دانشکده مهندسی

بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های ریزدانه با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی

حمیدرضا کاظمی

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی
گروه عمران

بهار ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به پدر و مادرعزیزم که همواره مشوق و حامی من بوده‌اند....

سپاسگزاری

اینک که به یاری خداوند متعال پژوهش پیشرو به پایان رسیده است، بر خود لازم می بینم که از زحمات دلسوزانه و بی‌دریغ استاد محترم، جناب آقای دکترجعفر بلوری بزاز و راهنمایی‌های ارزنده ایشان در زمینه انتخاب موضوع، تهیه منابع و امکانات آزمایشگاهی و تدوین پایان‌نامه سپاسگزاری نمایم. همچنین از سایر اساتید محترم گرایش خاک و پی، آقایان: دکتر محمدرضا کاخی، دکتر محمد غفوری، دکتر فریدون پویانژاد و دیگر اساتید گرامی، که از حضورشان بهره گرفته‌ام، صمیمانه قدردانی نموده و توفیق روزافزون آن‌ها را از درگاه خداوند آرزو دارم.

به نام خدا

تاییدیه

گواهی می‌شود که این پایان نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده و تمامی مطالب، بجز در مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: حمیدرضا کاظمی
امضا:

استاد راهنما: دکتر جعفر بلوری بزاز
امضا:

این پایان‌نامه که توسط آقای حمیدرضا کاظمی تدوین و به هیات داوران زیر ارائه گردیده است، به عنوان بخش پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته گرایش خاک و پی مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

دکتر جعفر بلوری بزاز – استاد راهنما

دکتر محمد غفوری – استاد مشاور

دکتر سید احسان سیدی حسینی‌نیا – استاد مدعو

دکتر فرزاد شهابیان – نماینده شورای تحصیلات تکمیلی

فهرست مطالب:

چکیده ..... الف

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- اهداف پژوهش ۲

۱-۳- محدوده و روش پژوهش ۲

فصل دوم: تحکیم خاک های ریزدانه ۴

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- تحکیم یک بعدی ۵

۲-۳- رس های پیش تحکیم یافته ۱۰

۲-۴- تعیین ضریب تحکیم عمودی ۱۲

۲-۴-۱- روش لگاریتم زمان ۱۲

۲-۴-۲- روش ریشه زمان ۱۴

۲-۴-۳- تعیین ضریب تحکیم با توجه به استهلاک فشار منفذی ۱۵

۲-۵- تحکیم ثانویه ۱۷

۲-۶- تحکیم افقی ۲۰
۲-۶-۱- زهکشی شعاعی به سمت مرکز ۲۰
۲-۶-۲- زهکشی شعاعی به سمت خارج ۲۴
۲-۷- آزمایش تحکیم با نرخ کرنش ثابت ۲۶
فصل سوم: دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۳۲
۳-۱- مقدمه ۳۲
۳-۲- جزئیات دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۳۲
۳-۳- مقایسه دستگاه ادئومتر و دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۳۸
۳-۴- انواع آزمایش با دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۳۹
۳-۵- روش کار با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۴۲
۳-۵-۱- آماده سازی نمونه ۴۲
۳-۵-۲- نحوه انجام آزمایش ۴۳
فصل چهارم: آزمایشات ۵۳
۴-۱- مقدمه ۵۳
۴-۲- انتخاب نمونه ۵۴

۴-۳- آزمایشات فیزیکی ۵۴
۴-۳-۱- دانه بندی ۵۴
۴-۳-۲- چگالی متری ۵۵
۴-۳-۳- تعیین درصد رطوبت ۵۶
۴-۳-۴- وزن مخصوص طبیعی ۵۶
۴-۳-۵- حدود آتربرگ ۵۶
۴-۳-۶- تراکم ۵۸
۴-۳-۷- آزمایش نفوذ پذیری ۶۰
۴-۴- برنامه آزمایشات ۶۱
۴-۴-۱- آزمایش های تحکیم با دستگاه ادئومتر ۶۳
۴-۴-۲- آزمایش های تحکیم عمودی با دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۶۷
۴-۴-۳- آزمایش های تحکیم افقی با دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۷۱
۴-۴-۴- آزمایش های تحکیم با کنترل کرنش ۷۴
۴-۵- نحوه تحلیل نتایج ۷۵

۴-۶- نتایج آزمایشات ۸۴

۴-۶-۱- مقایسه بین دستگاه ادئومتر و دستگاه تحکیم هیدرولیکی ۸۴

۴-۶-۲- بررسی تاثیر اندازه قالب دستگاه بر خصوصیات تحکیمی خاک های ریزدانه ۸۵

۴-۶-۳- مقایسه بین تحکیم قائم و افقی ۸۸

۴-۶-۴- بررسی تاثیر درصد تراکم نمونه بر خصوصیات تحکیمی آن ۸۹

۴-۶-۵- مقایسه بین آزمایش تحکیم با بارگذاری معمولی و با بارگذاری با کرنش ثابت ۹۱

فصل چهارم: نتیجه گیری ۹۳

۵-۱- مقدمه ۹۳

۵-۲- چکیده نتایج آزمایشات ۹۴

۵-۳- پیشنهادات ۹۶

مراجع ۹۷

چکیده:

برای شناسایی خصوصیات تحکیمی خاک‌های ریزدانه در آزمایشگاه، اغلب از دستگاه ادئومتر استفاده می‌شود اما محدودیت‌های ناشی از آن باعث می‌گردد که در بسیاری از موارد تعیین پارامترهای تحکیمی خاک ریزدانه ممکن نباشد. همچنین امکان انجام آزمایش تحکیم با استفاده از دستگاه ادئومتر برای خاک‌های درشت دانه و یا خاک‌های غیر یکنواخت فراهم نمی‌باشد. دستگاه تحکیم هیدرولیکی (سلول تحکیم رو) با رفع این محدودیت‌ها، امکان کنترل مسیر-های زهکشی و ثبت فشار منفذی نمونه خاک را در حین عمل تحکیم، فراهم می‌کند. همچنین، علاوه بر تحکیم در جهت عمودی می توان تحکیم افقی (شعاعی) نمونه خاک را نیز مدلسازی کرد. ضریب تحکیم در جهت افقی پارامتر غالب در نشست لایه های خاک‌های ریزدانه‌ای که در آنها زهکش‌های عمودی نصب شده است، می‌باشد.

در تحقیق حاضر با انجام آزمایش‌های متعدد تحکیم بر روی نمونه‌ای از خاک ریزدانه، شناسایی معایب و مزایای این دو دستگاه در مقایسه با یکدیگر انجام گرفت. همچنین سعی شد تاثیر اندازه قالب و درصد تراکم نمونه خاک بر پارامترهای تحکیمی خاک مورد نظر تعیین گردد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضریب تحکیم نمونه خاک وابسته به ابعاد قالب تحکیم می‌باشد در حالی که ضریب فشردگی حجمی مستقل از آن می‌باشد. در آزمایش‌های با زهکشی شعاعی ضریب تحکیم به دست آمده بیشتر از ضریب تحکیم عمودی به دست آمده است و دیده شده است که این اختلاف با افزایش سربار نیز بیشتر می‌گردد. همچنین مشاهده شده که با افزایش درصد تراکم نمونه، زمان تحکیم و نسبت ضریب تحکیم افقی به قائم افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: دستگاه تحکیم هیدرولیکی، تحکیم افقی، زهکشی شعاعی، خاک ریزدانه، فشار منفذی، درصد تراکم.

۱

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

بسیاری از پروژه های عمرانی بر روی خاک های رسی اشباع بنا می شوند. احداث این سازه ها باعث افزایش بارگذاری بر روی لایه رسی و سپس بالا رفتن فشار منفذی آب در این لایه می گردد. با گذشت زمان و با خروج آب از لایه رسی، این لایه دچار نشست تدریجی می شود که به نام نشست تحکیم شناخته می شود.

اغلب برای پیش بینی نشست تحکیمی در آزمایشگاه از دستگاه ادئومتر استفاده می‌گردد. دستگاه ادئومتر که توسط Terzaghi (1919) ساخته شده، دارای معایبی است که در بسیاری موارد استفاده از آن برای تعیین خصوصیات تحکیمی مناسب به نظر نمی‌رسد. از مهمترین نواقص دستگاه ادئومتر تحکیم یک بعدی تنها در جهت عمودی، عدم امکان کنترل زهکشی و نیز اندازه گیری فشار منفذی می‌باشد. در بسیاری موارد نیز تعیین ضریب تحکیم در جهت افقی بیش از جهت عمودی که در آزمایش ادئومتر به دست می آید، ضروری به نظر می‌رسد.

سلول تحکیم رو[1] که توسط Rowe & Barden (1966) در دانشگاه منچستر ابداع شد نواقص دستگاه ادئومتر را برطرف کرده و با استفاده از آن می توان تحکیم افقی و قائم را مدلسازی نمود و مسیرهای زهکشی را کنترل کرد. همچنین امکان اعمال پس فشار به نمونه خاک و ثبت فشار منفذی ایجاد شده در هنگام عمل تحکیم نیز موجود می‌باشد. دستگاه‌های زیادی مشابه با سلول تحکیم رو و در اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند. در تمامی این دستگاه‌ها بارگذاری وارد بر نمونه از طریق فشار هیدرولیکی بر نمونه وارد می‌گردد و دارای امکاناتی مشابه با سلول رو می باشند، به همین دلیل و با توجه به استاندارد انگلیسی (BS) عنوان دستگاه تحکیم هیدرولیکی[2] برای اشاره به این دستگاه در پژوهش حاضر انتخاب شد.

۱-۲- اهداف پژوهش

هدف از تحقیق حاضر تعیین رفتار تحکیمی خاک‌های رسی دستخورده با استفاده از دستگاه تحکیم هیدرولیکی و مقایسه مزایا و معایب آن در مقایسه با دستگاه مرسوم ادئومتر می‌باشد. به صورت خلاصه می توان موارد زیر را به عنوان اهداف از این تحقیق برشمرد:

- تعیین تفاوت‌ها دستگاه ادئومتر و دستگاه تحکیم هیدرولیکی و بررسی مزایا و معایب هر یک
- بررسی روند استهلاک فشار منفذی در آزمایش‌های تحکیم با زهکشی افقی و زهکشی قائم
- بررسی تاثیر اندازه قالب تحکیم بر پارامترهای تحکیمی خاک
- تعیین میزان تاثیر درصد تراکم نمونه خاک بر خصوصیات تحکیمی آن
- مقایسه تحکیم افقی و تحکیم قائم
- تعیین خصوصیات تحکیم خاک در حالت با زهکشی افقی
- مقایسه آزمایش‌های تحکیم با بارگذاری مرحله‌ای و آزمایش‌های تحکیم با بارگذاری به صورت کنترل کرنش
- بررسی نحوه تعیین فشار پیش تحکیمی با آزمایش تحکیم با بارگذاری به صورت کنترل کرنش

---

[1] Rowe Consolidation Cell
[2] Hydraulic Consolidation Cell

۱-۳- محدوده و روش پژوهش

برای دستیابی به اهداف پژوهش آزمایش‌های متعدد تحکیمی با دستگاه ادئومتر معمولی و دستگاه تحکیم هیدرولیکی انجام می شوند. در این آزمایش‌های تحکیم نمونه های خاک با درصدهای تراکم مختلف آماده می‌شوند و در آزمایش-های دستگاه تحکیم هیدرولیکی سعی می‌شود با استفاده از اندازه‌های متفاوت قالب تحکیم تاثیر ابعاد قالب بر خصوصیات تحکیمی خاک های ریزدانه تعیین گردد.

آزمایش‌های با دستگاه تحکیم هیدرولیکی به دو صورت انجام می‌شوند:

الف) تحکیم با زهکشی افقی

ب) تحکیم با زهکشی عمودی

به این صورت مقایسه بین خصوصیات تحکیمی در جهت افقی و قائم امکان پذیر خواهد شد.

در انتهای تحقیق نیز دو آزمایش با کنترل کرنش انجام شده، در یکی از این دو آزمایش نمونه خاک دارای فشار پیش تحکیمی می باشد.

۲

فصل دوم

مروری بر تحکیم خاک های ریزدانه

۲-۱- مقدمه

وقتی که یک لایهٔ خاک اشباع تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد، فشار آب حفره‌ای به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در خاک‌های ماسه‌ای که نفوذپذیری بالا می‌باشد، زهکشی ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ای سریعاً انجام می‌شود. زهکشی آب حفره‌ای همراه با کاهش حجم تودهٔ خاک می‌باشد که نتیجهٔ آن ایجاد نشست است. به علت زهکشی سریع آب حفره‌ای در خاک‌های ماسه‌ای، نشست تحکیم و آنی در آنها به طور همزمان رخ می‌دهد.

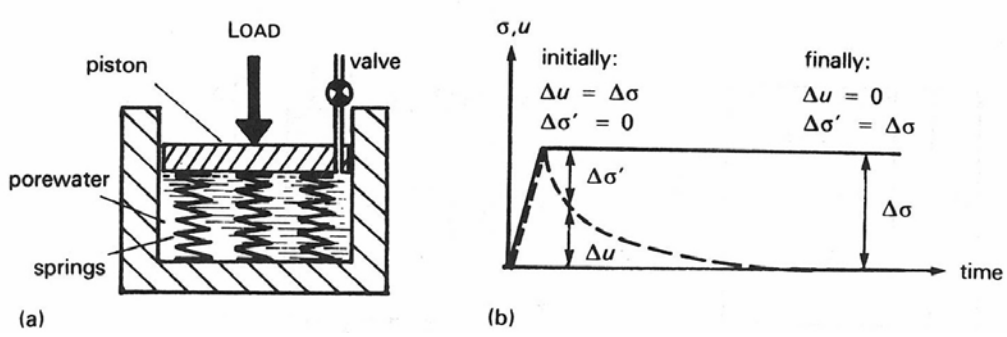
وقتی که یک لایهٔ خاک رس اشباع، تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد، ابتدا نشست آنی رخ می‌دهد. اما از آنجایی که ضریب نفوذپذیری بطور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از ضریب نفوذپذیری ماسه است، زهکشی آب حفره‌ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری، به طور تدریجی و در یک زمان طولانی رخ می‌دهد.

بنابراین کاهش حجم خاک، که آنرا تحکیم می‌نامیم، به مدت طولانی بعد از بارگذاری و نشست آنی ادامه خواهد داشت. در خاک‌های رسی و نرم، نشست تحکیم چندین برابر نشست آنی است.

۲-۲- تحکیم یک بعدی[1]

تحکیم فرآیندی زمان‌بر است که در آن مقدار آب موجود در حفرات خاک اشباع در اثر بارگذاری زهکشی شده، کاهش می‌یابد. این فرآیند در ارتباط با زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای و انتقال بارگذاری بین تنش‌های کل و تنش‌های موثر می‌باشد. شرایط ابتدایی t_0 و شرایط انتهایی t_{100} تحکیم، حالت‌هایی از تراکم هستند. اما به فرآیند مبانی تحکیم اطلاق می شود.

Terzaghi (1925) برای ارزیابی مقدار تحکیم اولیه مدلی را براساس شکل ۲-۱ ارائه کرد. در این مدل ساده یک سیلندر و فنر متصل به آن در نظر گرفته شده است. چنانچه سیلندر از آب پر شود و هنگامی که شیر بسته است بار مشخصی بر روی پیستون وارد شود، آب درون سیلندر تمامی کل بار را تحمل می کند (زیرا آب تراکم نا پذیر است) و فنر دچار هیچ تغییر شکلی نمی شود در این حالت فشار هیدرواستاتیکی داخل نمونه برابر با تنش وارد بر پیستون می‌باشد ($\Delta u=\Delta\sigma$). حال در صورت باز کردن شیر، آب به سمت خارج جریان می یابد و این جریان با کاهش فشار هیدرواستاتیکی و افزایش فشردگی فنر همراه است($\Delta u<\Delta\sigma$). با گذشت زمان فشار هیدرواستاتیکی کاملاً صفر شده و با وارد شدن بار پیستون به فنر، سیستم به تعادل می‌رسد.



شکل ۲-۱ تحکیم یک بعدی (الف)مدل ترزاقی (ب)منحنی تنش-زمان برای فرآیند تحکیم (Das,1997)

[1] One-dimensional Consolidation

در نظریه تحکیم یک بعدی فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱- خاک اشباع و همگن می باشد.

۲- ذرات خاک و آب حفره‌ای تراکم ناپذیر هستند.

۳- تراکم (تغییر شکل) و جریان آب حفره‌ای یک بعدی و تنها در جهت عمودی می‌باشد.

۴- کرنش‌ها کوچک هستند.

۵- جریان آب در داخل خاک از قانون دارسی پیروی می کند.

۶- این خصوصیات خاک در هنگام فرآیند تحکیم ثابت باقی می مانند: m_v, k_v, c_v

۷- رابطه ای یکتا، وابسته به زمان، بین نسبت تخلخل (e) و تنش موثر (σ'_v) وجود دارد.

با توجه به فرضیات فوق محدودیت هایی در عمل برای مدل ترزاقی وجود دارد:

۱- قانون دارسی در شیب های آبی[1] پائین صادق نیست.

۲- با تراکم خاک، نسبت تخلخل و در نتیجه ضریب نفوذپذیری برای جریان قائم کاهش می‌یابد. همچنین ضریب تراکم پذیری (m_v) به صورت غیر خطی (لگاریتمی) با کاهش نسبت تخلخل و تنش موثر کاهش می‌یابد. هرچند برای کرنش‌های کوچک فرض ثابت بودن پارامترهای m_v, k_v, c_v و رابطه خطی بین e و σ'_v قابل قبول می‌باشد.

فرآیند تحکیم کاملاً مربوط به استهلاک اضافه فشار آب حفره‌ای می باشد. از این رو، رابطه Terzaghi اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق z را به زمان وابسته t می‌داند.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

[1] Hydraulic Gradients

U= اضافه فشار آب حفره‌ای در زمان t و در عمق z می باشد.

C_v= ضریب تحکیم در جهت عمودی

با توجه به فرضیات ترزاقی ضریب تحکیم قائم (c_v) را می توان به صورت زیر نیز تعریف کرد:

$$c_v = k_v / m_v \gamma_w \qquad (۲-۲)$$

که در آن:

K_v= ضریب نفوذپذیری در جهت قائم

m_v= ضریب تراکم حجمی

γ_w= وزن مخصوص آب

رابطه (۲-۲) امکان محاسبه ضریب تراکم پذیری حجمی از نتیجه آزمایش تحکیم یک بعدی را فراهم می‌کند.

در صورت فرض اضافه فشار آب حفره‌ای اولیه ثابت (برابر با فشار سربار، برای تحیکم یک بعدی)، Terzaghi (1943) درجه متوسط تحکیم را برای زهکشی عمودی به صورت زیر به دست آورد:

$$U_v = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \qquad (۳-۲)$$

که در آن:

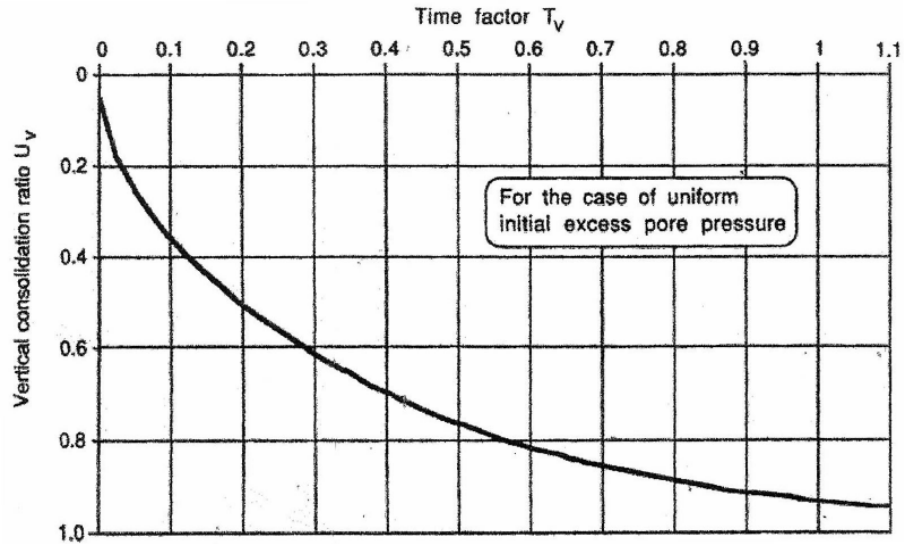
T_v= فاکتور زمان، ($Tv=Cvt/L^2$)

t= زمان

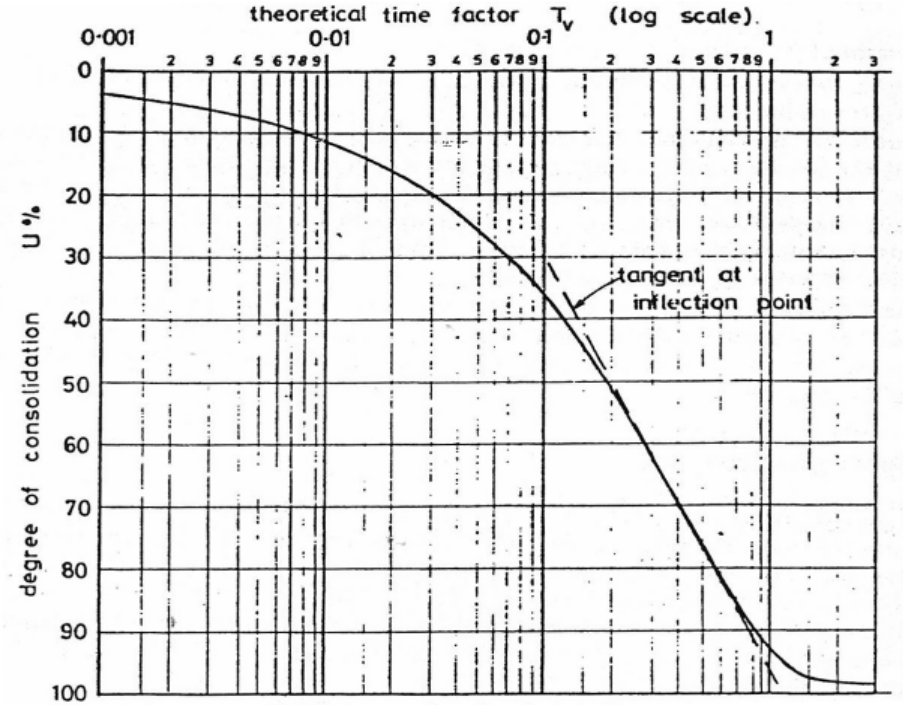
c_v= ضریب تحکیم عمودی

L= بزرگترین مسیر زهشکی برای لایه خاک (متر)، برابر با نصف لایه خاک برای زهکشی دو طرفه و کل لایه خاک در صورت در وجود زهکشی یکطرفه می‌باشد.

مقادیر U_v به عنوان تابعی از T_v در شکل (۲-۲) آورده شده است. همین رابطه در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، که در آن درجه متوسط تحکیم برای زهکشی عمودی، در برابر فاکتور بدون بعد زمان (T_v) با مقیاس لگاریتمی، ترسیم شده است. در شکل (۲-۴) درجه متوسط تحکیم U_v در برابر ریشه فاکتور زمان ($T_v^{0.5}$) ترسیم شده است.



شکل ۲-۲ درجه متوسط تحکیم برای زهکشی عمودی به عنوان تابعی از فاکتور بدون بعد زمان (T_v) (Head, 1982)



شکل ۲-۳ فاکتور زمان (T_v)با مقیاس لگاریتمی در برابر درجه متوسط تحکیم (U_v%)برای زهکشی عمودی (Head,1982)