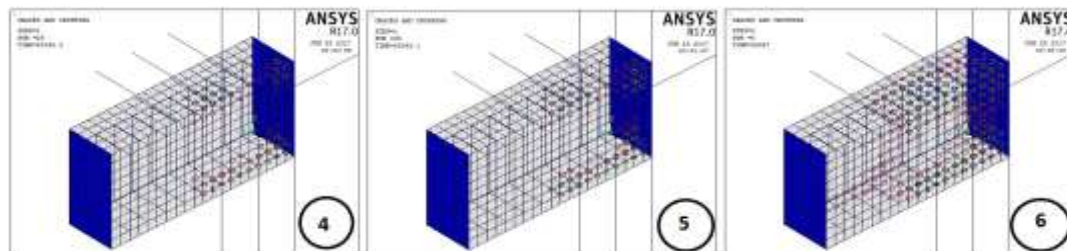
پارامترهای های مورد استفاده در معیار ترک ویلیام وارنرک،  $G$  مدول برشی،  $U$  ضریب پواسون،  $\beta_c$  ضریب انتقال برش ترک بسته (در فشار)،  $\beta_t$  ضریب انتقال برش ترک باز (در کشش) و  $\eta$  ضریب تحمل کشش ترک باز است که در الگوی ویلیام وارنرک مقادیرهای  $\beta_c$ ،  $\beta_t$  و  $\eta$  عددی ثابت و بین صفر و یک فرض میشوند. لازم به یادآوری است که اگر جزء سالم باشد  $\beta_c$ ،  $\beta_t$  در نظر گرفته میشود. در این نوع تحلیل هم مصالح، هم المان ها و هم تحلیل به صورت غیر خطی در نرم افزار ANSYS مفروض و مورد استفاده قرار می گیرد. برای مثال از solid 65 برای مدل سازی بتن استفاده می شود. [6]

## ۶. نتایج و بحث

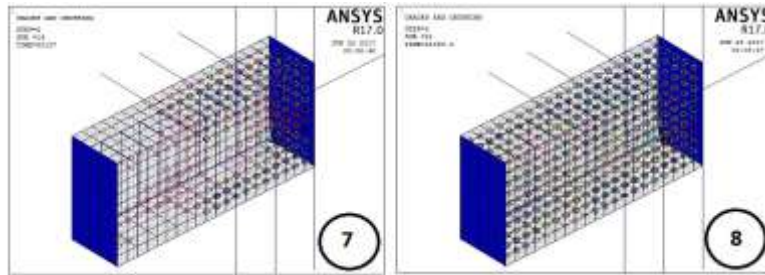
پس از مدل سازی و اعمال شرایط تحلیل، حال نوبت به حل مسئله و بررسی نتایج حاصل از آن می رسد. حال ترک و گسترش آن را بررسی می شود:



شکل ۶- روند شروع و مراحل اولیه گسترش ترک در مدل

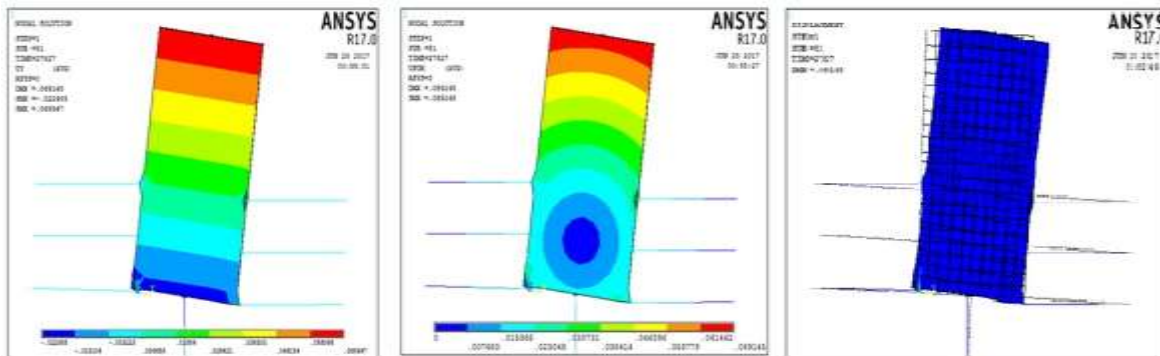


شکل ۷- روند و مراحل میانی گسترش ترک در مدل

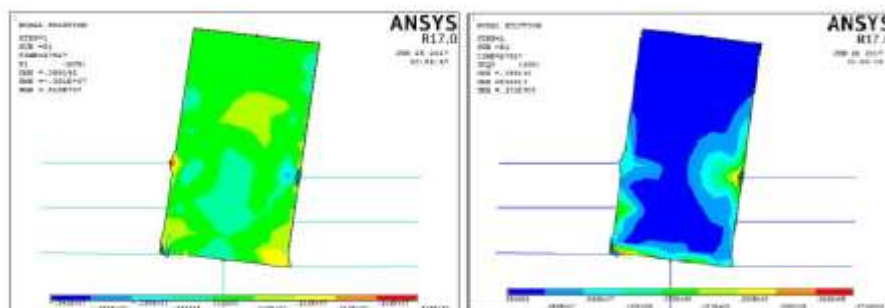


شکل ۸- روند و مراحل پایانی گسترش ترک در مدل

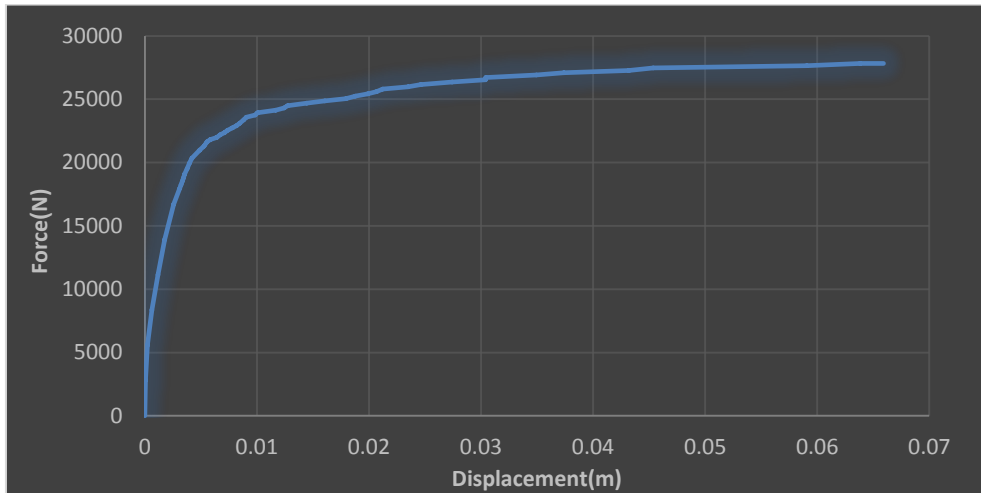
برای مشاهده ی بهتر روند ایجاد و گسترش ترک، تصاویر خروجی را با دورانی ۹۰ درجه به صورت افقی در تصاویر بالا قابل مشاهده است. با توجه به تصاویر، اولین ترک ها در نیروی ۵۶۵۵،۶ نیوتن در مدل پدید آمده و بعد از آن روند گسترش ترک در پایه ی پل تا خرابی مشخص است. ترک های ابتدایی بوجود آمده که به رنگ قرمز مشخص است ترک های ناشی از برش و بعد از آن ترک های ناشی از کشش که به رنگ آبی قابل ملاحظه است. در انتها ترک های سبز رنگ که ترک های ناشی از فشار می باشد قابل ملاحظه است. همچنین در تصاویر زیر می توان میزان جابجایی سازه تحت اعمال نیروهای ذکر شده و مقدار نیروی زلزله ۲۷۸۲۷ نیوتن را مشاهده کرد. نکته ی مهم دیگر اینکه با توجه به شکل مشخص است ترک های برشی در ابتدا در کف رودخانه و محل جریان آب ظاهر می شود و ترک های کششی و فشاری در داخل شمع و خاک و نزدیک فتر های مدل شده به جای خاک پدید می آیند.



شکل ۹- جابجایی مدل تحت نیروی ۲۷۸۲۷ به ترتیب از چپ در راستای Y، برآیند کلی و شکل شماتیک جابجایی



شکل ۱۰- تنش مدل تحت نیروی ۲۷۸۲۷ (به ترتیب از چپ: تنش اصلی اولیه، تنش فون میسس)



شکل ۱۱- نمودار نیرو برحسب تغییر مکان مدل مربعی

## ۷. نتیجه گیری

با بررسی و مطالعه نتایج تحلیل می توان به این نتیجه رسید که با افزایش نیروی زلزله تا محدوده ی ۵۰۰۰ نیوتن رفتار بتن کاملاً خطی می باشد که این مقدار برابر ۰٫۱٪ مقاومت فشاری بتن می باشد. و پس از آن رفتار بتن غیر خطی و اولین ترک ها روی نمونه پدید می آید. این رفتار بتن تا محدوده ۲۰۰۰۰ نیوتن ادامه دارد البته در طول این رابطه شیب نمودار جابجایی در حال تغییر است. با توجه به نمودار نیرو جابجایی مشخص است که رفتار مدل بعد از محدوده ی ۲۰۰۰۰ نیوتن کاملاً شکل پذیر می شود و این رفتار تا خرابی کامل و فراگیر شدن ترک در مدل ادامه دارد.

با توجه به خروجی های این پژوهش حداکثر میزان جابجایی تحت تاثیر نیروی زلزله ۲۸۷۲۷ نیوتن و نیروهای مشخص شده ی دیگر ۰٫۰۶۵ متر می باشد.

از این پژوهش می توان برای اجرا و طراحی پایه های پل و مقاوم سازی آنها در مقابله با ترک در بتن استفاده کرد.

## ۸. مراجع

- [۱] فلاح، فرزاد، ۱۳۹۰، بهسازی طرح هندسی شکل پایه پل ها، دانشگاه شهید باهنر کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- [۲] جاهد مطلق، حمیدرضا. ۱۳۸۰. ANSYS [انسیس]. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۳] شعبانعلی، محمدرضا. ۱۳۸۰. تحلیل به روش المان محدود با نرم افزار ANSYS [انسیس]. چاپ اول. انتشارات نص.
- [۴] کلانی ساروکلائی، لیلا، ۱۳۹۱، تعیین ضریب رفتار مخزن ها، نشریه فنی مهندسی عمران
- [5] Murthy, V. N. S. (1964). "Following the candle pier parametric study using ANSYS APDL ...." *Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Volume 27, Issue 6, December 2015, Pages 865-871*
- [6] William, K. J., and Warnke, E. P., "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", *Proc. Int1.*
- [7] R.Park ,(2014) " The impact of basic geometry gentle arch bridge over the flow pattern using numerical models SSIIM1,." *Elevent world conference on Earthquake Engineering.*