



## مقایسه ضریب تحکیم حاصل از آزمایش CPTu و آزمایش تحکیم یک بعدی

اکبر چشمی<sup>۱\*</sup>، زهرا عزالدین<sup>۲</sup>، کاظم مرادی هرسینی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۳/۰۶/۰۱ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۶/۰۱

### چکیده

ضریب تحکیم یکی از پارامترهای مهمی است که در طراحی‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. این ضریب معمولاً از آزمایش تحکیم یک بعدی آزمایشگاهی بدست می‌آید. آزمایش نفوذ مخروط آزمایشی برجاست که در آن امکان اندازه‌گیری تغییرات فشار آب منفذی با زمان و تعیین ضریب تحکیم وجود دارد. این آزمایش قبلاً بعنوان آزمایش محو فشار آب منفذی (Dissipation) معرفی شده است. ته (Teh, 1987)، هولسی و ته (Houlsby & Teh, 1988)، ته و هولسی (Teh & Houlsby, 1991) و جونز و راست (Jones & Rust, 1995) روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب تحکیم از نتایج آزمایش نفوذ مخروط پیشنهاد نموده‌اند. در این مقاله با استفاده از ۴۳ آزمایش محو فشار منفذی و ۳۵ آزمایش تحکیم آزمایشگاهی در سه ناحیه در جنوب ایران، ضمن مقایسه ضریب بدست آمده از ۴ روش فوق، ضریب بدست آمده از این روش‌ها با ضریب حاصل از آزمایش آزمایشگاهی تحکیم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب بدست آمده از آزمایش آزمایشگاهی از مقادیر بدست آمده از روش ته و هولسی بیشتر و از سایر روش‌ها کمتر است. نتایج آزمایشگاهی از نظر مقدار و روند به نتایج بدست آمده از روش ته و هولسی نزدیکتر هستند. رابطه تجربی بین ضریب تحکیم آزمایشگاهی و برجا با ضریب تعیین بیشتر از ۰.۷ پیشنهاد شده است. بیشترین ضریب تعیین مربوط به روش هولسی و ته و کمترین مربوط به روش جونز و راست است. زمانی که یک رابطه تجربی برای همه سایت‌های مطالعه شده پیشنهاد گردیده ضریب تعیین نسبت به زمانیکه روابط تجربی برای هر سایت بصورت مستقل تعیین گردیده، کاهش یافته است بنابراین روابط می‌توان گفت روابط تجربی متاثر از ویژگی‌های هر منطقه می‌باشند.

**کلید واژه‌ها:** آزمایش نفوذ مخروط، آزمایش محو فشار منفذی، ضریب تحکیم

۱. استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران a.cheshomi@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

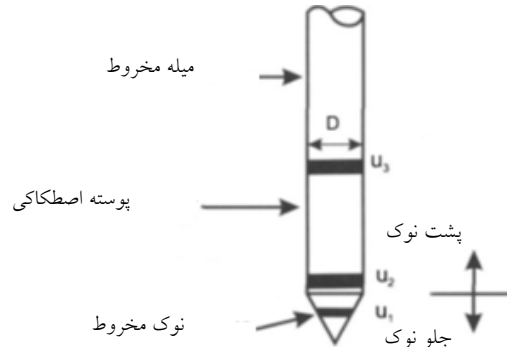
۳. دکتری زمین‌شناسی مهندسی، مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

عنوان محو فشار آب منفذی (Dissipation Test) شناخته می‌شود و از نتایج آن می‌توان برای تخمین ضریب تحکیم افقی برجای خاک استفاده نمود (Torstensson, 1997). در آزمایش محو فشار منفذی، پس از رسیدن مخروط به عمق مورد نظر، نفوذ مخروط متوقف شده و تغییرات فشار آب منفذی با زمان ثبت می‌گردد. منحنی تغییرات فشار منفذی در مقابل زمان به عنوان منحنی محو فشار آب منفذی معرفی شده که به عواملی از قبیل موقعیت فیلتر فشار منفذی  $(u_1, u_2, u_3)$ ، تاریخچه تنش، شرایط زهکشی و نفوذپذیری خاک وابسته است (Baligh and Levadoux, 1980, 1986). در شکل ۱ موقعیت فیلتر اندازه‌گیری فشار آب منفذی در روی مخروط نشان داده شده است. فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های  $u_1, u_2, u_3$  متفاوت بوده، بدین جهت موقعیت  $u_2$  بعنوان موقعیت استاندارد برای اندازه‌گیری فشار آب منفذی در نظر گرفته می‌شود. (Lunne et al. 1997; Burns and Mayne 1998).

خصوصیات مقاومتی و تحکیمی خاک‌های چسبنده را می‌توان بوسیله آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی تعیین نمود. آزمایش‌های آزمایشگاهی از قبیل آزمایش تحکیم، معمولاً بر روی نمونه‌های کوچک که در فرایند نمونه‌گیری و آماده‌سازی دچار دستخوردگی شده‌اند، انجام می‌شود. آزمایش نفوذ مخروط (Cone Penetration Test) همراه با اندازه‌گیری فشار منفذی که به اختصار CPTu نامیده می‌شود، به دلیل سرعت و دقت بالا و ارائه پروفیل پیوسته‌ای از شرایط زیرسطحی، به روشی متداول برای تعیین پارامترهای مهندسی مصالح منجمله پارامترهای تحکیم بصورت برجا تبدیل شده است. در آزمایش CPTu، مخروطی به داخل خاک فرو برده شده و سه پارامتر اصلی مقاومت نوک  $(q_c)$ ، اصطکاک جداره  $(f_s)$  و فشار منفذی  $(u_2)$  اندازه‌گیری می‌گردد. نفوذ مخروط می‌تواند در هر عمقی متوقف گردد و تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده نسبت به زمان ثبت شود. تغییر فشار منفذی نسبت به زمان به



شکل ۱. محل اندازه‌گیری فشار آب منفذی (after Sully et al. 1999)

منفذی میباشد، مقدار  $u_{50}$  و با استفاده از آن  $t_{50}$  بدست می‌آید. تغییر در فشار منفذی اضافی  $(\Delta u)$  و فشار منفذی اضافی نرمال شده  $(U)$  از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید (Sully et al., 1999):

$$(1)$$

$$\Delta u = u_i - u_0$$

$$(2)$$

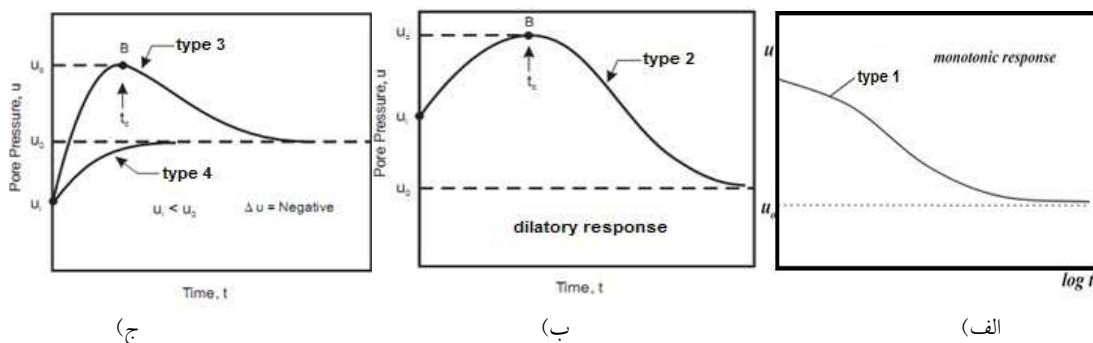
$$U = \frac{\Delta u_t}{\Delta u_i} = \frac{(u_t - u_0)}{(u_i - u_0)}$$

که در آن:  $u_i$  فشار منفذی اندازه‌گیری شده در عمق مورد نظر،

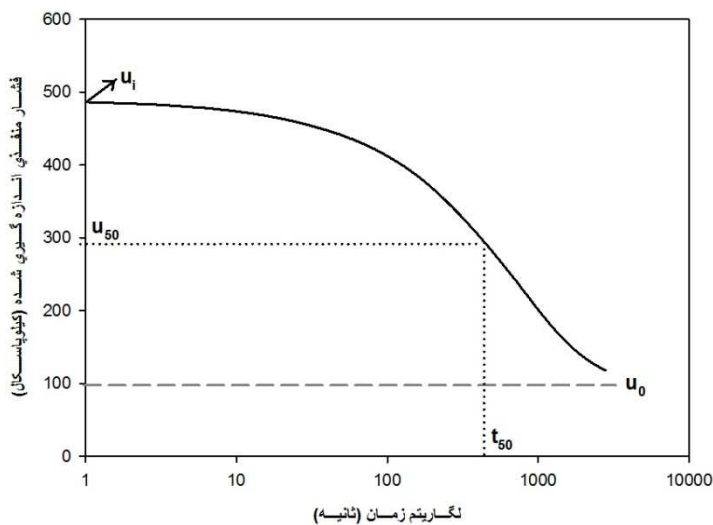
در شکل ۲ انواع مختلف منحنی‌های محو فشار آب منفذی نشان داده شده است (Sully et al., 1999). در جدول ۱ ویژگی‌های این منحنی‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۳ یک نمونه از منحنی‌های استاندارد ثبت شده در تحقیق حاضر، نشان داده شده و روش تعیین  $t_{50}$  از این منحنی ارائه شده است. به این منظور، ابتدا فشار منفذی اولیه  $(u_i)$  از منحنی محو فشار منفذی بدست آمده، سپس با تعیین مقدار شار منفذی برجا  $(u_0)$ ، که بیانگر ۱۰۰ درصد محو شدن فشار

منفذی اضافی اولیه در زمان توقف نفوذ یعنی  $t=0$  و  $u_t$  فشار  
منفذی اندازه‌گیری شده در زمان  $t$  می‌باشد.

$u_0$  فشار منفذی هیدروستاتیک برجا در عمق موردنظر،  $\Delta u_t$   
فشار منفذی اضافی در زمان  $t$  پس از توقف نفوذ،  $\Delta u_i$  فشار



شکل ۲. انواع منحنی‌های محو فشار منفذی، الف) استاندارد، ب و ج) غیر استاندارد (Sully et al. 1999)



شکل ۳. نحوه بدست آوردن  $t_{50}$  از منحنی‌های استاندارد محو فشار منفذی. این منحنی متعلق به آزمایش محو فشار منفذی در عمق ۱۴.۰۱ متری آزمایش C9 در ناحیه ۱ می‌باشد.

جدول ۱. انواع منحنی‌های محو فشار منفذی در موقعیت فیلتر  $u_2$

نوع منحنی	فشار منفذی اندازه‌گیری شده در هنگام توقف نفوذ	تغییرات فشار منفذی اندازه‌گیری شده پس از توقف نفوذ	نوع خاک
پاسخ استاندارد یا یکنواخت (Standard or Monotonic response)	$u_t > u_0$	کاهش تا رسیدن به $u_0$	کمی بیش تحکیم‌یافته
پاسخ غیر استاندارد یا تاخیری (Non-standard or Dilatory response)	$u_t > u_0$	ابتدا افزایش و سپس کاهش تا رسیدن به $u_0$	متوسط تا بسیار بیش تحکیم‌یافته
	$u_t < u_0$	در ابتدا $u_t$ تا مقادیری بالاتر از $u_0$ افزایش، و سپس تا رسیدن به $u_0$ کاهش می‌یابد.	متوسط تا بسیار بیش تحکیم‌یافته
	$u_t < u_0$	افزایش تا رسیدن به مقدار $u_0$	متوسط تا بسیار بیش تحکیم‌یافته

تفسیر منحنی‌های غیراستاندارد به کار گرفته شود، به همین دلیل روش‌هایی برای تصحیح این منحنی‌ها پیشنهاد شده است (Sully et al., 1999, Burns and Mayne, 1998, Chai et al., )

اکثر روش‌های موجود برای تخمین ضریب تحکیم از آزمایش محو فشار منفذی بر مبنای فرض کاهش یکنواخت فشار منفذی نسبت به زمان است، لذا نمی‌تواند بطور مستقیم برای

شاخص سختی ( $Rigidity\ index, I_r$ ) که در برخی روش‌های ذکر شده در جدول ۲ استفاده شده، از رابطه ۳ بدست می‌آید:

(۳)

$$I_r = \frac{G}{s_{11}}$$

که در آن:  $G$  مدول برشی و  $s_{11}$  مقاومت برشی زهکشی نشده است.

محققین مختلف روش‌های گوناگونی را برای تعیین ضریب تحکیم افقی خاک ( $C_h$ ) از نتایج آزمایش محو فشار منفذی پیشنهاد کرده‌اند که بطور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تحکیم در آزمایش  $CPTu$  عمدتاً در راستای افقی است و بنابراین مقدار بدست آمده توسط اکثر روش‌های مبتنی بر نتایج  $CPTu$  بیانگر ضریب تحکیم افقی خاک ( $C_h$ ) هستند، در صورتی که ضریب تحکیم به دست آمده در آزمایشگاه ضریب تحکیم عمودی خاک ( $C_v$ ) می‌باشد. برای تبدیل ضریب تحکیم افقی به قائم می‌توان از رابطه ۴ استفاده کرد (Levadoux and Baligh, 1986):

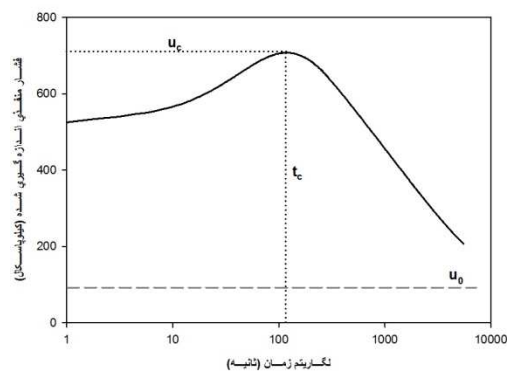
(۴)

$$C_v = C_h \frac{k_v}{k_{hv}}$$

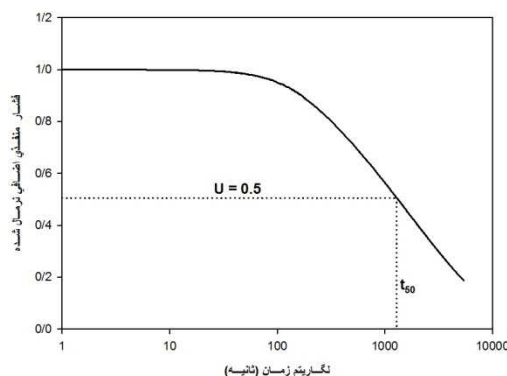
$k_h$  و  $k_v$  به ترتیب ضریب نفوذپذیری در راستای قائم و افقی می‌باشند.

در این مقاله ضریب تحکیم بدست آمده از روش‌های مبتنی بر آزمایش  $CPTu$ ، که در جدول ۲ ارائه شده، با نتایج حاصل از آزمایش تحکیم آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مشابه، در سه ناحیه در جنوب ایران، مقایسه گردیده است. همچنین تحلیل‌های رگرسیونی برای بدست آوردن بهترین رابطه بین مقادیر برجا و آزمایشگاهی پیشنهاد شده است.

در این مطالعه از روش لگاریتم زمان که توسط سولی و همکاران (Sully et al., 1999) پیشنهاد شده، استفاده گردیده است. مراحل انجام این تصحیح در شکل ۴ نشان داده شده است. روش کار به این صورت است که نقطه اوج منحنی محو فشار منفذی، به عنوان  $u_1$  تصحیح شده ( $u_c$ ) و زمان متناظر با آن ( $t_c$ ) بعنوان  $t_0$  یا زمان صفر درصد تحکیم در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴ الف)، سپس با استفاده از رابطه ۲ مقدار فشار منفذی اضافی نرمال شده در هر زمان بدست آمده و منحنی جدیدی به شکل ۴ ب ترسیم می‌گردد که در آن زمان مربوط به ۵۰ درصد تحکیم، یعنی  $U=0.5$  بعنوان  $t_{50}$  در نظر گرفته می‌شود.



الف)



ب)

شکل ۴. مراحل بدست آوردن  $t_{50}$  از منحنی‌های غیراستاندارد.

این منحنی مربوط به آزمایش محو فشار منفذی در عمق ۱۵ متری آزمایش C3 در ناحیه ۱ می‌باشد.

## جدول ۲. خلاصه روش‌های موجود برای تخمین ضریب تحکیم افقی خاک از نتایج آزمایش محو فشار منفذی

نام محقق	فرمول پیشنهادی	پارامترهای مورد استفاده	توضیحات
Teh, 1987		$m$ : شیب بخش خطی اولیه منحنی $M$ : برای موقعیت فیلتر $u_2$ برابر ۱.۱۵ $I_p$ : شاخص سختی خاک $T$ : شعاع مخروط نفوذ	رسم فشار منفذی در مقابل جذر زمان، مناسب برای تفسیر آزمایش های محو فشار منفذی کوتاه مدت
Houlsby & Teh, 1988	$T^* = \frac{c_{ht}}{r^2 (I_p)^{0.5}}$	$t$ : زمان طی شده پس از توقف نفوذ $T^*$ : فاکتور زمان اصلاح شده $I_p$ : شاخص سختی خاک $T$ : شعاع مخروط نفوذ	رسم فشار منفذی در مقابل لگاریتم زمان
Teh & Houlsby, 1991		$T_{50}$ : فاکتور زمان در ۵۰٪ تحکیم. برای موقعیت فیلتر $u_2$ برابر ۰.۲۴۵ $t_{50}$ : زمان مربوط به ۵۰٪ تحکیم $T$ : شعاع مخروط نفوذ	رسم فشار منفذی در مقابل لگاریتم زمان، تاثیر شاخص سختی را در نظر نمی‌گیرد.
Jones & Rust, 1995		$t_{50}$ : زمان مربوط به ۵۰٪ تحکیم (Min)	تخمین مستقیم ضریب تحکیم عمودی برجا، $C_v$ به مترمربع بر سال

## ۲. معرفی مناطق مورد مطالعه

موقعیت این نواحی به شرح جدول ۳ می‌باشد. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه بر روی نقشه ایران نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

در این مطالعه از نتایج آزمایش‌های انجام شده در سه ناحیه در جنوب ایران (مهندسین مشاور ساحل ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷، مهندسین مشاور سازه پردازی ایران ۱۳۸۸) استفاده شده،

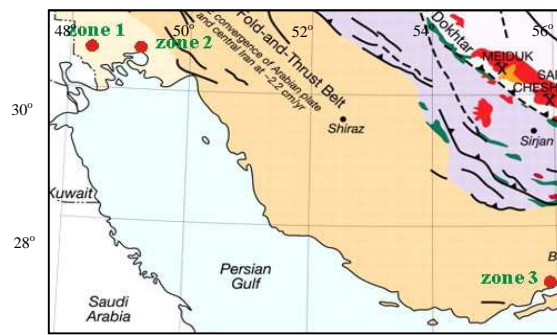
## جدول ۳. موقعیت جغرافیایی نواحی مورد مطالعه و تعداد آزمایش‌های انجام شده در هر یک از نواحی

نواحی	مختصات جغرافیایی	محل	تعداد آزمایش‌های CPTu	تعداد آزمایش‌های محو فشار منفذی	تعداد آزمایش‌های تحکیم آزمایشگاهی
ناحیه ۱	30° 74' 38" شمالی 48° 42' 41" شرقی	دشت خوزستان، ۱۰۰ کیلومتری جنوب اهواز	۲۲	۲۷	۲۲
ناحیه ۲	30° 32' 45" شمالی 49° 10' 49" شرقی	استان خوزستان، بندر ماهشهر	۱۳	۱۴	۱۱
ناحیه ۳	27° 5' 55" شمالی 56° 3' 10" شرقی	۲۰ کیلومتری جنوب غربی بندرعباس، بندر شهید رجایی	۱۳	۲	۲
مجموع			۴۸	۴۳	۳۵

## ۳. نتایج آزمایش‌های تحکیم آزمایشگاهی

مورد مطالعه به تفکیک عمق و ناحیه، نشان داده شده است. بر اساس این شکل، ضریب تحکیم در این رسوبات بین ۰.۰۳ تا ۱.۶ سانتی‌متر مربع بر دقیقه تغییر می‌کند و بیش از ۹۰٪ نمونه‌ها ضریب تحکیمی کمتر از ۰.۲۴ سانتی‌متر مربع بر دقیقه دارند.

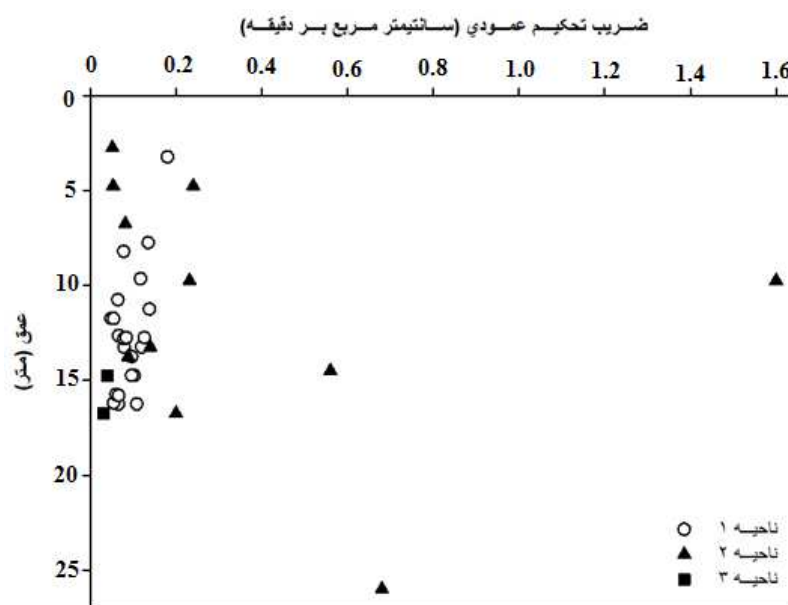
آزمایش تحکیم یک بعدی طبق استاندارد ASTM D2435 انجام شده و نتایج آن به تفکیک نواحی مطالعه شده در جدول ۴ ارائه شده است. در شکل ۶ پراکنندگی ضرایب تحکیم بدست آمده از آزمایش تحکیم آزمایشگاهی روی نمونه‌های



شکل ۵. موقعیت نواحی مورد مطالعه بر روی نقشه ایران

جدول ۴. نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی در نواحی مطالعه شده

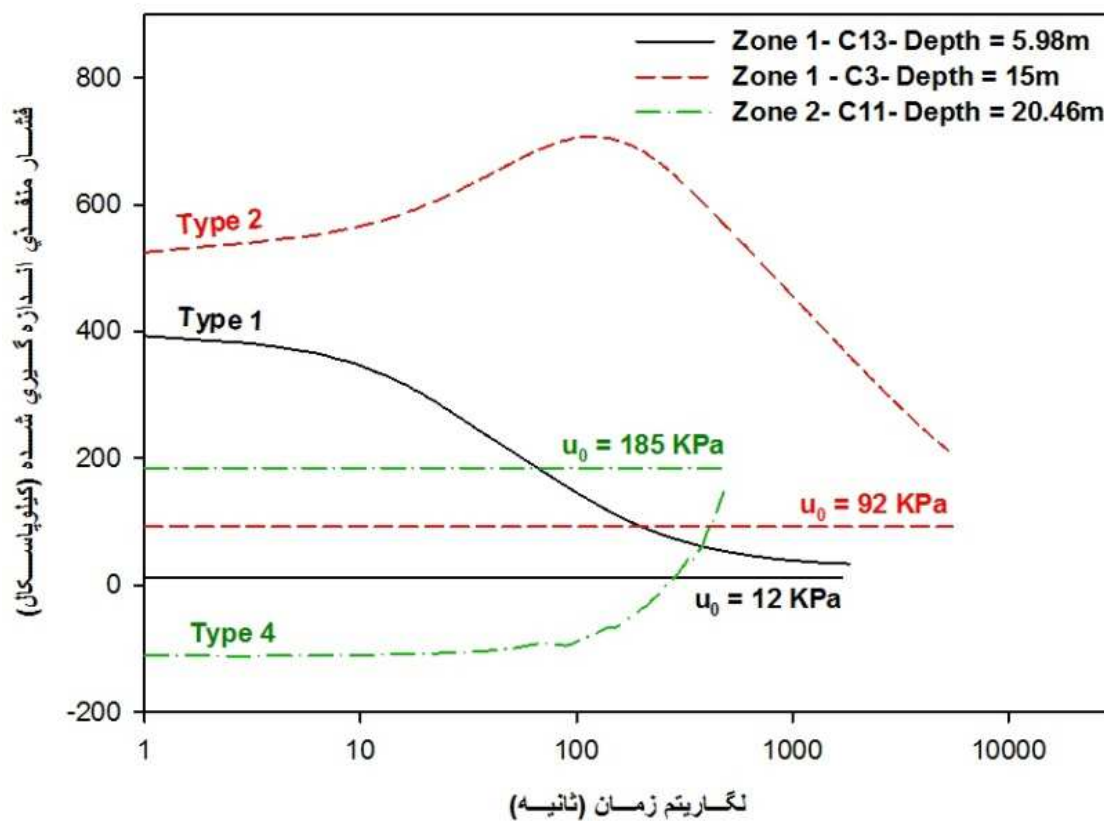
$C_v$ ( $cm^2/min$ )	USCS	عمق (m)	BH No.	نواحی	$C_v$ ( $cm^2/min$ )	USCS	عمق (m)	BH No.	نواحی
0.065	CL	15.6-16	BH-76	ناحیه ۱	0.120	CL	13-13.5	BH-4	ناحیه ۱
0.078	-	12.6-13	BH-80		0.066	-	12.5-12.8	BH-7	
0.135	-	7.5-8	BH-84		0.180	CL-ML	3-3.45	BH-8	
0.084	CL	12.5-13	BH-85		0.048	CL	11.5-12	BH-11	
0.140	-	13-13.5	BH-1	0.138	-	11-11.5	BH-20		
0.088	-	13.5-14	BH-2	0.117	-	9.5-9.8	BH-21		
0.560	-	14.5	BH-2	0.054	CL-ML	11.5-12	BH-25		
1.600	-	9.5-10	BH-3	0.102	CL	14.5-15	BH-33		
0.240	-	4.5-5	BH-6	0.108	CL	16-16.5	BH-56		
0.081	-	6.5-7	BH-6	0.126	-	12.5-13	BH-57		
0.680	-	26	BH-6	0.096	CL	13.5-14	BH-58		
0.231	-	9.5-10	BH-8	0.066	CL	16-16.5	BH-59		
0.051	-	2.5-3	BH-9	0.054	CL	16-16.4	BH-64		
0.200	-	16.5-17	BH-9	0.064	CL	10.5-11	BH-67		
0.053	-	4.5-5	BH-12	0.078	ML	8-8.4	BH-71		
0.030	-	16.75	BH-3	0.078	-	13-13.5	BH-72		
0.040	-	14.75	BH-9	0.096	CL	14.5-15	BH-74		
				0.060	CL	15.5-16	BH-75		



شکل ۶. پراکنندگی ضریب تحکیم بدست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی با عمق در نواحی مورد مطالعه

جدول ۲ محاسبه شده و مقادیر آنها در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. برای محاسبه شاخص سختی از رابطه ۳، و برای محاسبه نسبت  $k_v/k_h$  به منظور تبدیل ضریب تحکیم افقی به عمودی، از نتایج آزمایش نفوذپذیری صحرایی استفاده شده است. مقدار شاخص سختی بدست آمده در هر یک از نواحی به شرح جدول ۵ می باشد.

۴. نتایج آزمایش های محو فشار منفذی و تعیین ضریب تحکیم با استفاده از آن تعداد آزمایش های محو فشار منفذی انجام شده در هر ناحیه در جدول ۳، و نمونه ای از انواع منحنی های محو فشار منفذی که در نواحی مورد مطالعه بدست آمده است، در شکل ۷ ارائه شده است. ضریب تحکیم با استفاده از روش های ذکر شده در



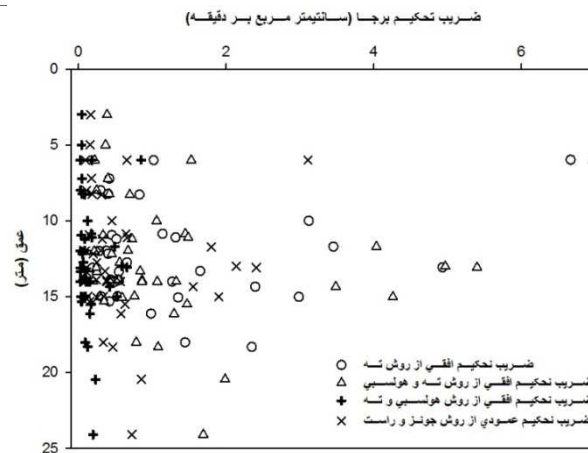
شکل ۷. نمونه ای از منحنی های مختلف فشار منفذی که در نواحی مورد مطالعه بدست آمده است.

جدول ۵. مقادیر شاخص سختی در نواحی مورد مطالعه

نواحی	$S_u$ (kPa)	$G_o$ (MPa)	$I_r$
۱	95	6.39	67
۲	97	7	72
۳	140	8.7	62

جدول ۶. ضرایب تحکیم بدست آمده از روش های مبتنی بر آزمایش محو فشار منفذی در ناحیه ۱

شماره آزمایش	عمق آزمایش (متر)	نوع منحنی	t <sub>50</sub> (s)	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /min)			
				C <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /min) Teh, 1987	C <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /min) Houlsby & Teh, 1988	C <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /min) Teh & Houlsby, 1991	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /min) Jones & Rust, 1995
C2	11.1	غیراستاندارد	258	1.32	1.49	0.18	0.66
	14.35	استاندارد	110	2.39	3.49	0.43	1.55
C3	12	غیراستاندارد	1777	0.28	0.22	0.03	0.10
	15	غیراستاندارد	1322	0.31	0.29	0.04	0.13
C4	13.36	استاندارد	1530	0.55	0.25	0.03	0.11
C5	13.07	استاندارد	71	4.93	5.40	0.66	2.41
C6	7.99	استاندارد	1550	0.30	0.25	0.03	0.11
C7	11.71	استاندارد	95	3.45	4.04	0.49	1.80
	15.02	استاندارد	90	2.99	4.26	0.52	1.90
C8	14.01	غیراستاندارد	359	1.27	1.07	0.13	0.48
C9	14.01	استاندارد	445	0.50	0.86	0.11	0.38
C10	12.75	غیراستاندارد	686	0.66	0.56	0.07	0.25
C11	14.98	استاندارد	505	0.53	0.76	0.09	0.34
C13	5.98	استاندارد	55	6.67	6.97	0.85	3.11
C14	7.22	استاندارد	960	0.42	0.40	0.05	0.18
	12.18	غیراستاندارد	850	0.40	0.45	0.06	0.20
C15	8.28	غیراستاندارد	550	0.83	0.70	0.09	0.31
	13.92	استاندارد	445	0.55	0.86	0.11	0.38
C16	15.32	غیراستاندارد	1102	0.42	0.35	0.04	0.16
	8.23	استاندارد	915	0.40	0.42	0.05	0.19
C18	11.21	استاندارد	527	0.51	0.73	0.09	0.32
	16.13	استاندارد	296	0.98	1.30	0.16	0.58
C19	10.94	غیراستاندارد	1148	0.45	0.33	0.04	0.15
	13.9	استاندارد	703	0.44	0.55	0.07	0.24
C20	15.75	غیراستاندارد	880	0.35	0.44	0.05	0.19
C21	10.86	غیراستاندارد	265	1.14	1.45	0.18	0.65
C22	11.97	استاندارد	570	0.37	0.67	0.08	0.30



شکل ۸. پراکندگی ضریب تحکیم بدست آمده از روش های مختلف برجا نسبت به عمق در نواحی مورد مطالعه



جدول ۷. ضرایب تحکیم بدست آمده از روش‌های مبتنی بر آزمایش محو فشار منفذی در نواحی ۲ و ۳

$k_v/k_h$	$C_h(\text{cm}^2/\text{min})$	$C_h(\text{cm}^2/\text{min})$	$C_h(\text{cm}^2/\text{min})$	$C_v(\text{cm}^2/\text{min})$	$t_{50}$ (s)	نوع منحنی	عمق آزمایش (متر)	شماره آزمایش	نواحی
	Teh, 1987	Houlsby & Teh, 1988	Teh & Houlsby, 1991	Jones & Rust, 1995					
0.50	3.12	1.06	0.12	0.46	375	استاندارد	10		
0.50	1.65	0.84	0.10	0.36	475	غیراستاندارد	13.32	C1	
0.50	2.35	1.08	0.13	0.46	368	استاندارد	18.32		
0.50	-	0.39	0.05	0.17	1025	غیراستاندارد	3	C3	
0.50	1.45	0.78	0.09	0.34	507	غیراستاندارد	18.02		
0.50	-	1.53	0.18	0.66	260	غیراستاندارد	6	C5	
0.50	-	1.47	0.17	0.63	270	غیراستاندارد	15.5	C6	۲
0.50	1.02	0.22	0.03	0.10	1800	استاندارد	6	C7	
0.50	-	4.97	0.59	2.14	80	غیراستاندارد	13	C8	
0.50	-	1.69	0.20	0.73	235	غیراستاندارد	24.1	C10	
0.50	-	1.99	0.23	0.86	200	غیراستاندارد	20.46	C11	
0.50	-	1.32	0.16	0.57	300	غیراستاندارد	14	C12	
0.50	-	0.37	0.04	0.16	1080	غیراستاندارد	5	C13	
0.50	1.35	0.59	0.07	0.26	670	غیراستاندارد	15.06		
0.50	0.43	0.20	0.03	0.09	1860	استاندارد	14	C2	
0.50	0.19	0.24	0.03	0.11	1540	استاندارد	13.1	C11	

آمده از سه روش برجای دیگر، بیشتر از مقدار آزمایشگاهی می‌باشد.

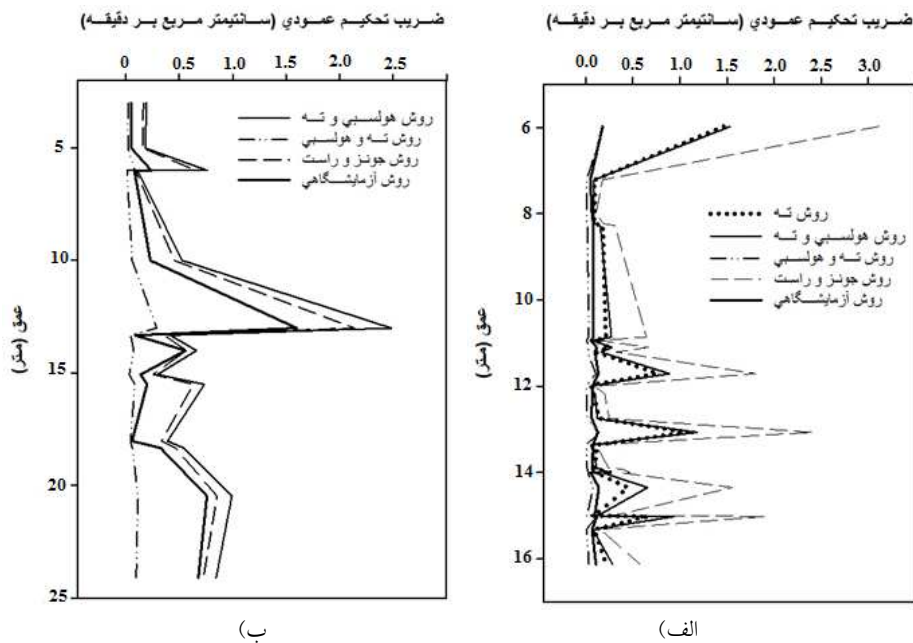
روش ته و هولسبی (Teh and Houlsby, 1991)، همواره کمترین مقدار را برای ضریب تحکیم پیش‌بینی می‌کند. در این روش تاثیر شاخص سختی در نظر گرفته نمی‌شود. بیشترین مقدار ضریب تحکیم مربوط به روش جونز و راست (Jones and Rust, 1995) است. مقادیری که از روش‌های ته (Teh, 1987)، و هولسبی و ته (Houlsby and Teh, 1998) بدست می‌آیند بسیار شبیه هم بوده و نمودارهای مربوط به این دو روش تقریباً روی یکدیگر قرار گرفته‌اند.

تفاوت در مقدار ضریب تحکیم بدست آمده از روش‌های برجا و آزمایشگاهی، به دلیل دست‌خوردگی نمونه‌ها در طی فرایند نمونه‌گیری و انجام آزمایش تحکیم آزمایشگاهی است و آزمایش CPTu به عنوان یک آزمایش صحرائی، تخمین دقیق‌تری از ضریب تحکیم خاک در حالت دست‌نخورده ارائه می‌دهد.

پراکندگی ضرایب تحکیم (عمودی و افقی) بدست آمده از چهار روش برجا در نواحی مورد مطالعه، در شکل ۸ نشان داده شده است.

#### ۵. مقایسه ضرایب تحکیم بدست آمده از روش‌های برجا و آزمایشگاهی

در شکل ۹ ضرایب تحکیم بدست آمده از آزمایش تحکیم آزمایشگاهی (داده‌های جدول ۴) و آزمایش نفوذ مخروط (۴) روش ارائه شده در جدول ۲) نشان داده شده است. بطور کلی روند تغییرات ضرایب تحکیم بدست آمده از روش‌های مختلف نسبت به عمق مشابه بوده و روش‌های مختلف هماهنگی نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. ضریب تحکیم بدست آمده از روش ته و هولسبی (Teh and Houlsby, 1991) و آزمایش تحکیم آزمایشگاهی نزدیک به هم بوده، ولی روش آزمایشگاهی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. مقدار  $C_h$  بدست

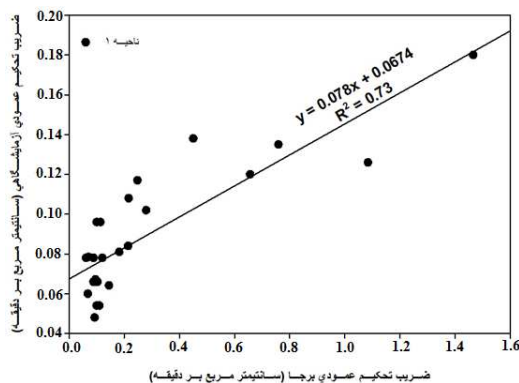


شکل ۹. ضرایب تحکیم عمودی بدست آمده از روش‌های برجا و آزمایشگاهی نسبت به عمق، الف) در ناحیه ۱ و ب) در ناحیه ۲

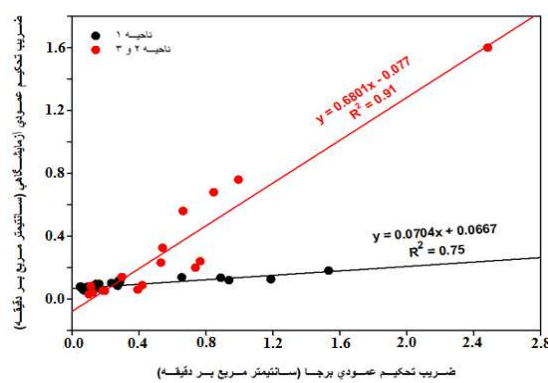
بر اساس شکل ۱۰ تمامی روش‌ها همبستگی قابل قبولی را نشان می‌دهند. در ناحیه ۱، روش جونز و راست (Jones and Rust, 1995)، که در شکل ۸ الف بیشترین مقدار را برای ضریب تحکیم پیش‌بینی می‌کند، بیشترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) را نشان می‌دهد در حالی‌که، روش ته (Teh, 1987) که بر رسم ریشه دوم زمان استوار است، کمترین ضریب تعیین را داراست. دو روش ته و هولسی (Teh and Houlsby, 1991)، و هولسی و ته (Houlsby and Teh, 1998)، همبستگی یکسانی را نشان می‌دهند، زیرا این دو رابطه مشابه هستند فقط یکی از آنها اثر شاخص سختی را نیز در نظر می‌گیرد.

تفاوت در مقدار ضریب تحکیم بدست آمده از روش‌های مختلف مبتنی بر CPTu نیز بدلیل تفاوت در نحوه تفسیر منحنی‌های محو فشار منفذی غیر استاندارد در روش‌های مختلف، توجه یا عدم توجه به شاخص سختی خاک و تجربی بودن برخی روابط که در شرایط منطقه‌ای خاص توسعه یافته‌اند، می‌باشد.

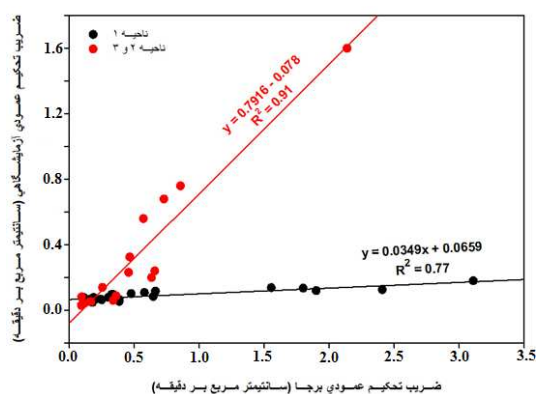
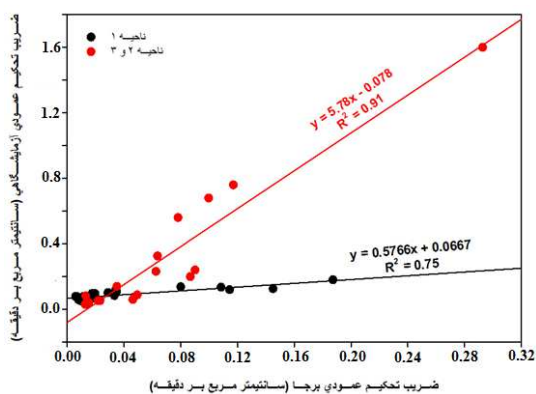
به منظور پیشنهاد رابطه تجربی بین ضریب تحکیم آزمایشگاهی ( $C_v$  Lab) و برجا ( $C_v$  In Situ)، در شکل ۱۰ تغییرات این ضریب که از روش‌های برجا و آزمایشگاهی بدست آمده، برای نواحی مطالعه شده به تفکیک در مقابل هم ترسیم شده است.



ب)  $C_v$  بدست آمده از روش هولسی و ته در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی



الف)  $C_v$  بدست آمده از روش ته در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی

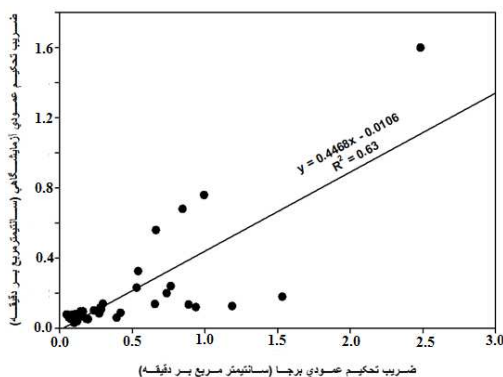


شکل ۱۰. رسم ضریب تحکیم بدست آمده از چهار روش برجا در نواحی مختلف، در مقابل ضریب تحکیم آزمایشگاهی و ترسیم بهترین خط برازش برای هر یک از آنها

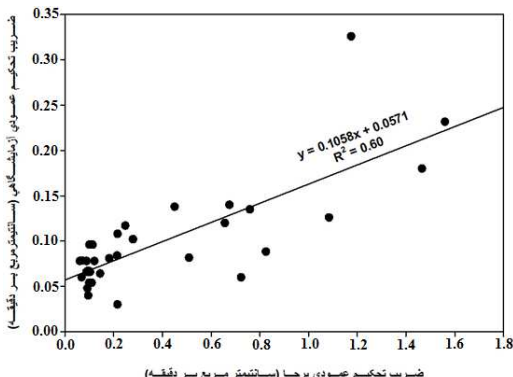
شکل ۱۰. رسم ضریب تحکیم بدست آمده از چهار روش برجا در نواحی مختلف، در مقابل ضریب تحکیم آزمایشگاهی و ترسیم بهترین خط برازش برای هر یک از آنها

می‌توان به این نتیجه رسید که روش‌های پیشنهادی ته (Teh, 1987)، ته و هولسبی (Teh and Houlsby, 1991)، و هولسبی و ته (Houlsby and Teh, 1998) همبستگی قابل قبولی را ارائه می‌کنند، در حالی که نتایج بدست آمده از روش جونز و راست (Jones and Rust, 1995) پراکندگی زیادی را نشان می‌دهد، بیشترین ضریب تعیین متعلق به روش هولسبی و ته ( $R^2=0.63$ )، و کمترین آن متعلق به روش جونز و راست ( $R^2=0.16$ ) می‌باشد.

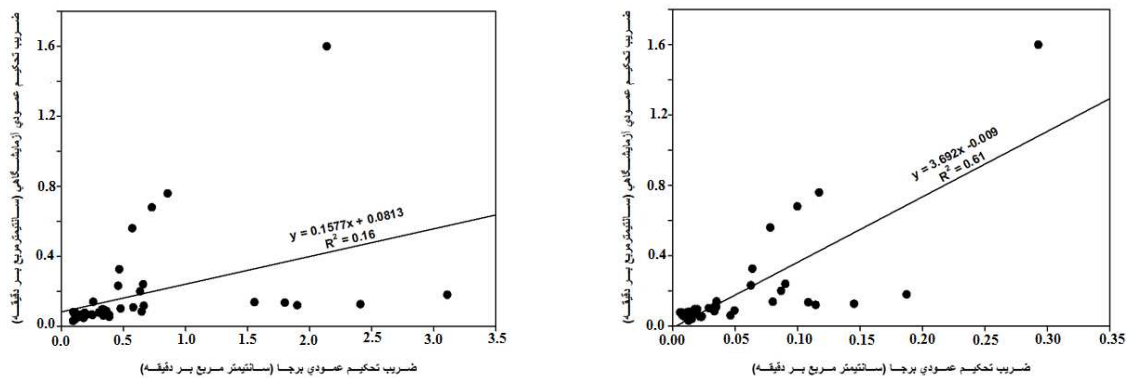
از آنجا که، با توجه به نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده در نواحی ۲ و ۳، نسبت نفوذپذیری عمودی به افقی در این نواحی یکسان می‌باشد (جدول ۷)، ضریب تعیین بدست آمده در هر سه روش برابر بوده و همبستگی قابل قبولی را ارائه می‌کند. پس از بررسی نتایج هر محل به صورت مجزا، داده‌های مربوط به هر سه ناحیه به یک نمودار منتقل گردیده و تحلیل‌های رگرسیونی خطی برای هر یک از روش‌ها انجام شده که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه گردیده است. با توجه به این شکل



الف)  $C_v$  بدست آمده از روش هولسبی و ته در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی



ب)  $C_v$  بدست آمده از روش هولسبی و ته در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی



شکل ۱۱. رسم ضریب تحکیم بدست آمده از چهار روش برجا در مقابل ضریب تحکیم آزمایشگاهی و ترسیم بهترین خط برازش برای هر یک از آنها، در هر سه ناحیه

ج)  $C_v$  بدست آمده از روش ته و هولسی در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی (د)  $C_v$  بدست آمده از روش جونز و راست در مقابل  $C_v$  آزمایشگاهی

خاص توسعه یافته است. لذا، ممکن است شرایط یکی از نواحی مورد مطالعه مشابه آن و دیگری متفاوت بوده و سبب ایجاد این اختلاف شده باشد. مدل‌های رگرسیونی بدست آمده بین ضریب تحکیم آزمایشگاهی و روش‌های برجا در نواحی مختلف در مطالعه حاضر، در جدول ۸ خلاصه شده است.

هنگامی که داده‌های متعلق به نواحی مختلف در یک نمودار قرار می‌گیرند، ضریب تعیین در تمام روش‌ها کاهش می‌یابد، زیرا متفاوت بودن مصالح در نواحی مختلف سبب می‌گردد که تاثیر دستخوردگی روی مصالح مورد آزمایش متفاوت باشد. کاهش بیش از حد ضریب تعیین در رابطه ۷ (کاهش  $R^2$  از حدود ۰.۸۵ به ۰.۱۶) به این دلیل است که این روش یک رابطه تجربی بوده و برای منطقه‌ای مشخص با ویژگی‌های

جدول ۸. مدل‌های رگرسیونی برای  $C_v$

نواحی	Model	$R^2$
	$C_{v Lab.} = 0.078 C_{v In situ (Teh)} + 0.0674$	0.73
۱	$C_{v Lab.} = 0.0704 C_{v In situ (Houlsby \& Teh)} + 0.0667$	0.75
	$C_{v Lab.} = 0.5766 C_{v In situ (Teh \& Houlsby)} + 0.0667$	0.75
	$C_{v Lab.} = 0.0349 C_{v In situ (Jones \& Rust)} + 0.0659$	0.77
	$C_{v Lab.} = 0.6857 C_{v In situ (Houlsby \& Teh)} - 0.0916$	0.91
۲ و ۳	$C_{v Lab.} = 5.8182 C_{v In situ (Teh \& Houlsby)} - 0.0916$	0.91
	$C_{v Lab.} = 0.7968 C_{v In situ (Jones \& Rust)} - 0.0916$	0.91
	$C_{v Lab.} = 0.1058 C_{v In situ (Teh)} + 0.0571$	0.60
	$C_{v Lab.} = 0.4468 C_{v In situ (Houlsby \& Teh)} - 0.0106$	0.63
All	$C_{v Lab.} = 3.692 C_{v In situ (Teh \& Houlsby)} - 0.009$	0.61
	$C_{v Lab.} = 0.1577 C_{v In situ (Jones \& Rust)} + 0.0813$	0.16

## ۶. نتیجه‌گیری

پیش‌بینی می‌کند. بیشترین همبستگی بین نتایج حاصل از روش‌های برجا و آزمایشگاهی متعلق به روش هولسی و ته، و کمترین آن متعلق به روش جونز و راست می‌باشد. مقادیر ضریب تحکیم بدست آمده از آزمایش تحکیم آزمایشگاهی، از مقادیر بدست آمده از روش ته و هولسی، بیشتر و از مقادیر بدست آمده از روش‌های ته، هولسی و ته، و جونز و راست کمتر می‌باشد. به طور کلی مقدار و روند تغییرات ضریب تحکیم بدست آمده از آزمایش تحکیم آزمایشگاهی به ضریب تحکیم افقی حاصل از روش ته و هولسی نزدیکتر است.

در خاک‌های مناطق مورد مطالعه امکان ارائه رابطه تجربی خطی بین ضرایب تحکیم بدست آمده از روش‌های مبتنی بر CPTu و آزمایش تحکیم آزمایشگاهی با همبستگی خوب وجود دارد لیکن این روابط بشدت متأثر از ویژگی‌های هر منطقه خاص بوده به طوری که استفاده از آنها در مناطق دیگر باید با احتیاط کامل انجام شود.

مقایسه نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا برای تعیین ضریب تحکیم خاک نشان‌دهنده اختلاف قابل توجه این دو مقدار می‌باشد. دلیل این اختلاف مقیاس مطالعه و وجود دستخوردگی در نمونه‌های آزمایشگاهی است. حجم نمونه مورد بررسی در آزمایشگاه نسبت به آزمایش برجا کوچکتر است. همچنین، در آزمایش برجا نمونه در شرایط طبیعی خود مورد آزمایش قرار می‌گیرد در حالی که مراحل نمونه‌گیری و آماده‌سازی در آزمایشگاه سبب دستخوردگی نمونه می‌گردد. بنابراین، می‌توان گفت آزمایش CPTu به عنوان یک آزمایش صحرائی، تخمین دقیقتری از ضریب تحکیم خاک در حالت دست‌نخورده ارائه می‌دهد.

مقایسه ۴ روش مختلف تعیین ضریب تحکیم از روی نتایج آزمایش نفوذ مخروط نشان می‌دهد که روش ته و هولسی، کمترین مقدار را برای ضریب تحکیم پیش‌بینی می‌کند. در این روش تاثیر شاخص سختی در نظر گرفته نمی‌شود. روش جونز و راست، بیشترین مقدار را برای ضریب تحکیم عمودی

## منابع

- مهندسین مشاور ساحل، "گزارش مطالعات ژئوتکنیک بندر شهید رجایی"، (۱۳۸۵).
- مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۷. گزارش مطالعات ژئوتکنیک بندر ماهشهر
- مهندسین مشاور سازه‌پردازی، ۱۳۸۸. گزارش‌های داخلی مربوط به نتایج آزمایش‌های نفوذ مخروط
- ASTM D2435., 1990. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils.
- Baligh, M.M., Levadoux, J.N., 1980. Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration. Report No. MITSG 80-13, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Baligh, M.M., Levadoux, J.N., 1986. Consolidation after undrained piezocone penetration. II: Interpretation Journal of Geotechnical Division, ASCE 112(7): 727-745.
- Burns, S.E., Mayne, P.W., 1998. Monotonic and dilatatory pore pressure decay during piezocone tests in clay. Canadian Geotechnical Journal, 35: 1063-1073.
- Chai, J.C., Carter, J.P., Miura, N., Hino, T., 2004. Coefficient of consolidation from piezocone dissipation tests. In: Proceedings of International Symposium on Lowland Technology, Vol 1, Thailand, Bangkok, pp.1-6.
- Houlsby, G.T., Teh, C.I., 1988. Analysis of the piezocone in clay. In: Proceedings of International Symposium on Penetration Testing, Rotterdam, Netherlands, Vol 1, pp 777-783.
- Jones, G.A., Rust, E., 1995. Piezocone settlement prediction parameters for embankments on alluvium. Proceedings of International Symposium on Penetration Testing, CPT 95, Linkoping, Sweden, Vol. 2, pp. 501-508.
- Levadoux, J.N., Baligh, M.M., 1986. Consolidation after undrained piezocone penetration. I: prediction. Journal of Geotechnical Engineering, 112(7):707-726.

- 
- Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic and Professional, London.
- Sully, J.P., Robertson, P.K., Campanella, R.G., Woeller, D.J., 1999. An approach to evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, 36: 369-381.
- Teh, C.I., 1987. An Analytical Study of the Cone Penetration Test. Ph.D thesis, Department of Civil Engineering, Oxford University.
- Teh, C.I., Houlsby, G.T., 1991. An analytical study of the cone penetration test in clay. Geotechnique, 41: 17-34.
- Torstensson, B.A., 1977. The pore pressure probe. Norsk jord- og fjellteknisk forbund. Fjellsprengningsteknikk – bergmekanikk – geoteknikk, Oslo, Foredrag, 34.1-34.15, Trondheim, Norway, Tapir.