

# ارزیابی رفتار دینامیکی ستون‌های پل بتنی تحت اثر انفجار سطحی

محمد واقفی\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

بهنام مبارکی (دانشجوی دکتری)

بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده پلی تکنیک بارسلونا، کاتلونیا، اسپانیا

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۷ (۲-۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۱۳۳-۱۴۰، یادداشت نثی)

در نوشتار حاضر، با استفاده از هیدروکد LS-DYNA به بررسی و مشاهده‌ی پاسخ دینامیکی پل بتنی تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در اطراف ستون‌های آن پرداخته و مقادیر خرابی در هر مرحله ارائه شده است. به منظور اطمینان از صحت مدل المان محدود، مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برگرفته شده از آیین‌نامه‌ی انفجار ارتش آمریکا ۱-۸۵۵-TM صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از پایه‌ی پل، هیچ‌گونه خرابی در عرشه‌ی پل اتفاق نیفتاده و پی پل به میزان ۲ متر در راستای X (راستای طولی پل) و ۳/۵ متر در راستای Y (راستای عرضی پل) دچار خرابی شده است و ناحیه‌ی خرابی مذکور در شمع تا ارتفاع ۴ متری است و تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، طول ناحیه‌ی خرابی در پی سازه، ۳ متر در راستای X و ۶ متر در راستای Y است.

واژگان کلیدی: انفجار سطحی، LS-DYNA، پل بتنی، رفتار دینامیکی،

۱-۸۵۵-TM.

vaghefi@pgu.ac.ir  
behnam.mobarak@upc.edu

## ۱. مقدمه

شاید وقوع جنگ‌هایی همچون جنگ‌های جهانی اول و دوم به مراتب بیش از حوادث عمدی یا غیرعمدی صنعتی، کشورهای مختلف را بر آن داشته است تا از پژوهشگران برجسته و امکانات پژوهشی گسترده‌ی خود برای مقاوم‌سازی و تخمین مقاومت سازه‌ها در برابر انفجار استفاده کنند. به عنوان مثال، تنش‌های سیاسی ایالات متحده آمریکا و کره‌ی شمالی در زمینه منابع هسته‌یی باعث شده است تا فرودگاه و شهرهای زیرزمینی در اعماق غیرقابل تصور در کوه‌های کره‌ی شمالی ایجاد شود. در کشور عراق و کشورهای دیگر از قبیل ایران نیز در تهدیدهای متقابل نظامی با ایالات متحده، همواره در مورد ساخت پناهگاه‌های محفوظ در برابر انواع جنگ‌افزارها به خصوص موشک‌های کروز که دقت بی‌نظیری دارند، مطالعه و پژوهش صورت گرفته و همچنین سعی در مقاوم‌سازی سازه‌های امنیتی، کاربردی و ارتباطی در برابر بار انفجار شده است. یکی از سازه‌هایی که در زمان بروز جنگ تأثیر چشم‌گیری دارد و می‌تواند اولین هدف دشمن قرار بگیرد، پل‌ها و راه‌های ارتباطی هستند. لذا مطالعات بسیاری مبنی بر بررسی و مشاهده‌ی پاسخ دینامیکی انواع پل‌ها در برابر بار انفجار شده است.

در سال ۱۹۸۷، پاسخ یک پل با ورودی شتاب اندازه‌گیری شده‌ی زمین در پی در طول یک زلزله‌ی قوی آنالیز و از روش اجزاء محدود استفاده شد و

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۲۴، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1339

که قسمت‌های فوقانی شمع بیشتر از قسمت‌های تحتانی در معرض آسیب‌دیدگی هستند.<sup>[۶]</sup>

همچنین با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA (۲۰۰۷) به بررسی رفتار دینامیکی سازه تحت اثر هم‌زمان بار انفجار و بار زلزله پرداخته شده و نتایج نشان داده است در زمانی که فاصله‌ی مرکز انفجار از سازه کم باشد، بار انفجار بیشترین تأثیر را دارد؛ ولی زمانی که فاصله از مرکز انفجار زیاد باشد، بار زلزله تخریب بیشتری را در سازه اعمال می‌کند.<sup>[۷]</sup> در نوشتاری در سال ۲۰۱۴ نیز در حالت عددی به شبیه‌سازی و بررسی حادثه‌ی در سال ۲۰۱۳ در چین پرداخته شده است که در آن کامیون حامل مواد منفجره بر روی پل منفجر و کل سازه دچار کارافتادگی شده است. در پژوهش مذکور به بررسی عوامل و شدت خرابی پرداخته و در نهایت نتیجه‌گیری شده است که از کارافتادگی سازه فقط به خاطر حجم انفجار بوده و هیچ‌گونه ضعفی در طراحی سازه وجود نداشته است.<sup>[۸]</sup>

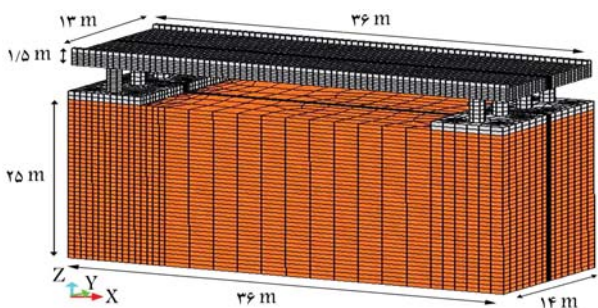
همچنین در سال ۲۰۰۹، با استفاده از هیدروکد AUTODYN، خرابی به‌وجود آمده در پل خرپایی فازی بررسی شده و به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت‌گرفته، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و در ادامه، به بررسی نحوه‌ی تولید، انتشار و ناپدید شدن امواج فشاری در سازه پرداخته شده و در نتایج به‌دست آمده، تأثیر سایز مش بندی در توزیع امواج فشاری ناشی از انفجار، خرابی به‌وجود آمده در عرشه‌ی پل و ترک‌های به‌وجود آمده در دیگر اجزاء سازه ارائه شده است.<sup>[۹]</sup>

در سال ۲۰۱۱، نیز در بررسی رفتار ستون بتنی در برابر بار انفجار در مقیاس ۱/۲ در حالت عددی و آزمایشگاهی، اثر پارامترهای مختلف در زمان طراحی ستون که شامل اثر شکل مقطع ستون، درصد فولاد، ابعاد ستون، موقعیت انفجار و نوع آرماتور برشی در پاسخ دینامیکی ستون تحت بار انفجار مطالعه شده و نتایج نشان داده است که بیشترین ناحیه‌ی آسیب‌دیده در ستون، دو طرف ستون نسبت به موقعیت انفجار است.<sup>[۱۰]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، با استفاده از نتایج مطالعه‌ی اخیر، پارامترهای مؤثر در زمان طراحی ستون بتنی تحت بار انفجار ارائه شده و با مقایسه‌ی رفتار ستون‌هایی با مقاطع دایره‌یی و مربعی در حالتی که قطر ستون دایره‌یی برابر با بعد ستون مربعی است، نتیجه گرفته شده است که ستون با مقطع مربعی، مقدار بیشتری از فشار و ضربه‌ی ایجادشده ناشی از انفجار را نسبت به ستون با مقطع دایره‌یی متحمل می‌شود؛ بنابراین اندرکنش موج انفجار با ستون مربعی بیشتر بوده است، ولی ستون مستطیلی دچار خرابی کمتری شده است که علت آن بیشتر بودن سطح مقطع ستون مستطیلی نسبت به دایره‌یی است که منجر به گیرداری بیشتر ستون به پی و در نتیجه بیشتر بودن مقاومت برشی می‌شود.<sup>[۱۱]</sup>

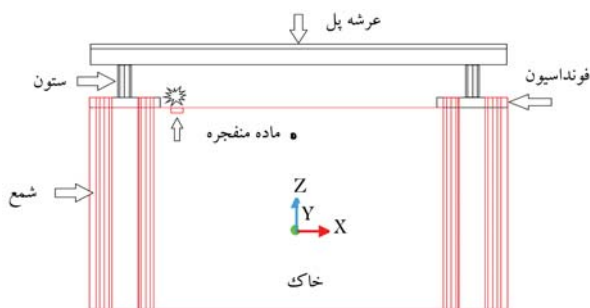
در ادامه‌ی مطالعات انجام شده مبنی بر بررسی رفتار دینامیکی انواع پل‌ها تحت اثر انفجار، در پژوهش حاضر با استفاده از هیدروکد المان محدود LS-DYNA به ارزیابی پاسخ دینامیکی پل رودخانه‌یی بتنی کلل واقع در استان بوشهر تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT در اطراف پایه‌ی پل پرداخته و مقادیر خرابی در ستون، پی و شمع‌ها بررسی شده است. همچنین در ابتدای کار، مقایسه‌ی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از فرمول‌های طراحی آیین‌نامه‌ی انفجار ارتش آمریکا ۱-TM۵-۸۵۵-۱<sup>[۱۲]</sup> صورت گرفته و در ادامه، پاسخ دینامیکی اثر انفجار سطحی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۶۳۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از پی پل رودخانه‌یی کلل بررسی شده است.

## ۲. مدل متقارن محوری

مطابق شکل ۱، حجم مورد بررسی ۱ مکعب مستطیل متشکل از خاک به ابعاد  $۱۴\text{ m} \times ۲۵\text{ m} \times ۳۶\text{ m}$  است که از خاک و شمع‌های پایه‌ی پل تشکیل شده است. ارتفاع ستون‌ها ۳ متر، طول دهانه‌ی عرشه‌ی پل ۳۶ متر و عرض پل ۱۳ متر است. مهم‌ترین مزیت موجود در هندسه‌ی مدل موردنظر، متقارن محوری بودن آن است که به کمک آن امکان ارائه‌ی یک مدل سه‌بعدی متقارن محوری با تعداد المان‌های بسیار کمتری نسبت به مدل اصلی وجود دارد. همچنین استفاده از یک مدل متقارن محوری باعث شد که هم در زمان حل مسئله و هم در حافظه‌ی سخت‌افزاری موردنیاز برای حل، صرفه‌جویی بسیار مطلوبی به وقوع بپیوندد.<sup>[۱۳]</sup> برای مدل‌سازی از المان ۱۶۴ solid استفاده شده است که ۸ گره دارد که هر کدام از آن‌ها ۹ درجه آزادی دارند (شتاب، سرعت و جابه‌جایی در ۳ جهت). مقاومت فشاری بتن مورد استفاده برای ساخت پل،  $۲۳/۱$  مگاپاسکال بوده است، که با استفاده از \*MAT\_ADD\_EROSION و وارد کردن  $\sigma_{\max} = ۲۳/۱$  مگاپاسکال، گسیختگی قابل مشاهده بوده است. عملکرد مذکور بدین‌گونه است که وقتی انفجار صورت می‌گیرد، المان‌هایی از پل که تنش آن‌ها از  $۲۳/۱$  مگاپاسکال تجاوز کنند، حذف می‌شوند و به راحتی می‌توان قسمت‌هایی از تونل که تخریب می‌شوند، را مشاهده و نقاط بحرانی را برآورد کرد. آنالیز مذکور در فضای اویبری - لاگرانژی (ALE) انجام شده و برای مدل کردن هوا، خاک و TNT از المان اویبری - لاگرانژی (ELFORM=۱۱) و برای مدل کردن پل از المان لاگرانژی (ELFORM=۱) استفاده شده است. برای انتقال فشار موج انفجار به پل از دستور \*CONstrained - LAGRANGE - IN - SOLID استفاده شده است. همچنین دستور مذکور در مسائل اندرکنش خاک و سازه استفاده می‌شود، تا تمامی فازهای هوا، خاک، ماده‌ی منفجره و سازه به‌صورت یک‌پارچه مدل شوند. شکل ۲، قسمت‌های تشکیل‌دهنده‌ی مدل متقارن محور را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ابعاد و اندازهی هندسه‌ی مورد بررسی.



شکل ۲. قسمت‌های اصلی مدل متقارن محوری.

### ۳.۳. پل

برای مدل کردن پل از MATERIAL شماره ۳ نرم افزار LSDYNA

(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)

استفاده شده است.<sup>[۱۸]</sup> پارامترهای مورد نیاز برای مدل کردن پل در جدول ۳ ارائه شده است که در آن  $\rho$  چگالی،  $E$  مدول کشسانی،  $v$  ضریب پواسون،  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $E_{tan}$  مدول تانژانت،  $\beta$  پارامتر سختی و  $\epsilon_f$  کرنش گسیختگی هستند.<sup>[۱۴]</sup>

### ۴.۳. TNT

برای مدل کردن TNT از MATERIAL شماره ۸ نرم افزار LSDYNA

(\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN)

و معادله‌ی حالت EOS-Jones-Wilkins-Lee (JWL) که فشار آزاد شده‌ی ناشی از انفجار را با معادله‌ی ۳ تعریف می‌کند، استفاده شده است:<sup>[۱۹-۲۱]</sup>

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

که در آن،  $P$  فشار ایجاد شده‌ی ناشی از انفجار،  $E$  انرژی داخلی در واحد حجم،  $V$  حجم نسبی،  $A$ ،  $B$ ،  $R_1$  و  $R_2$  ثابت‌های رابطه هستند که مقادیر آنها در جدول ۴ ارائه شده است.<sup>[۱۴]</sup>

### ۴. کنترل صحت نتایج عددی

برای اثبات صحت نتایج عددی، با استفاده از نرم افزار المان محدود LS-DYNA انفجار بر روی خاک بدون وجود پل انجام و فشار بیشینه در اعماق مختلف از

### ۳. انتخاب Material و معادلات حالت مناسب

#### EOS) برای مدل کردن هوا، خاک، پل و TNT

##### ۱.۳. هوا

برای مدل کردن هوا از Material شماره ۹ نرم افزار LSDYNA (\*MAT\_NULL) و معادله‌ی خطی چند جمله‌ی (EOS\_AIR\_LINEAR\_POLYNOMIAL) که فشار را با معادله‌ی ۱ تعریف می‌کند، استفاده شده است.<sup>[۱۵،۱۴]</sup>

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (1)$$

که در آن،  $E_0$  انرژی،  $C_0$ ،  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_3$ ،  $C_4$ ،  $C_5$ ،  $C_6$  و  $C_0$  ثابت معادله،  $\rho$  چگالی،  $E_0$  انرژی اولیه هستند که مقادیر آنها برگرفته از کتابخانه‌ی نرم افزار AUTODYN بوده و در جدول ۱ ارائه شده‌اند،<sup>[۱۴]</sup> و مقدار  $\mu$  از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (2)$$

##### ۲.۳. خاک

برای مدل کردن خاک از MATERIAL شماره ۵ نرم افزار LSDYNA (\*MAT\_SOIL\_AND\_FOAM) برگرفته از مدل Krieg استفاده شده

است.<sup>[۱۶،۱۷]</sup> در جدول ۲، مشخصات خاک Soil medium مشاهده می‌شود که در آن:  $\rho$  چگالی،  $G$  مدول برشی،  $K_u$  مدول حجمی،  $a_0$ ،  $a_1$  و  $a_2$  ثابت‌های معادله و  $P_{cut}$  فشار مورد نیاز برای گسیختگی کششی هستند.<sup>[۱۴]</sup>

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای هوا.<sup>[۱۵]</sup>

$E_0$ (MPa)	$C_6$	$C_5$	$C_4$	$C_3$	$C_2$	$C_1$	$C_0$	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )
۰٫۲۵	۰	۰٫۴	۰٫۴	۰	۰	۰	۰	۱٫۲۹

جدول ۲. پارامترهای مورد نیاز برای خاک.<sup>[۱۶]</sup>

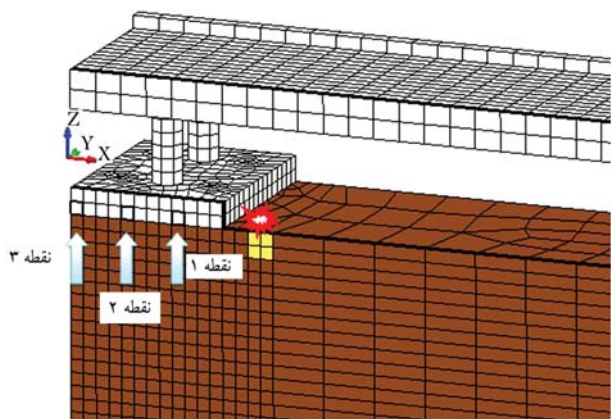
$P_{cut}$ (MPa)	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$K_u$ (MPa)	$G$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )
۰	۰٫۳	۰٫۷	۰٫۳۴	۱۴۲	۲۴	۱۷۶۲
۰٫۴	۰٫۲۹	۰٫۲۸۳	۰٫۲۷	۰٫۲۴۶	۰٫۲۴۲	۰٫۱۹۲
۱۶۴۰	۳۲۰	۲۴۰	۱۶۰	۸۰	۴۸	۲۴
						۱۶
						۸
						۰

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای پل.<sup>[۱۸]</sup>

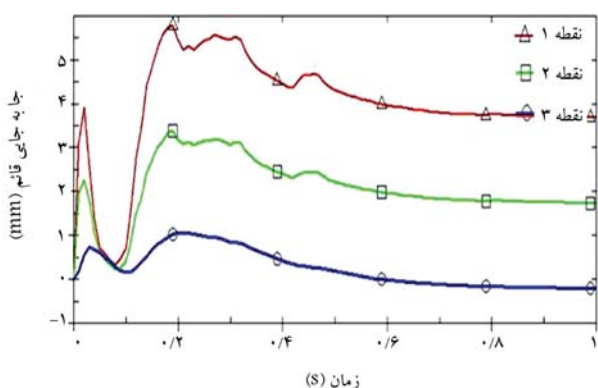
$\epsilon_f$	$\beta$	$E_{tan}$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$v$	$E_0$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )
۰٫۸	۰٫۵	۴۰۰۰	۱۰۰	۰٫۲۵	۳۹٫۱	۲۶۵۰

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای TNT.<sup>[۱۵]</sup>

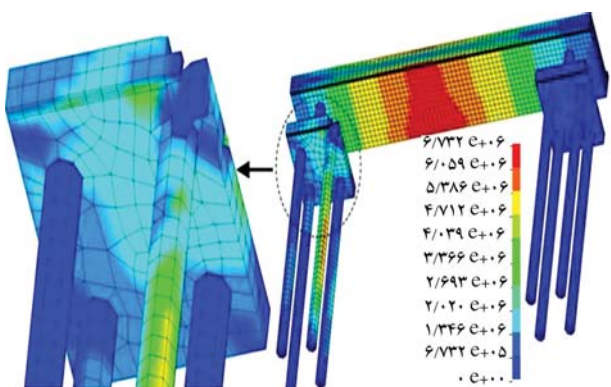
$\rho$ (kg/m <sup>۳</sup> )	$\nu_D$ (m/s)	$P_{cut}$ (MPa)	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)
۱۶۳۰	۶۹۳۰	$۲٫۱ \times ۱۰^۴$	$۳٫۷۳۸ \times ۱۰^۵$	$۳٫۷۴۷ \times ۱۰^۳$
$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_0$	$E_0$ (MPa)
۴٫۱۵	۰٫۹	۰٫۳۵	۱	$۶ \times ۱۰^۳$



شکل ۴. موقعیت نقاط ۱، ۲ و ۳.



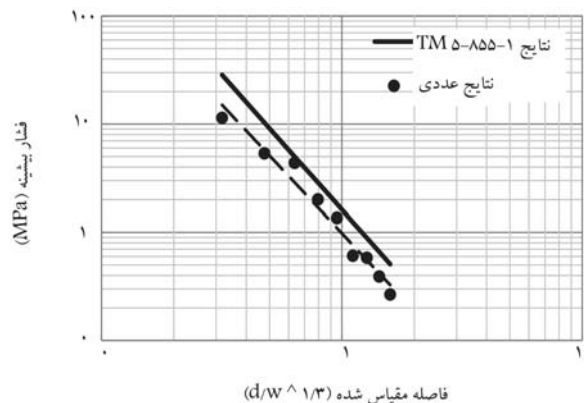
شکل ۵. جاب‌جایی در راستای قائم نقاط ۱، ۲ و ۳.



شکل ۶. نمایی از خرابی و توزیع تنش در کل سازه.

در شکل ۶، نحوه‌ی توزیع تنش در عرشه، پی، شمع‌ها، ستون‌ها و خرابی ایجاد شده در پی را براساس معیار وان مایسز در زمان ۰/۱۷ ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وسط دهانه‌ی عرشه و شمع به دلیل لنگر وارده‌ی ناشی از بار انفجار بیشتر در معرض آسیب‌پذیری هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پی پل به میزان ۲ متر در راستای X (راستای طولی پل) و ۳/۵ متر در راستای Y (راستای عرضی پل) دچار خرابی شده و ناحیه‌ی خرابی مذکور در شمع تا ارتفاع ۴ متری است.<sup>[۲۵]</sup>

در شکل ۷، جاب‌جایی در راستای قائم نقاطی در ارتفاع‌های ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری از شمع پل در عمق خاک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که



شکل ۳. مقایسه‌ی پیک فشار در حالت عددی و تجربی (TM5-855-1) برای خاک.

خاک اندازه‌گیری شده و در ادامه، با استفاده از رابطه‌ی ۴، برگرفته از آیین‌نامه‌ی انفجار ارتش آمریکا TM5-855-1، بیشینه‌ی فشار در عمق موردنظر محاسبه و جواب‌های عددی و تجربی با هم مقایسه شده‌اند.<sup>[۲۳،۲۲]</sup>

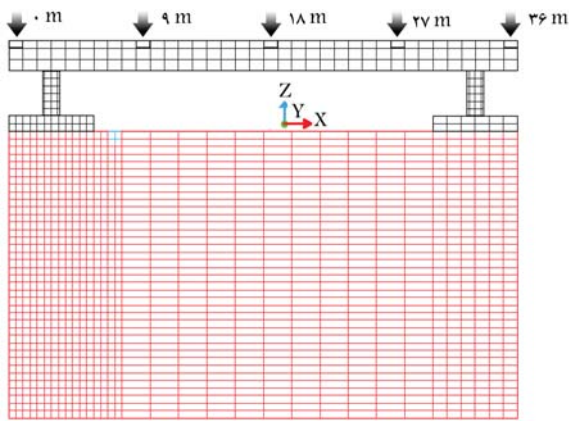
$$P_p = 0.407 f \rho_c \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n} \quad (4)$$

که در آن،  $P_p$  فشار بیشینه،  $f$  ضریب پیوستگی که به عمق مقیاس شده‌ی TNT بستگی دارد و از رابطه‌ی  $\left( \frac{d}{W^{1/3}} \right)$  به دست می‌آید که  $d$  فاصله‌ی مرکز TNT تا سطح زمین،  $W$  وزن ماده‌ی منفجره،  $\rho_c$  امیدانس،  $R$  فاصله تا انفجار و  $n$  ضریب کاهش است. برای به دست آوردن فشار بیشینه از فرمول ۴ باید به جدول ارائه شده در آیین‌نامه‌ی TM5-855-1 رجوع و خاک موردنظر را انتخاب کرد. با توجه به سرعت موج برشی در خاک soil medium، خاک مورد بررسی از نوع شماره‌ی ۳ است. حال با قرار دادن مقادیر پارامترهای ارائه شده برای خاک تپ ۳ و در نظر گرفتن  $f = 0.4$ ، مقدار بیشینه‌ی فشار در عمق موردنظر به دست آورده می‌شود. شکل ۳، مقایسه‌ی بین نتایج عددی و نتایج فرمول تجربی مهندسان ارتش آمریکا در آیین‌نامه‌ی TM5-855-1 است که بر حسب فشار و فاصله‌ی مقیاس شده‌ی soil medium است که برای خاک ارائه شده است.<sup>[۲۲]</sup>

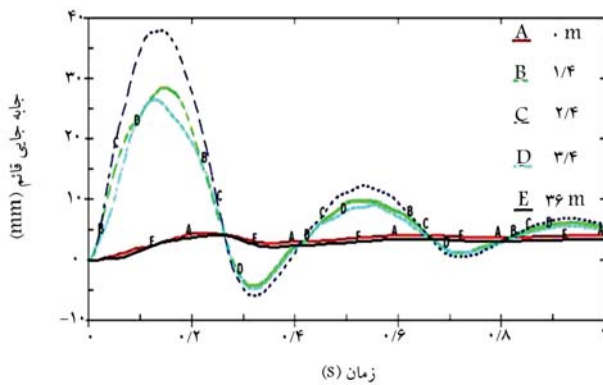
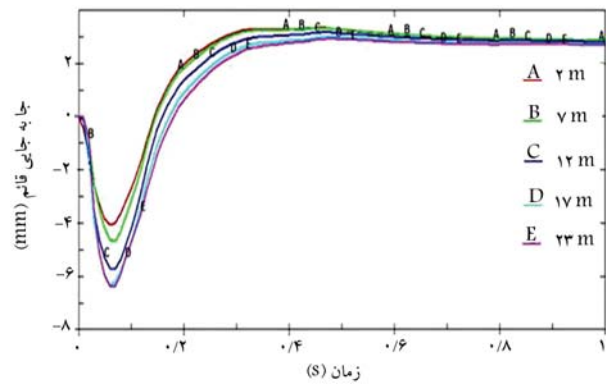
## ۵. بررسی رفتار دینامیکی سازه تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT

### ۱.۵. انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از پی پل

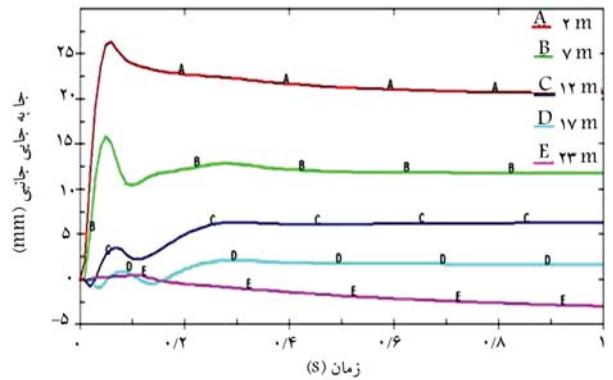
برای ارزیابی میزان جاب‌جایی نقاط مختلف پی پل، المان‌هایی به فواصل ۳ متری، ۵ متری و ۷ متری از انفجار روی شالوده‌ی پل مشخص شده‌اند که به ترتیب نقاط ۱، ۲ و ۳ نام‌گذاری شده‌اند و میزان و نحوه‌ی جاب‌جایی اولیه و نهایی آنها اندازه گرفته می‌شود. موقعیت نقاط مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، نقاط ۱، ۲ و ۳ در لحظات اولیه به دلیل برخورد امواج فشاری ناشی از انفجار دچار جاب‌جایی اولیه در امتداد قائم به ترتیب به میزان ۵/۸، ۳/۴ و ۱ میلی‌متر و در نهایت به دلیل عبور امواج فشاری از پل و تغییر شکل خمیری رخ داده در بتن به ترتیب دچار جاب‌جایی نهایی به میزان ۱/۷، ۳/۷ و ۰/۱ میلی‌متر می‌شوند، که با مقایسه با نقطه‌ی ۱، به ترتیب کاهش در میزان جاب‌جایی نهایی در نقطه‌های ۲ و ۳ به میزان ۵۴٪ و ۹۷٪ مشاهده می‌شود.



شکل ۹. نمایی از موقعیت المان‌های مورد بررسی در عرشه‌ی پل.



ل.



دهانه (نقطه‌ی D) بیشترین میزان جابه‌جایی را دچار شده‌اند. نقاط A و E که در دو انتها قرار دارند، تقریباً دچار یک میزان جابه‌جایی شده‌اند، ولی طبیعتاً نقطه‌ی A به دلیل نزدیک بودن به مرکز انفجار، کمی بیشتر جابه‌جا شده است. مقایسه‌های ذکر شده، در مورد میزان جابه‌جایی اولیه در نقاط مورد نظر است که با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی در راستای قائم نقاط فوق در نهایت به سمت صفر میل می‌کنند که علت آن رفتار خطی عرشه‌ی پل و وارد نشدن به مرحله‌ی غیرخطی است. لذا قابل ذکر است که با انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از پی پل، هیچ‌گونه خرابی در عرشه‌ی پل اتفاق نمی‌افتد و فقط پی و شمعه‌ها دچار آسیب‌دیدگی می‌شوند.

### ۲.۵. انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از پی پل

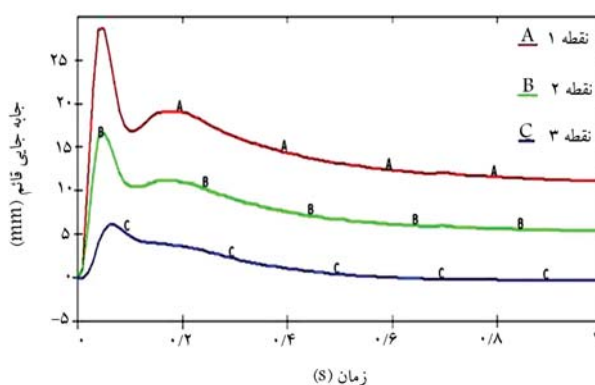
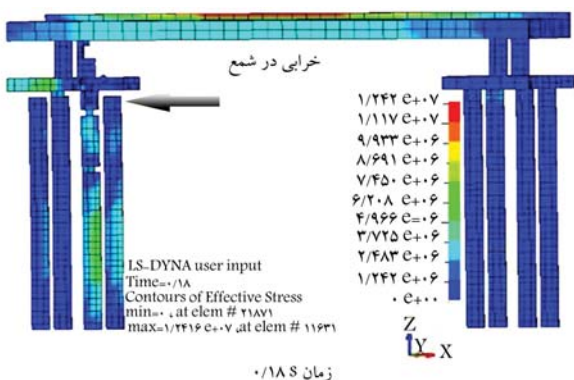
برای ارزیابی میزان جابه‌جایی نقاط مختلف پی پل، المان‌هایی به فواصل ۳ متری، ۵ متری و ۷ متری از انفجار روی شالوده‌ی پل مشخص شده‌اند که به ترتیب نقطه‌های ۱، ۲ و ۳ نام‌گذاری و میزان و نحوه‌ی جابه‌جایی اولیه و نهایی آن‌ها اندازه‌گرفته شده است. موقعیت نقاط مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که نقطه‌های ۱، ۲ و ۳ در لحظات اولیه به دلیل برخورد امواج فشاری ناشی از انفجار، دچار جابه‌جایی اولیه در امتداد قائم به ترتیب به میزان ۱۷، ۲۹ و ۶ میلی‌متر و در نهایت به دلیل عبور امواج فشاری از پی و تغییر شکل خمیری رخ داده در بتن به ترتیب دچار جابه‌جایی نهایی به میزان ۱۱، ۵/۶ و ۰/۲ میلی‌متر شده‌اند که با مقایسه با نقطه‌ی ۱، به ترتیب کاهش در میزان جابه‌جایی نهایی در نقطه‌های ۲ و ۳ به میزان ۴۹٪ و ۹۸٪ مشاهده می‌شود.

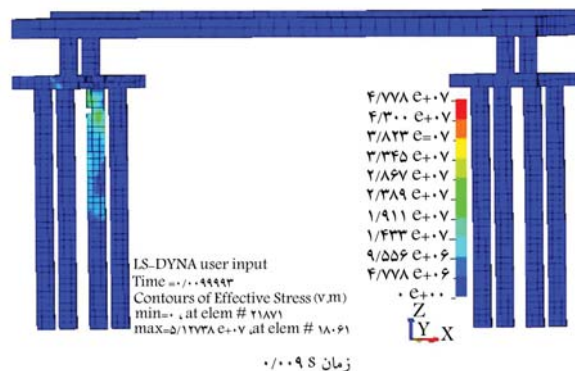
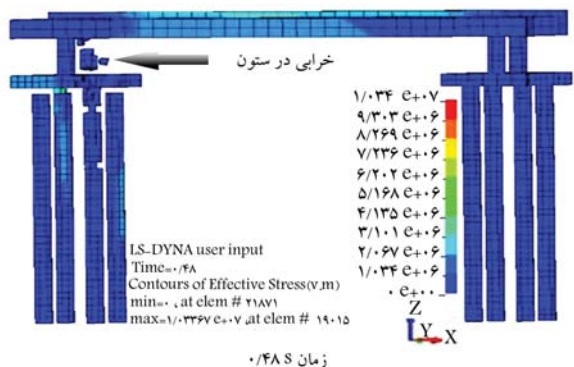
المان‌های شمعه در ارتفاعات ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری از سطح زمین به ترتیب دچار جابه‌جایی‌های اولیه به میزان ۴، ۷، ۱۲، ۱۷، ۲۳ و ۲۶ میلی‌متر شده‌اند که با مقایسه با عمق ۲ متری به ترتیب افزایش در میزان جابه‌جایی اولیه‌ی نقاط شمعه در ارتفاعات ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری در راستای قائم به میزان ۱۷/۵٪، ۴۲/۵٪، ۵۵٪ و ۶۰٪ مشاهده می‌شود و در نهایت، نقاط فوق با درصد کمی اختلاف دچار جابه‌جایی نهایی به میزان ۲ میلی‌متر شده‌اند.

در شکل ۸، جابه‌جایی در راستای جانبی نقاطی در ارتفاع‌های ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری از شمعه پل در عمق خاک مشاهده می‌شود که مطابق آن نقاط شمعه در ارتفاعات ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری از سطح زمین به ترتیب دچار جابه‌جایی‌های جانبی اولیه به میزان ۲۶/۵، ۱۶، ۳/۶، ۰/۹ و ۰/۴ میلی‌متر شده‌اند که با مقایسه با عمق ۲ متری به ترتیب کاهش در میزان جابه‌جایی اولیه‌ی نقاط شمعه در ارتفاعات ۲، ۷، ۱۲، ۱۷ و ۲۳ متری در راستای جانبی به میزان ۴۰٪، ۸۶٪، ۹۶٪ و ۹۸٪ مشاهده می‌شود. نقاط مذکور به ترتیب دچار جابه‌جایی دائم در امتداد جانبی به میزان ۲۱، ۱۲، ۶/۳، ۱/۷ و ۰/۳ میلی‌متر شده‌اند که علت آن ایجاد تغییر مکان دائمی و تغییر شکل خمیری رخ داده در شمعه پل است.

برای مشاهده‌ی رفتار دینامیکی عرشه‌ی پل، المان‌هایی در نقاط مختلف عرشه مشخص شده و جابه‌جایی آن‌ها در راستای قائم به دست آمده است. نقاط A، B، C، D، E و به ترتیب در ابتدای دهانه، در ۱/۴ دهانه، در وسط دهانه (۱/۲)، ۳/۴ دهانه و در انتهای پل از مرکز انفجار، یعنی در فاصله‌ی ۳۶ متری قرار دارند. موقعیت نقاط مذکور در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین مطابق شکل ۱۰، در وسط دهانه بیشترین میزان جابه‌جایی اتفاق افتاده و علت آن، بیشینه بودن لنگر خمشی در وسط دهانه است. پس از آن به ترتیب فواصل ۱/۴ دهانه (نقطه‌ی B) و ۳/۴

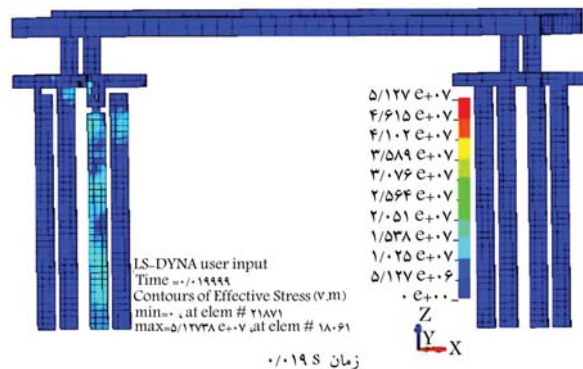
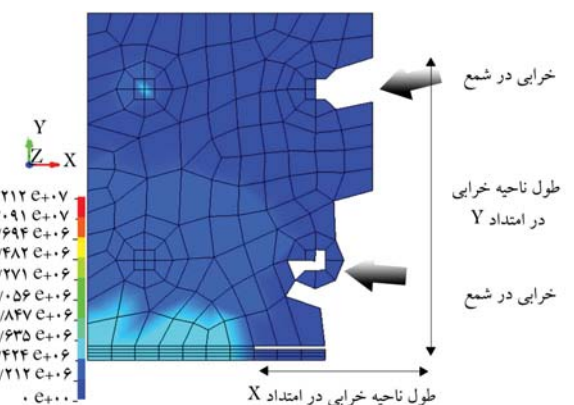


شکل ۱۱. جابه‌جایی در راستای قائم نقطه‌های ۱، ۲ و ۳.



شکل ۱۳. نحوه توزیع تنش و خرابی در اجزاء پل در زمان‌های ۰٫۱۸ و ۰٫۴۸ ثانیه.

زمان ۰٫۰۹ س



شکل ۱۲. نحوه توزیع تنش و خرابی در اجزاء پل در زمان‌های ۰٫۰۹ و ۰٫۱۹ ثانیه.

زمان ۰٫۱۹ س

شکل ۱۴. نحوه توزیع تنش و خرابی در اجزاء پی.

می‌شود، که مطابق آن طول ناحیه‌ی خرابی ۳ متر در راستای X و ۶ متر در راستای Y است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده شد که تحت انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، شمع‌ها و ستون‌های نزدیک به محل انفجار به طور کامل تخریب شده و هیچ‌گونه آسیبی به شمع‌های دهانه‌ی مجاور وارد نشده است و این خود کافی است که پل تحت اثر وزن خود نشست کند و از کار بیفتد.

به منظور بررسی رفتار دینامیکی پل در راستای عرضی (Y)، تعدادی نقاط واقع بر روی پی پل انتخاب و جابه‌جایی در راستای قائم (Z) آن‌ها اندازه‌گرفته شده‌اند. نقاط مذکور که نقاط الف، ب، ج و د نام‌گذاری شده‌اند، به ترتیب در فواصل ۱، ۳، ۵ و ۷ متری از ابتدای پل قرار دارند و در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

مطابق شکل ۱۶، اگر پی پل به دو قسمت تقسیم شود، نقاط ابتدایی (الف و ب) دچار جابه‌جایی در راستای مثبت و نقاط انتهایی (ج و د) دچار جابه‌جایی

با مقایسه‌ی میزان جابه‌جایی نقطه‌های ۱، ۲ و ۳ در حالت انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، به ترتیب در میزان جابه‌جایی اولیه به میزان ۸٪ در نقطه‌های ۱ و ۲ و ۸۳٪ در نقطه‌ی ۳ کاهش مشاهده می‌شود. این میزان کاهش در جابه‌جایی نهایی در نقاط مذکور به ترتیب ۶۶٪، ۷۰٪ و ۵۰٪ است.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نحوه توزیع تنش در اجزاء مختلف پل و خرابی در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۲، در لحظات اولیه‌ی انفجار (۰٫۰۹ ثانیه) خرابی در شمع تا ارتفاع ۴ متری است و پس از گذشت ۰٫۱ ثانیه به ارتفاع ۶٫۵ متری افزایش پیدا کرده و ۳ شمع واقع در زیر ۲ ستون تخریب شده و توان باربری خود را از دست داده‌اند. شکل ۱۳، شمای کلی از خرابی در پی و ستون‌ها، از بین‌رفتگی المان‌ها و در نهایت از کارافتادگی سازه را تحت انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از فونداسیون نشان می‌دهد.

در شکل ۱۴، نحوه توزیع تنش و خرابی در مقطع پی و شمع‌ها مشاهده

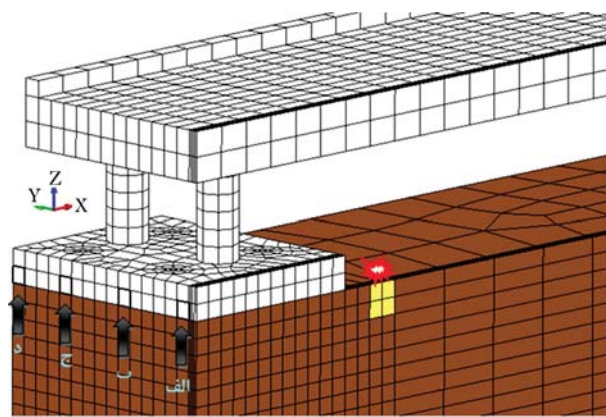
پیل از مرکز انفجار، یعنی در فاصله ۳۶ متری قرار دارند. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در وسط دهانه بیشترین میزان جابه‌جایی اتفاق افتاده و علت آن، بیشینه بودن لنگر خمشی در وسط دهانه است. پس از آن به ترتیب فواصل ۱/۴ (نقطه B) و ۳/۴ (نقطه C) دهانه، بیشترین میزان جابه‌جایی را دچار شده‌اند. نقاط A و E که در دو انتها قرار دارند، تقریباً دچار یک میزان جابه‌جایی شده‌اند، ولی طبیعتاً نقطه A به دلیل نزدیک بودن به مرکز انفجار، کمی بیشتر جابه‌جا شده است. میزان جابه‌جایی اولیه نقاط A، B، C، D و E به ترتیب ۶، ۳۵، ۵۰، ۳۲ و ۵ میلی‌متر است. مقایسه‌های ذکر شده در مورد میزان جابه‌جایی اولیه در نقاط مورد نظر است که با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی در راستای قائم نقاط مذکور در نهایت به صفر میل می‌کنند؛ که علت آن در رفتار خطی عرشه‌ی پیل و وارد نشدن به مرحله‌ی غیرخطی است. لذا قابل ذکر است که با انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱ متری از پی پیل، هیچ‌گونه خرابی در عرشه‌ی پیل اتفاق نمی‌افتد و فقط پی و شمع‌ها دچار آسیب‌دیدگی می‌شوند.

**۳.۵. انفجار ۱۶۳۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱ متری از پی پیل**  
در شکل ۱۸، نحوه‌ی توزیع امواج فشاری در شمع و خرابی در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود که مطابق آن در لحظات اولیه انفجار (۰/۰۹ ثانیه)، خرابی در شمع تا ارتفاع ۴ متری است و پس از گذشت ۰/۰۱ ثانیه به ارتفاع ۸ متری افزایش پیدا کرده است و ۳ شمع واقع در زیر ۲ ستون تخریب شده و توان باربری خود را از دست داده‌اند و قطعاً پیل نشست می‌کند و رفت و آمد روی آن غیرممکن می‌شود.

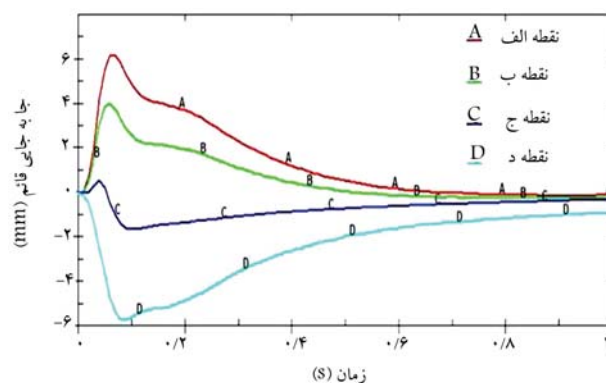
به منظور بررسی اثر وزن ماده‌ی منفجره در رفتار دینامیکی شمع پیل شکل ۱۹ ارائه شده است که در آن تغییرات جابه‌جایی اولیه‌ی المان‌های شمع در امتداد قائم، واقع در عمق‌های ۰/۲، ۰/۷، ۱/۲، ۱/۷ و ۲/۳ متری از سطح زمین تحت اثر انفجار ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۶۳۰ کیلوگرم TNT نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت اثر انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT، تغییرات جابه‌جایی نقاط مختلف شمع و شیب نمودار بسیار کم است؛ اما تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ و ۱۶۳۰ کیلوگرم TNT، تغییرات جابه‌جایی نقاط مختلف شمع تا ارتفاع ۱۲ متری چشم‌گیر و شیب نمودار زیاد است، ولی از عمق ۱۲ متر تا ۲۳ متر از سطح زمین، به دلیل خاصیت میراگر بودن خاک و کاهش شدت امواج فشاری در اعماق پایین‌تر، تغییرات جابه‌جایی و شیب نمودار کم است.

## ۶. نتیجه‌گیری

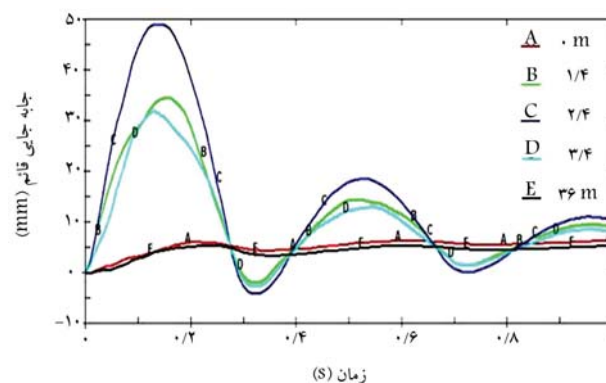
- در مدل المان محدود، انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱ متری از پایه‌ی پیل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که هیچ‌گونه خرابی در عرشه‌ی پیل اتفاق نیفتاده و پی پیل به میزان ۲ متر در راستای X (راستای طولی پیل) و ۳/۵ متر در راستای Y (راستای عرضی پیل) دچار خرابی شده و ناحیه‌ی خرابی مذکور در شمع تا ارتفاع ۴ متری بوده است.
- بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ی مذکور تحت اثر انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT انجام و مشاهده شد که طول ناحیه‌ی خرابی، ۳ متر در راستای X و ۶ متر در راستای Y است. میزان جابه‌جایی در امتداد قائم نقاط مختلف پی پیل اندازه گرفته شد و نتایج نشان دادند که نقاط ابتدایی (الف و ب) دچار جابه‌جایی در



شکل ۱۵. موقعیت نقاط الف، ب، ج و د.



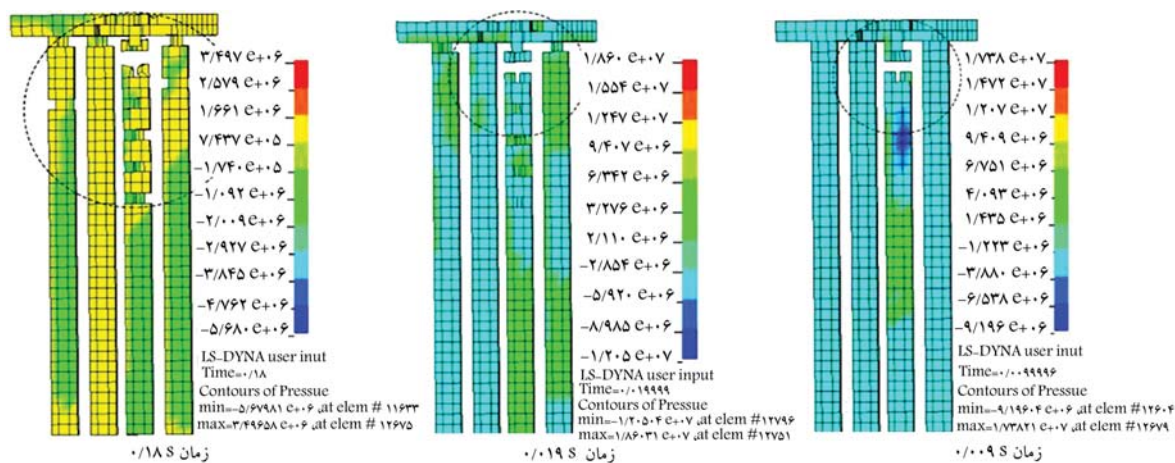
شکل ۱۶. نحوه‌ی جابه‌جایی نقطه‌های الف، ب، ج و د در راستای قائم.



شکل ۱۷. جابه‌جایی در راستای قائم نقاط مختلف عرشه‌ی پیل.

در راستای منفی می‌شوند. این‌گونه می‌توان بیان کرد که در اثر انفجار به‌وجود آمده و برخورد امواج فشاری به پی پیل، یک بلندشدگی در پایه‌ی پیل رخ می‌دهد و علت آن لنگر به‌وجود آمده تحت بار انفجار است. شکل ۱۶، بیان‌گر این مطلب است که نقاط ابتدایی و انتهایی پی (الف و د) تقریباً به یک میزان جابه‌جا شده‌اند، ولی در خلاف جهت هم هستند. تمام نقاط یک وجه مشترک دارند، که آن هم محدود شدن رفتار آن‌ها در ناحیه‌ی خطی و وارد نشدن به مرحله‌ی غیرخطی است.

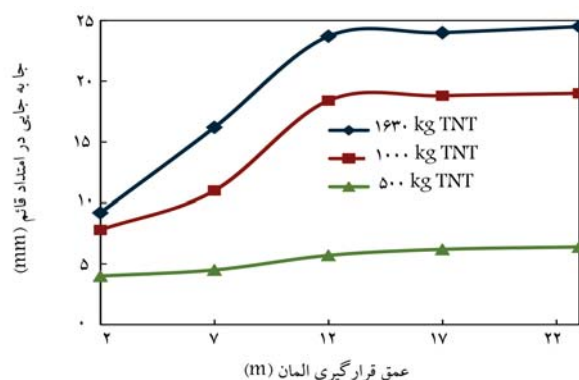
برای مشاهده‌ی رفتار دینامیکی عرشه‌ی پیل، المان‌هایی در نقاط مختلف عرشه مشخص شده و جابه‌جایی آن‌ها در راستای قائم به‌دست آمده است (موقعیت آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است). نقاط A، B، C، D و E به ترتیب در ابتدای دهانه، در ۱/۴ دهانه، در وسط دهانه (۱/۲)، ۳/۴ دهانه و در انتهای



شکل ۱۸. نحوه‌ی توزیع امواج فشاری و خرابی در شمع‌ها در زمان‌های مختلف.

۳. با مقایسه‌ی میزان جابه‌جایی نقطه‌های ۱، ۲ و ۳ در حالت انفجار ۵۰۰ کیلوگرم TNT با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، به ترتیب در میزان جابه‌جایی اولیه به میزان ۸۰٪ در نقطه‌های ۱ و ۲ و ۸۳٪ در نقطه‌ی ۳ کاهش مشاهده می‌شود. این میزان کاهش در جابه‌جایی نهایی در نقاط مذکور به ترتیب ۶۶٪، ۷۰٪ و ۵۰٪ است.

۴. با ارزیابی اثر انفجار ۱۶۳۰ کیلوگرم TNT بر ستون‌های پل بتنی مشاهده شد که در لحظات اولیه‌ی انفجار (۰/۰۰۹ ثانیه)، خرابی در شمع تا ارتفاع ۴ متری است و پس از گذشت ۰/۰۱ ثانیه به ارتفاع ۸ متری افزایش پیدا می‌کند و ۳ شمع واقع در زیر ۲ ستون تخریب شده و توان باربری خود را از دست داده‌اند و قطعاً پل نشست می‌کند و رفت و آمد روی پل غیرممکن می‌شود.



شکل ۱۹. میزان جابه‌جایی نقاط مختلف شمع تحت اثر انفجار مقادیر مختلف TNT.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان به جهت حمایت‌های مالی اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان بوشهر به شماره‌ی قرارداد ۵۸۹۳۹-۲۲-الف، از مدیرکل اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان بوشهر صمیمانه قدردانی می‌کنند.

راستای مثبت و نقاط انتهایی (ج و د) دچار جابه‌جایی در راستای منفی شده‌اند. این‌گونه می‌توان بیان کرد که در اثر انفجار به‌وجود آمده و برخورد امواج فشاری به پل، یک بلندشدگی در پایه‌ی پل رخ می‌دهد و علت آن لنگر به‌وجود آمده تحت بار انفجار است.

### منابع (References)

- Werner, S.D., Beck, J.L. and Levine, M.B. "Seismic response evaluation of meloland road over pass using imperial valley earthquake records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **15**(2), pp. 249-274 (1987).
- Kato, S., Sohri, T. and Gould, P.L. "A modified thin-layered far field soil element for Soil-structure interaction, axisymmetric structures", *Computers and Geotechnics*, **2**(3), pp. 167-184 (1986).
- Lysmer, J. and Richart, F.E. "Dynamic response of footings to vertical loading", *Journal of Soil Mechanics and*

*Foundation Division*, **92**(1), pp. 65-91 (1966).

- Tang, K.C. and Hao, H. "Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations", *Engineering Structures*, **32**(10), pp. 3180-3192 (2010).
- Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W. and Zhou, Y.X. "Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **35**, pp. 227-234 (2013).
- Jayasinghe, L.B., Thambiratnam, D.P., Perera, N. and Jayasooriya, J.H.A.R. "Computer simulation of underground blast response of pile in saturated soil", *Computers and Structures*, **120**, pp. 86-95 (2013).



7. Wu, C and., Hao, H. "Numerical simulation of structural response and damage to simultaneous ground shock and airblast loads", *International Journal of Impact Engineering*, **34**(3), pp. 556-572 (2007).
8. Wang, W., Liu, R. and Wu, B. "Analysis of a bridge collapsed by an accidental blast loads", *Engineering Failure Analysis*, **36**, pp. 353-361 (2014).
9. Deng, R.B. and Jin, X.L. "Numerical simulation of bridge damage under blast loads", *WSEAS Transation on Computers*, **8**(9), pp. 1564-1574 (2009).
10. Williams, G.D. and Williamson, E.B. "Response of reinforced concrete bridge columns subjected to blast loads", *Structural Engineering*, **137**(9), pp. 903-913 (2011).
11. Eric, B., Williamson, E.B., Bayrak, O., Daivis, P.E.C. and Williams, G.D. "Performance of bridge columns subjected to blast loads: Results and recommendations", *Journal of Bridge Engineering*, **16**(6), pp. 703-710 (2012).
12. Naggy, N., Mohamed, M. and Boot, J.C. "Nonlinear numerical modelling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures", *International Journal of Geomechanics and Engineering*, **2**(1), pp. 1-18 (2010).
13. Wang, Z.L., Li, Y.C. and Shen, R.F. "Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion", *International Journal of Rock Mechanic & Mining Sciences*, **44**(5), pp. 730-738 (2007).
14. LSTC, "LS-DYNA keyword user's manual", Livermore Software Technology Corporation, California, USA (2007).
15. ANSYS Inc. AUTODYN, User Manual Version 12 (2009).
16. Xu, T., Yao, A., Zeng, X. and Li, Y. "Study on the security conditions of parallel laying gas transmission pipeline under blast loading", *American Society of Civil Engineers*, pp. 1401-1411 (2011).
17. Krieg, R.D., *A Simple Constitutive Description for Cellular Concrete*, Sandia National Laboratories, California, USA, 100 p. (1972).
18. Yang, Y., Xie, X. and Wang, R. "Numerical simulation of operating metro tunnel induced by ground explosion", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **2**(4), pp. 373-384 (2010).
19. Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S. and Tang, F. "Experimental study and numerical simulation of the damage mode of a square reinforced concrete slab under close-in explosion", *Journal of Engineering Failure Analysis*, **27**, pp. 41-51 (2013).
20. Wu, C., Lu, Y. and Hao, H. "Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **28**(1), pp. 93-109 (2004).
21. Mobaraki, B. and Vaghefi, M., "Effect of the soil type on the dynamic response of the tunnel under surface detonation," *Combustion. Explosions and Shock Waves*, **52** (3), pp. 363-370, (2016).
22. Mobaraki, B. and Vaghefi, M. "Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **47**, pp. 114-122 (2015).
23. TM5-855-1, "Fundamental of protective design for conventional weapons", US Army Engineers Waterways Experimental Station, Vicksburg, USA (1986).
24. Leong, E.C., Anand, S., Cheong, H.K. and Lim, C.H. "Re-examination of peak stress and scaled distance due to ground shock", *International Journal of Impact Engineering*, **34**(9), pp. 1487-1499 (2007).
25. Baylot, J.T. and Bevins, T.L. "Effect of responding and failing structural components on the air blast pressure and loads on and inside of the structure", *Journal of Computers and Structures*, **85**(11-14), pp. 891-910 (2007).