

بدست آوردن بهینه‌ترین Mstage برای مدل‌سازی تونل‌های مکانیزه در Plaxis

جواد حسین زاده^۱، امیرحسین اقبالی^۲، علی نعمتی‌حیاتی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران.

^۲ عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران.

^۳ دکتری تخصصی (PhD) مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشجوی سابق دکتری تخصصی PhD ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

دریافت مقاله: ۱۶ آبان ماه ۱۳۹۶

اصلاح مقاله: ۱۱ دی ماه ۱۳۹۶

پذیرش نهایی: ۱۴ دی ماه ۱۳۹۶

چکیده

در اثر حفاری تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی در داخل خاک، چه به صورت سنتی و چه به صورت مکانیزه و با استفاده از ماشین حفاری پیشرفته، شرایط تنش در زمین تغییر می‌کند که الزاماً تغییر شکل‌هایی را به همراه خواهد داشت. به این ترتیب که تاج تونل بر اثر حفاری، نشست کرده که ممکن است نهایتاً به نشست سطح زمین منجر شود و یا در تونل و دهانه آن ریزش‌هایی صورت گیرد. البته میزان نشست سطح زمین در روش‌های پیشرفته حفاری به مراتب بسیار کمتر از روش‌های سنتی خواهد بود. این در حالیست که مدل‌سازی عددی صحیح و دقیق حفاری مکانیزه بوسیله TBM بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از روش عددی اجزاء محدود و نرم افزار Plaxis و در نظر گرفتن مدل رفتاری Hardening Soil به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در تونل‌های حفاری شده بوسیله TBM و همچنین تعیین Mstage مورد نیاز برای مدل‌سازی تونل در حفاری مکانیزه پرداخته می‌شود. بدین صورت که ابتدا مدل‌هایی بصورت NATM در Plaxis با گام‌های ۹ متری مدل‌سازی و نشست آنها با نشست رابطه تحلیلی قیاس شده و در ادامه رابطه‌ای به منظور تخمین بهترین Mstage برای مدل‌سازی حفاری مکانیزه در نرم افزار Plaxis ارائه شده است.

واژگان کلیدی: فضاهای زیرزمینی، حفاری مکانیزه، Plaxis، NATM، TBM.

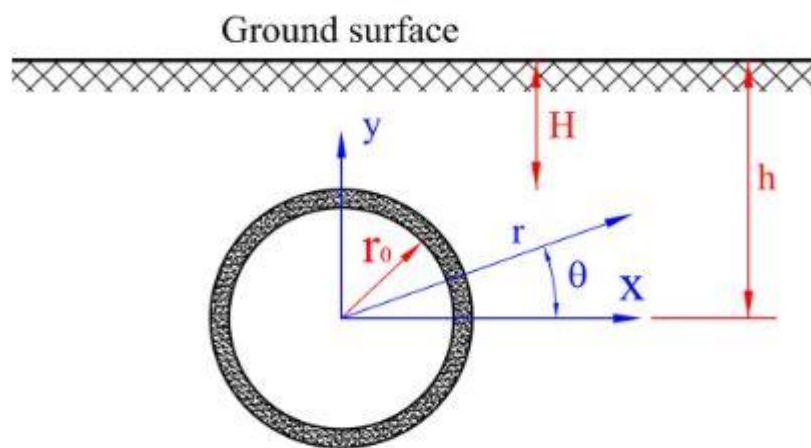
پیش‌بینی نشست

مقدمه

بطور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آنها می‌گردد. از جمله پدیده‌ی ناشی از این دست‌خوردگی وقوع نشست‌های در سطح می‌باشد که این امر به ویژه در مورد تونل‌های کم عمق حفر شده در مناطق شهری و به خصوص به هنگام عبور از زیر مناطق مسکونی یا بافت قدیم شهرها از اهمیت زیادی برخوردار است. گزارش Terzaghi (1942) از اولین گزارش‌هایی است که تأثیر نوع خاک را در انتقال نشست به سطح زمین نشان می‌دهد. او در مورد خاک‌های دانه‌ای عقیده دارد که کل جابجایی‌های زمین در محل تونل به علت اتساع، به تدریج تا سطح زمین مستهلک می‌شود و در واقع از میزان نشست از تراز تونل تا سطح زمین کاسته می‌گردد. در صورتی که در خاک‌های رسی چون تغییر حجم خیلی کم است و لایه‌های خاک به علت چسبندگی تحت تأثیر پیوستگی هستند، از این رو با اندازه گیری نشست در سطح زمین می‌توان به وجود تغییر شکل دهانه تونل پی برد [۱]. طی سال‌های اخیر توصیه‌های Peck (1969) در گزارش وی به کنفرانس مکانیک خاک و پی‌سازی در مکزیکوسیتی، اساس محاسبات تونل‌ها در زمین‌های نرم بوده است. نتایج Peck مبتنی بر تجزیه و تحلیل مشاهدات عملی بر تونل‌های ساخته شده بوده است. با این وجود در این مدت توصیه‌های وی با مشاهدات رفتار تونل‌های متعدد اجرا شده تصحیح و تکمیل گشته‌اند [۲].

نشست ماکزیمم در تونل‌سازی در خط مرکزی تونل و در سطح زمین رخ می‌دهد. برای محاسبه مقدار نشست ماکزیمم روابط مختلفی توسط افراد گوناگون ارائه شده است می‌توان به (Bobet (2001), Herzgo (1985), Shahriyar (2005), Sagaseta & Gonzalez (2001), Booker & Verruijt (1996), Hajjar et al (2014) و Mroueh & Shahrouh (2006) اشاره نمود [۹]-[۳]. روشی تحلیلی برای آنالیز تغییر مکان‌های خاک اطراف یک حفره در یک نیم فضا که بر پایه تئوری‌های الاستیسیته استوار است توسط Sagaseta (1987) ارائه شده است. Booker & Verruijt (1996) یک تحلیل الاستیک خطی برای تونلی در یک محیط نیم فضای همگن ارائه نمودند. آنها از تئوری الاستیسیته و روش تقریبی‌ای که Sagaseta پیشنهاد کرده بود، استفاده نمودند ولی از دقت لازم برخوردار نبودند.

روش تحلیلی Bobet (2001) برای بررسی نشست و تغییر شکل‌های زمین در اثر حفر تونل‌های سطحی در محیط‌های خشک، محیط‌های اشباع و همچنین محیط‌های اشباع همراه با فشار هوا ارائه شده است. این روش در مناطقی که نسبت عمق به شعاع بیش از ۱/۵ است، اعتبار دارد (شکل ۱) $(h/r_0 > 1.5)$. توجه ویژه‌ی این روش، بررسی و تعیین نشست حاصل از حفر تونل در کوتاه مدت (با فرض عدم اتلاف زیاد فشار منفذی) می‌باشد [۳]. معادلات Bobet برای زمین‌های خشک به شرح ذیل تعریف می‌شوند:



شکل ۱: تونل با سرباره H [۳]

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \{ -a_0/r + [c'_1 r^2 + c_1 (1-\nu) \ln r + d'_1 (1-2\nu) \ln r] \sin \theta + [2a'_2 r^3 + 4(1-\nu) b'_2 r^{-1}] \cos 2\theta + [3c'_3 r^4 + (5-4\nu) d'_3 r^2] \sin 3\theta \} \quad (1)$$

$$u_\theta = \frac{1+\nu}{E} \{ -[c'_1 r^2 - c_1 ((1-\nu) \ln r + \nu) - d'_1 (1-2\nu) (\ln r - 1)] \cos \theta - 0.5 [-4a'_2 r^3 + 4(1-2\nu) b'_2 r^{-1}] \sin 2\theta + [3c'_3 r^4 + (1-4\nu) d'_3 r^2] \cos 3\theta \} \quad (2)$$

$$U_y = u_r \sin \theta_0 + u_\theta \cos \theta_0 \quad (3)$$

ضرایب معادلات ۱ و ۲ در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱: ضرایب در معادله Bobet (2001)

$C = \frac{E r_0 (1-v_s^2)}{E_s A_s (1-v^2)}$	$F = \frac{E r_0^3 (1-v_s^2)}{E_s I_s (1-v^2)}$
$\frac{2}{0} r_0^{r/w} \frac{F+C}{FC} \frac{E_2+FC}{E_2-1} \frac{h}{(k+1)} \frac{\gamma}{(F+C)} 5.0 = a$	$c_1 = -\gamma r_0^2$
$c'_1 = \frac{1}{8} \left(k - \frac{v}{1-v} \right) \gamma r_0^4$	$d'_1 = \frac{1}{4} \frac{1-2v}{1-v} \gamma r_0^2$
$a'_2 = -\frac{1}{4} \frac{(F+6)(1-v)}{(1-v)F+3(5-6v)} \gamma h (1-k) r_0^4$	$b'_2 = \frac{1}{4} \frac{2(1-v)F+3}{(1-v)F+3(5-6v)} \gamma h (1-k) r_0^2$
$c'_3 = \frac{1}{12} \frac{(1-v)F+4(5-4v)}{(1-v)F+8(7-8v)} \gamma (1-k) r_0^4$	$d'_3 = -\frac{1}{8} \frac{(1-v)F+8}{(1-v)F+8(7-8v)} \gamma (1-k) r_0^4$

پارامتر فضای خالی در معادله Bobet (2001) از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$w = \frac{\text{ground loss (\%)}}{100} \frac{\pi r_0^2}{2\pi r_0} = \frac{V_1 (\%)}{200} r_0 \quad (4)$$

در روابط فوق، پارامترها بصورت زیر تعریف می‌شوند:

A_s, I_s = area and moment of inertia of cross section of liner

E, v = Young's modulus and Poisson's ratio of ground

E_s, v_s = Young's modulus and Poisson's ratio of liner

h = depth of center of tunnel below ground surface

k = coefficient of earth pressure at rest

γ = total unit weight of ground

w = gap between ground and liner

U_r, U_θ = displacements of ground in polar coordinates

r_0 = radius of tunnel

همچنین نعمتی حیاتی^۱ و همکاران (2012) معادله و نمودارهایی را به منظور بدست آوردن حجم از دست رفته در روابط Bobet (2001) در

تونل‌های NATM ارائه کردند:

$$V_1 = a_2 N_2^2 + a_1 N_2 + a_0 \quad (5)$$

که در این رابطه a_2 مقداری منفی می‌باشد و از طرفی تمام ضرایب این معادله از گراف‌های ارائه شده توسط ایشان بدست می‌آید به اعداد بدون

بعد N_1 و N_3 وابسته است:

$$N_1 = (\gamma r_0 / c) (1 - \sin \varphi) / \cos \varphi \quad (6)$$

$$N_2 = H / D \quad (7)$$

$$N_3 = L_{\text{unsupported}} / D \quad (8)$$

^۱Nemati Hayati 2012

در این روابط، r_0 شعاع تونل، γ وزن مخصوص کل خاک، H ارتفاع سرباره تونل، $L_{unsupported}$ گام حفاری، D قطر تونل و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک است [۱۰].

۱- مدل سازی عددی

برای مدل سازی طولی تونل ابعاد بهینه به گونه ای انتخاب می شوند که توزیع تنش های القائی ناشی از حفر تونل در مرزهای مدل با تنش اولیه قبل از حفر برابر شوند. شرط دیگر این است که نشست در مرزهای مدل قابل صرف نظر کردن باشد. این موارد در مدل سازی تونل در هر دو راستای طولی و عرضی حائز اهمیت می باشند.

برای تعیین ابعاد مناسب برای مدل در راستای عرضی، پس از انجام آزمون هایی به صورت سعی و خطا با در نظر گرفتن موارد بالا، پهنای مناسب مدل در راستای عرضی، سه برابر شعاع تونل تعیین شد.

برای مدل سازی طولی طبق تحقیق صورت گرفته توسط Franzius (2005) باید خاکی که پشت تونل در آخرین مرحله حفاری در مدل سازی باقی می ماند حداقل به اندازه طول حفاری شده باشد [۱۱].

۱-۱- هندسه مدل

قطر تونل دایره ای $D=9\text{ m}$ در نظر گرفته شده است و در همه حالات ثابت می باشد، عمق سرباره متغیر بوده و از $4/5$ تا 27 متر می باشد ($4/5$ ، 9 ، $13/5$ ، 18 و 27).

۱-۲- مشخصات و رفتار مصالح

بعد از ایجاد مدل هندسی، باید خاک موجود در محیط تعیین شود. در اینجا خاک منطقه حفاری تونل به صورت خشک در نظر گرفته شده و از وجود آب زیر زمینی صرف نظر شده است. برای خاک مورد نظر چهار مقدار مختلف چسبندگی در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل رفتاری Hardening Soil مشخصات رفتاری خاک در جدول ۲ و مشخصات پوشش بتنی هم در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی و فیزیکی خاک بر اساس پارامترهای اخذ شده از مطالعه موردی نعمتی حیاتی و همکاران [۱۰]

پارامتر	مقدار
وزن مخصوص	$\gamma = 20$ KN/m^3
سختی سکانت	$E_{50}^{ref} = 10.5$ KN/m^2
سختی مماسی	$E_{oed}^{ref} = 10.5$ KN/m^2
سختی باربرداری - بارگذاری مجدد	$E_{ur}^{ref} = 2/5 * 10.5$ KN/m^2
چسبندگی	$10, 20, 30, 40$ KN/m^2
زاویه اصطکاک داخلی	$\varphi = 30$
زاویه اتساع	$\psi = 5$
نسبت پواسون برای باربرداری - بارگذاری مجدد	$\nu_{ur} = 0/2$
تنش مرجع برای سختی	$p^{ref} = 100$
مقدار k_0 برای تحکیم عادی	$k_0 = 0/5$
نسبت گسیختگی	$R_f = 0/5$

جدول ۳: مشخصات پوشش بتنی

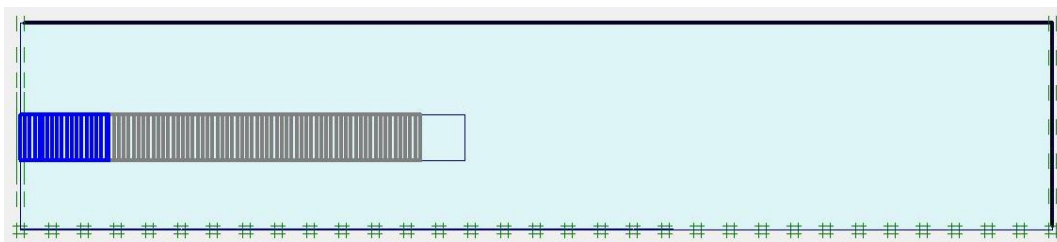
پارامتر	مقدار	نوع مواد
صلبیت محوری	$EA = 10^7$	الاستیک ^۲
صلبیت خمشی	$EI = 10^5 * 10^2$	
ضخامت	$d = 0.35$	m
وزن	$W = 8/4$	$KN/m/m$
نسبت پواسون	$\nu = 0.2$	

۳-۱- سازه تونل با $\sum Mstage < 1$

با Plaxis این امکان وجود دارد که برای شبیه سازی روش ساخت، تونل با پوشش بتن پاشیده (شاتکریت) ایجاد نمود (NATM). روش های مختلفی در متون فنی برای آنالیز سازه های تونل مطابق با روش تونل سازی اتریشی جدید (NATM) تعریف شده است. یکی از این ها روش β نامیده می شود. بجای وارد کردن مقدار β در Plaxis می توان از گزینه ساخت مرحله ای با سطح نهایی کاهش یافته $\sum Mstage$ استفاده نمود [۱۲].

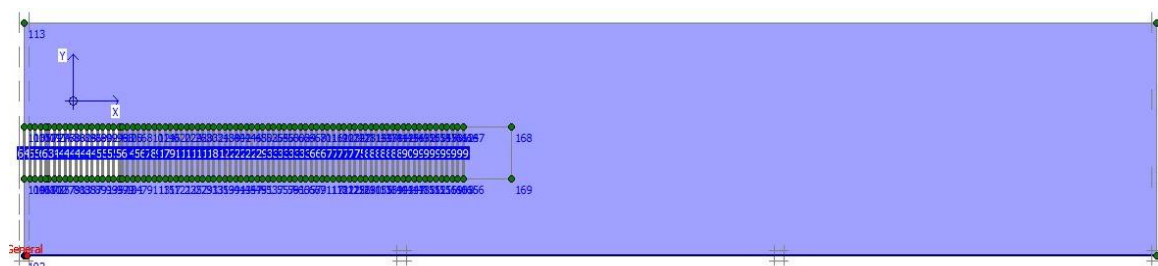
۴-۱- مراحل حفاری

با توجه به اینکه قطر حفاری دستگاه TBM^۲ ۹ متر می باشد و همچنین ۹ متر نزدیک به سینه کار در هنگام حفاری بدون پوشش بتنی می باشد، لذا گام های حفاری در مدل سازی تونل ۹ متر در نظر گرفته شده است. برای از بین بردن تاثیر ورودی تونل ابتدا لاینینگ و سپس حفاری انجام می شود تا از جابجائی ها و تاثیرات پرتال مدل جلوگیری شود، طول پرتال هم برابر با عمق روباره در نظر گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲: ایجاد پوشش بتنی در ورودی تونل بدون خاکبرداری برای از بین بردن اثر پرتال

نصب پوشش بتنی یکی از اجزای اصلی در پیشروی تونل است. طول مدل تونل های مورد بررسی برای از بین بردن اثر پرتال تقریباً ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در این مدل سازی بعد از پرتال، ۹ متر حفاری صورت گرفته و در فاز بعدی، ابتدا فاز قبلی بوسیله پوشش بتنی نگهداری شده و در همین فاز ۹ متر دیگر پیشروی انجام خواهد شد. این کار تا جایی ادامه می یابد تا حالت پایدار ایجاد شود (شکل ۳).



شکل ۳: خاکبرداری و ایجاد ورودی تونل

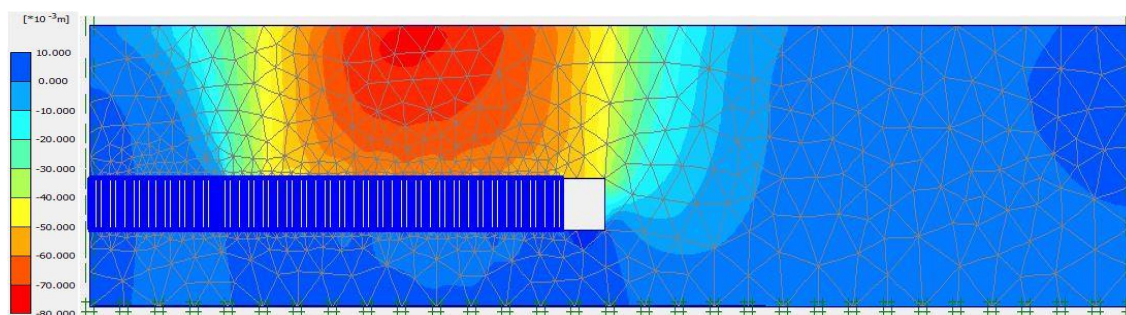
²Tunnel Boring Machine

³Stable

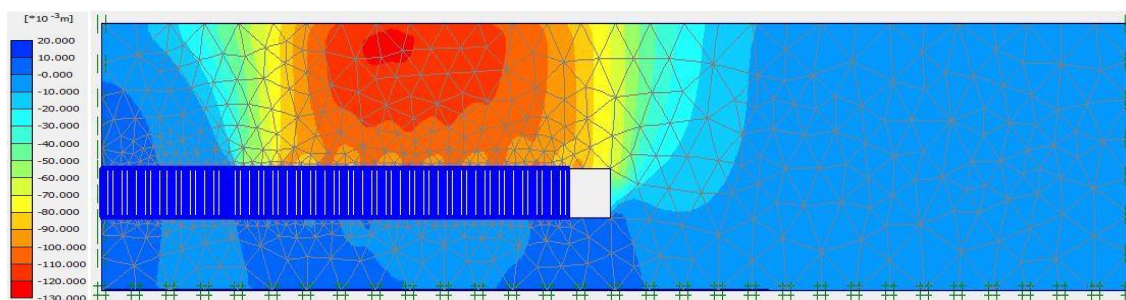
در این پروژه سعی شده است ابتدا مدل‌هایی بصورت حفاری مرحله‌ای (NATM) با استفاده از چسبندگی، روباره و همچنین $\sum Mstage$ های مختلف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ ... ۰/۹) ایجاد و سپس نشست‌های حاصل با نشست‌های بدست آمده از رابطه Bobet مقایسه شده که پس از ترسیم گراف‌های بسیاری، $\sum Mstage$ های بهینه و همچنین معادله‌ای جهت بدست آوردن $\sum Mstage$ های بهینه بدست می‌آید که با نام $\sum Mstage$ Correlation شناخته می‌شود.

۶-۱- نتایج

تمام مدل‌هایی که بوسیله نرم افزار Plaxis و با استفاده از چسبندگی‌های مختلف، سرباره‌های متفاوت و همچنین $\sum Mstage$ های مختلف مدل‌سازی شده و نشست قائم آنها محاسبه شده است در جدول ۴، ۵ و ۶ آمده است. در خانه‌هایی که عددی وجود ندارد به دلیل ناپایداری مدل در آن حالت خاص می‌باشد. در شکل ۴ نمونه‌ای از مدل‌سازی در حالت $H/D = 3$ آمده است.



(i)



(ii)

شکل ۴: نشست پیشینه برای $H/D=3$ و $C=20$ kPa، $\sum Mstage=0.7$ (i) و $\sum Mstage=0.8$ (ii)

جدول ۴: ماکزیمم نشست‌های قائم حاصل از مدل‌سازی طولی

Maximum Vertical Displacement [mm]	$\sum Mstage$											
	10.0				20.0				30.0			
H/D	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40
5.0	90.1	77.1	63.1	51.1	4.34	3.99	3.72	3.41		7.16	6.40	5.95
1	2.64	2.45	2.35	2.28	5.73	5.41	5.09	4.94	9.88	9.16	8.65	8.38
5.1	3.58	3.42	3.18	3.14	7.85	7.47	7.30	7.09	13.12	12.47	12.04	11.83
2	4.16	3.97	3.85	3.78	9.78	9.50	9.23	8.27	16.30	15.77	14.55	14.27
3	5.19	5.13	5.11	5.09	11.35	11.44	11.25	11.18	19.82	19.46	19.19	18.93

⁴New Austrian Tunnelling Method

⁶Collapse

ادامه جدول ۴: ماکزیمم نشست های قائم حاصل از مدل سازی طولی

Maximum Vertical Displacement [mm]	Mstage											
	0.40				0.50				0/60			
H/D	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40
0.5			10/53	9.41								
1	15.19	13.92	13.18	12.53	22.88	20.17	18.70	17.65		29.50	26.14	24.30
1.5	19/67	18.71	18.00	17.49	27.83	26.32	25.28	24.48	39.56	36.44	34.85	33.04
2	24.84	23.70	21.80	21/20	32.79	33.81	30.65	29.55	51.75	47.33	41.99	40.07
3	29/47	28.82	28/29	27.78	41.45	40.32	39.27	38.52	57.40	55.17	53.32	53.32

ادامه جدول ۴: ماکزیمم نشست های قائم حاصل از مدل سازی طولی

Maximum Vertical Displacement [mm]	Mstage											
	0.70				0.80				0.90			
H/D	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40	C=10	C=20	C=30	C=40
0.5												
1			37.81	33.62				49.37				
1.5	53.39	53.39	48.42	45.21			69.68	62.77				
2	83.48	67.02	57.52	53.78			83.52	73.40				119.37
3	80.39	75.11	71.49	68.55		120.64	100.00	92.15				143.55

با استفاده از رابطه تحلیلی ارائه شده توسط نعمتی‌حیاتی و همکاران [۲۰۱۲] حجم از دست رفته، بدست آمده و با استفاده از رابطه Bobet (2001) نشست بیشینه محاسبه خواهد شد. بنابراین با توجه به مشخصات جدول ۴ باید ۲۰ نشست محاسبه شود که در همه حالت‌های مورد بررسی $N_3 = \frac{L}{D} = 1$ می‌باشد. چون گام پیشروی و قطر تونل با هم برابر می‌باشند، ماکزیمم نشست‌های بدست آمده از این روابط تحلیلی در جدول ۵ آمده است.

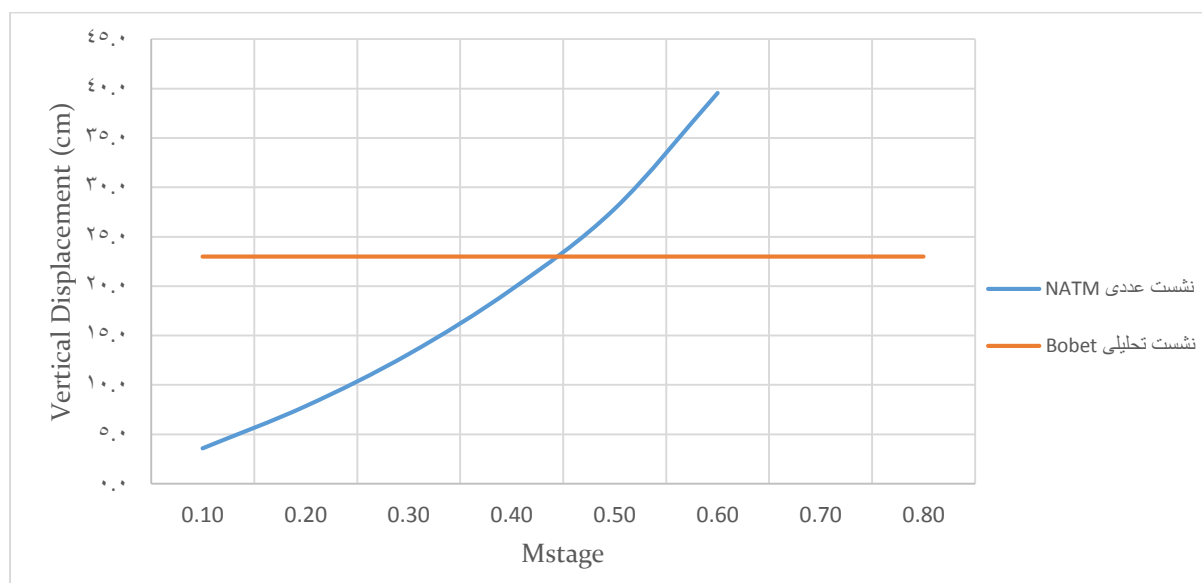
جدول ۵: ماکزیمم نشست های بدست آمده از رابطه تحلیلی نعمتی و همکاران

Maximum Vertical Displacement [mm]	$N_1 = (\gamma r / c)(1 - \sin \phi) / \cos \phi$			
	$N_1 = 5.196$	$N_1 = 2.598$	$N_1 = 1.732$	$N_1 = 1.299$
$N_2 = H/D$	C=10 kPa	C=20 kPa	C=30 kPa	C=40 kPa
0.5	7677.21	14.492	12.0654	10.8506
1	22.8971	16.4467	14.2973	13.2179
1.5	23.0057	17.2575	15.3463	14.384
2	22.1261	16.9318	15.2015	14.3371
3	17.272	12.8306	11/3501	10.6117

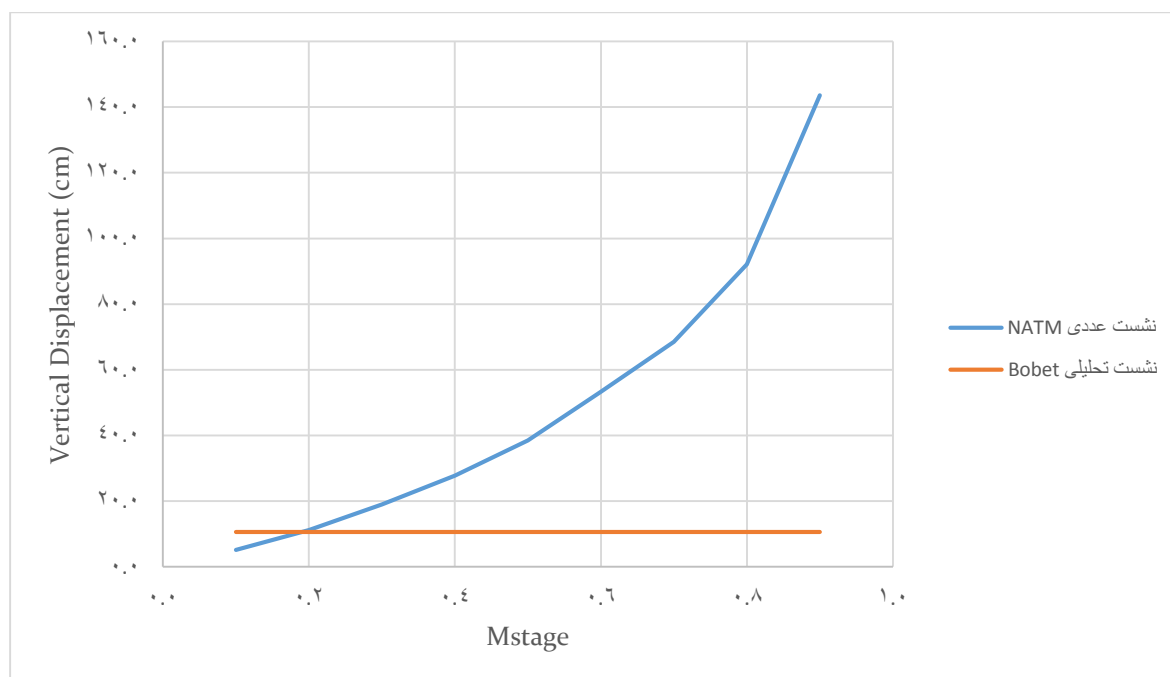
برای بدست آوردن Mstage بهینه در هر چسبندگی و هر H/D ، نمودارهایی بر حسب Mstage و Maximum Vertical Displacement ترسیم شده و نشست‌های جدول ۵ با آن نمودارها تقاطع زده شده تا بهترین Mstage برای مدل‌سازی حاصل شود (جدول ۶ و شکل‌های ۵ و ۶).

جدول ۶: Mstage های بهینه

Mstage	N ₁			
	5.196	2.598	1.732	1.299
N ₂ = H/D	C=10 kPa	C=20 kPa	C=30 kPa	C=40 kPa
0.5			0.4395	0.4263
1	0.5	0.44032	0.42	0.413
1.5	0.4408	0.376	0.355	0.345
2	0.3238	0.3146	0.3089	0.3
3	0.2699	0.217	0.2012	0.19



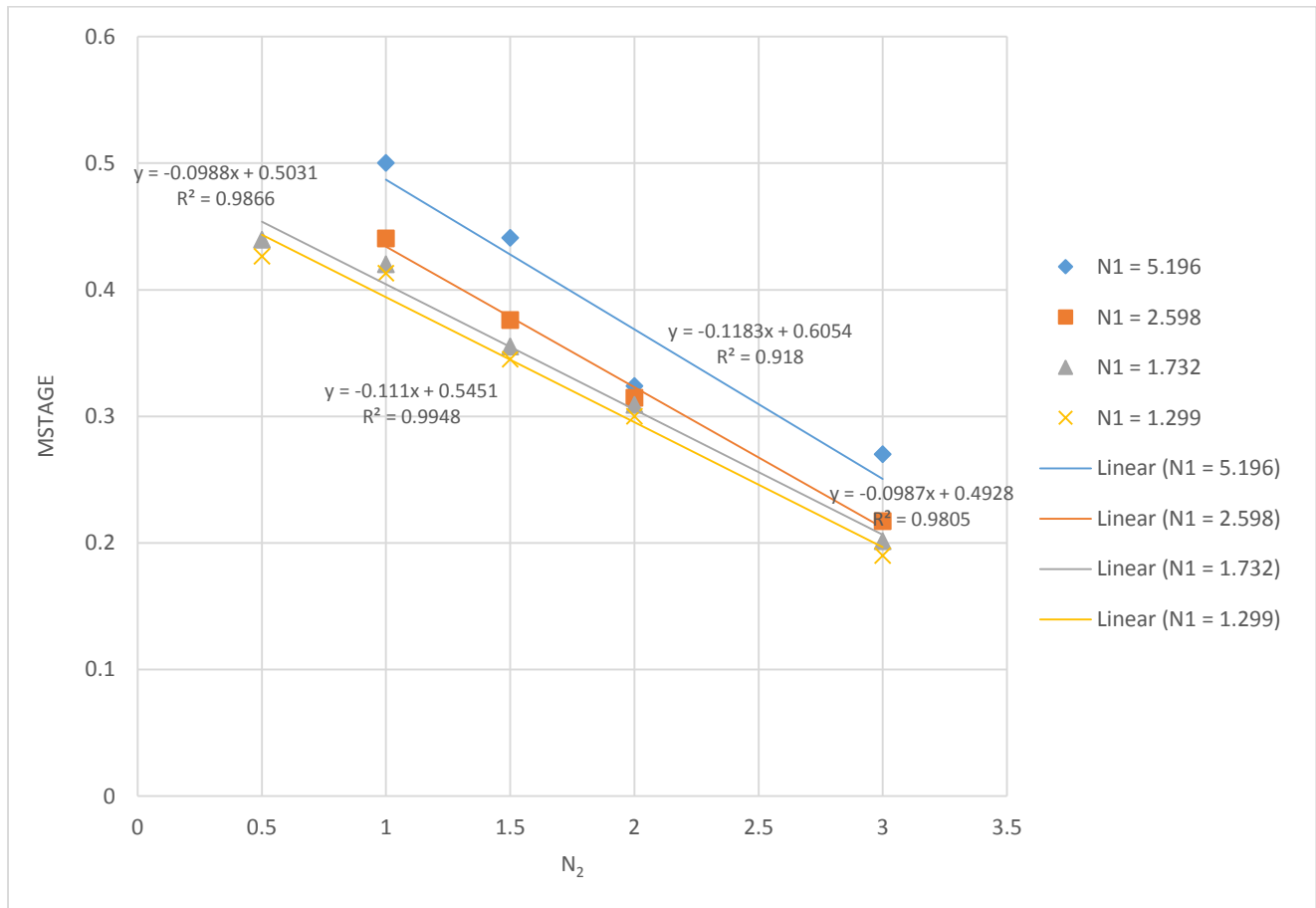
شکل ۵: نمودار با مشخصات $H/D=1/5$ و $C=10$



شکل ۶: نمودار با مشخصات $H/D=3$ و $C=40$

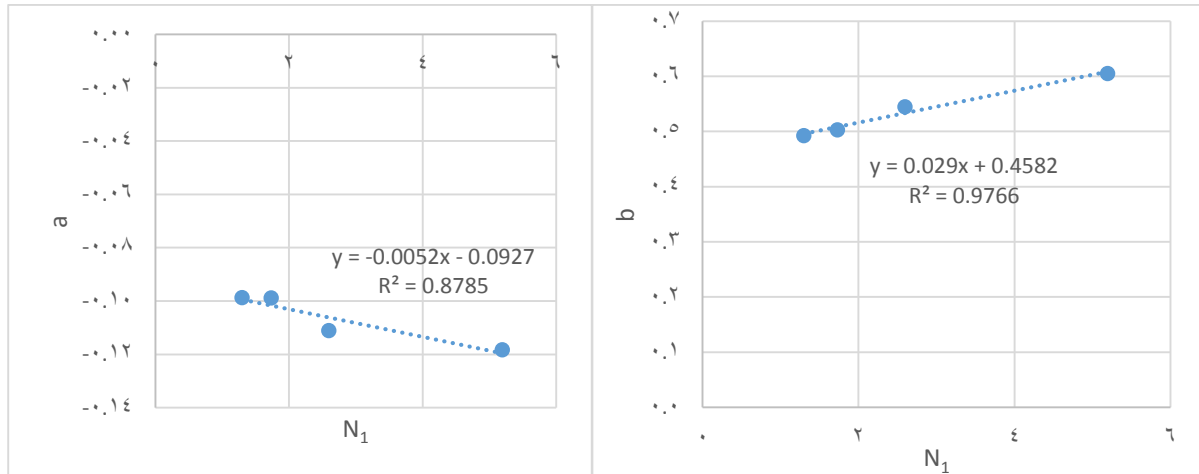
به دلیل کم بودن سرباره و چسبندگی در $H/D=0.5$ ، نشست حاصل از رابطه تحلیلی و مدل سازی عددی با یکدیگر تقاطع نداشتند و بهینه برای ۱۰ و ۲۰ C حاصل نشد.

برای بدست آوردن رابطه کلی از $Mstage$ ها، نمودارهایی با استفاده از جدول ۸ ترسیم شده بدین شکل که محور افقی N_2 و محور قائم را $Mstage$ تشکیل می دهد. چهار نمودار حاصل به همراه برازش خطی هر نمودار در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷: نمودارهای ترسیم شده به همراه معادله برازش

با استفاده از نمودار شکل ۷ می توان دریافت که رابطه خطی $Mstage = aN_2 + b$ بین $Mstage$ و N_2 برقرار است که ضرایب آن باید تعیین شود. برای بدست آوردن a و b ، دو نمودار ترسیم شده که محور قائم نمودارها، a و b ، مندرج در معادلات شکل ۷ می باشد و محور افقی N_1 است.



شکل ۹: نمودار مربوط به b به همراه معادله برازش

شکل ۸: نمودار مربوط به a به همراه معادله برازش

با توجه به نمودارهای ۸ و ۹ می‌توان نوشت:

$$a = -0.0052N_1 - 0.0927 \quad b = 0.029N_1 + 0.4582 \quad (9)$$

با جاگذاری معادلات بدست آمده a و b در معادله $M_{stage} = aN_2 + b$ ، معادله زیر حاصل خواهد شد:

$$M_{stage} = -0.0052N_1N_2 - 0.0927N_2 + 0.029N_1 + 0.4582 \quad (10)$$

معادله حاصل به N_1 و N_2 وابسته می‌باشد و از طرفی همانطور که قبلاً بیان شد با توجه به برابر بودن L و D ، $N_3 = L/D$ برابر یک بوده و برخلاف تونل NATM در رابطه وارد نمی‌شود. برای راستی آزمایی این نتایج، رگرسیون خطی حاصل از تمام نمودارها تهیه شده که دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد (عدد رگرسیون بالای ۰/۹۰).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از ترکیب تحلیل عددی (Plaxis 2D) و همچنین رابطه تحلیلی ارائه شده توسط نعمتی‌حیاتی و همکاران (۲۰۱۲) که مربوط به تونل‌های NATM می‌باشد، رابطه تحلیلی برای بدست آوردن Mstage در نرم افزار Plaxis برای مدل‌سازی تونل‌های حفاری شده توسط دستگاه TBM ارائه شده است. استفاده از این رابطه برای رسیدن به نشست با بالاترین دقت مورد استفاده قرار می‌گیرد

منابع و مراجع

- [1] Terzaghi, K. 1942. Shield tunnels of the Chicago Subway. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 29(3):163–210
- [2] Peck RB. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State-of-the-art report. 7th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969; 225–290
- [3] Bobet A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. Journal of Engineering Mechanics-ASCE 2001; 127(12):1258–1266.
- [4] Herzog M., "Surface subsidence above shallow tunnels", Bautechnik, Vol. 64, No. 11(1985) 375-377 (in German).
- [۵] شهريار ك. و راست بود ب.، ۲۰۰۵، " کاربرد روش‌های عددی در پیش‌بینی نشست سطحی ناشی از تونلسازی"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران ۱۳۸۴.
- [6] González, C., and Sagaseta, C., 2001. "Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro". Computers and geotechnics Vol 28, pp 445-468.
- [7] Verruijt, A. and Booker, J. R., "Surface settlement due to deformation of a tunnel in a elastic half plane", Geotechnique, Vol. 46, No. 4, pp. 753-756, 1996.
- [8] Hajjar M, Nemati Hayati A, Ahmadi M M, and Sadrnejad A S (2014). "Longitudinal Settlement Profile in Shallow Tunnels in Drained Conditions." DOI:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000447. © 2014 American Society of Civil Engineers
- [9] M roueh H, Shahrou I. A simp lified 3D mod el for tunnel construction using tunnel boring machines. Tunnell Underground Sp ace Technol, in p ress, doi: 10.1016/j.tust.2006.11.008
- [10] Nemati Hayati, A., Ahmadi, M. M., Hajjar, M., and Kashighandi, A. (2013). "Unsupported advance length in tunnels constructed using New Austrian Tunnelling Method and ground surface settlement." Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 37(14), 2170–2185.
- [11] Franzius JN, Potts DM. Influence of mesh geometry on three-dimensional finite-element analysis of tunnel excavation. International Journal of Geomechanics 2005; 5(3):256–266.
- [12] Plaxis2D User's Manuals, Version 8.6, 2009.