دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی مشخصات ژئوتکنیکی خاکها براساس نتایج آزمایشهای دانه بندی و حدود اتربرگ

از

پریچهر تیزپا

استاد راهنما

دکتر رضا جمشیدی چناری

اساتید مشاور

دکتر مهران کریمپور فرد

Prof. Sandro Lemos Machado

آذر ۱۳۹۲

تقدیم به مقدس ترین واژه در لغت نامه دلم

مادرم

آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلبم تا ابد پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. در کمال مودت و مسرت، لازم می دانم از همه کسانی که به نوعی در مسیر انجام این پایان نامه مرا راهنمایی و مساعدت نموده اند، تشکر و قدردانی نمایم:

از اساتید بزرگوارم، جناب آقایان **دکتر رضا جمشیدی چناری** و **دکتر مهران کریمپور فرد** که در کمال سعه صدر از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننموده اند، نهایت سپاس و تشکر را دارم. باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

از همراهی ها و حمایت های همیشگی آقای مهندس **افشار نعمتی** که انجام این مهم را بر من آسان نمود، بی نهایت سپاسگزارم.

از آقایان دکتر **هادی حسن زاده**، دکتر **رضا علایی**، مهندس **قربانی**، سرکار خانم مهندس **سحر فرجی** و سایر عزیزانی که در مقطع کارشناسی ارشد اینجانب را یاری رسانده اند تشکر می نمایم.

فهرست مطالب

فهرست شکل ها..... چ

فهرست جدول ها ..... ر

چکیدۀ فارسی ..... ز

چکیدۀ انگلیسی ..... س

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ شرح مختصری از تحقیق ۳

۱-۳ اهداف مورد نظر در تحقیق ۴

۱-۴ معرفی فصول ۵

فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ تخمین ضریب نفوذپذیری خاک ۸

۲-۳ پارامترهای تراکمی ۲۱

۲-۳-۱ تأثیر انرژی تراکم بر پارامترهای تراکمی ۲۳

۲-۳-۲ تخمین پارامترهای تراکمی با استفاده از مشخصات دانه‌بندی و اتربرگ ۲۶

۲-۴ مقاومت برشی خاک ۳۵

۲-۴-۱ اثر سرعت برش بر روی زاویه اصطکاک خاک ۴۰

فصل سوم: داده‌های آزمایشگاهی و متدلوژی انجام تحقیق

۳-۱ مقدمه ۴۲

۳-۲ بانک داده‌های آزمایشگاهی ۴۲

۳-۳ روش‌های مدل‌سازی ۴۵

۳-۳-۱ رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی (EPR) ۴۵
۳-۳-۱-۱ تحلیل پارامتریک روابط ارائه شده توسط EPR ۴۸
۳-۳-۲ شبکهٔ عصبی مصنوعی ۴۸
۳-۳-۲-۱ پرسپترون چند لایه ۵۰
۳-۳-۲-۲ تحلیل حساسیت ۵۱
۳-۴ پردازش داده‌ها ۵۲
۳-۵ ارزیابی دقت مدل‌های به دست آمده ۵۲

فصل چهارم: تحلیل نتایج حاصله

۴-۱ مقدمه ۵۵
۴-۲ تخمین ضریب نفوذپذیری ۵۵
۴-۲-۱ تخمین ضریب نفوذپذیری با استفاده از EPR ۵۵
۴-۲-۲ نتایج تحلیل پارامتری بر روی رابطهٔ ضریب نفوذپذیری ۵۸
۴-۲-۳ تخمین ضریب نفوذپذیری با استفاده از ANN ۶۰
۴-۲-۴ نتایج تحلیل حساسیت بر روی ضریب نفوذپذیری ۶۲
۴-۲-۵ مقایسهٔ رابطهٔ ضریب نفوذپذیری به دست آمده از EPR با تحقیقات پیشین..... ۶۵
۴-۳ حداکثر وزن مخصوص خشک ۶۶
۴-۳-۱ تخمین حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از EPR ۶۶
۴-۳-۲ نتایج تحلیل پارامتری بر روی حداکثر وزن مخصوص خشک ۶۹
۴-۳-۳ تخمین حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از ANN ۷۲
۴-۳-۴ نتایج تحلیل حساسیت بر روی حداکثر وزن مخصوص خشک ۷۳
۴-۳-۵ مقایسهٔ رابطهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک به دست آمده از EPR با تحقیقات پیشین ۷۶

۴-۴-۱ تخمین درصد رطوبت بهینه با استفاده از EPR ۷۷
۴-۴-۲ نتایج تحلیل پارامتری بر روی رابطهٔ درصد رطوبت بهینه ۸۰
۴-۴-۳ تخمین درصد رطوبت بهینه با استفاده از ANN ۸۱
۴-۴-۴ نتایج تحلیل حساسیت بر روی درصد رطوبت بهینه ۸۳
۴-۴-۵ مقایسهٔ رابطهٔ درصد رطوبت بهینه به دست آمده از EPR با تحقیقات پیشین ۸۵
۴-۵ زاویه اصطکاک مؤثر خاک ۸۷
۴-۵-۱ تخمین زاویه اصطکاک مؤثر با استفاده از EPR ۸۷
۴-۵-۲ نتایج تحلیل پارامتری بر روی رابطهٔ زاویه اصطکاک مؤثر ۸۹
۴-۵-۳ تخمین زاویه اصطکاک مؤثر با استفاده از ANN ۹۱
۴-۵-۴ نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی مدل زاویه اصطکاک مؤثر خاک ۹۳
۴-۵-۵ مقایسهٔ رابطهٔ زاویه اصطکاک داخلی مؤثر به دست آمده از EPR با تحقیقات پیشین ۹۵

فصل پنجم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱ جمع‌بندی ۹۸
۵-۲ نتیجه‌گیری ۹۹
۵-۳ ارائه پیشنهادات برای ادامهٔ مطالعه ۱۰۱

منابع و مراجع ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ نمودار تجمعی جرم ذرات در برابر اندازهٔ ذرات (Boadu, 2000) ۱۱
شکل ۲-۲ رابطهٔ بین ضریب نفوذپذیری خاک و بعد فراکتال منحنی دانه‌بندی (Boadu, 2000) ۱۲
شکل ۲-۳ رابطهٔ بین ضریب نفوذپذیری خاک و آنتروپی (Boadu, 2000) ۱۲
شکل ۲-۴ تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد ریزدانهٔ خاک (Boadu, 2000) ۱۳
شکل ۲-۵ مقایسهٔ مقادیر ضریب نفوذپذیری با استفاده از الف) رابطهٔ Wang & Huang ، ب) شبکهٔ عصبی مصنوعی (Sinha & Wang, 2008) ۱۵
شکل ۲-۶ تغییرات ضریب نفوذپذیری با درصد تراکم (Ahangar-Asr *et al*., 2011) ۱۷
شکل ۲-۷ تغییرات ضریب نفوذپذیری با اندازهٔ مؤثر ذرات (Ahangar-Asr *et al*., 2011) ۱۷
شکل ۲-۸ تغییرات ضریب نفوذپذیری با نشانهٔ خمیری (Ahangar-Asr *et al*., 2011) ۱۸
شکل ۲-۹ تغییرات ضزیب نفوذپذیری با درصد تراکم(Boynton & Daniel, 1985) ۱۹
شکل ۲-۱۰ مقادیر تجربی ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تخمین یافته از رابطهٔ Hazen (Cote *et al*., 2012) ۲۰
شکل ۲-۱۱ مقادیر تجربی ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تخمین یافته از رابطهٔ Chapuis (Cote *et al*., 2012) ۲۰
شکل ۲-۱۲ اصول تراکم (Braja. M. Das, 2002) ۲۱
شکل ۲-۱۳ منحنی تراکم چهار نوع خاک مختلف (Braja. M. Das, 2002) ۲۲
شکل ۲-۱۴ تأثیر انرژی تراکم بر تراکم یک خاک رس ماسه‌دار (Braja. M. Das, 2002) ۲۳
شکل ۲-۱۵ الف) حداکثر وزن مخصوص خشک، ب) درصد رطوبت بهینه در برابر لگاریتم انرژی تراکم (Blotz *et al*., 1998) ۲۴
شکل ۲-۱۶ تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک با لگاریتم انرژی تراکم (Jesmani *et al*., 2008) ۲۵
شکل ۲-۱۷ تغییرات درصد رطوبت بهینه با لگاریتم انرژی تراکم (Jesmani et al., 2008) ۲۶
شکل ۲-۱۸ حداکثر وزن مخصوص خشک در برابر درصد رطوبت بهینه (Matteo *et al*., 2009) ۲۸
شکل ۲-۱۹ روند تغییرات درصد رطوبت بهینه با تغییرات الف) درصد درشت دانه، ب) درصد ریزدانه، ج) حد روانی و د) حد خمیری ۲۹

شکل ۲-۲۰ روند تغییرات حداکثر وزن مخصوص با تغییرات الف) درصد درشت دانه، ب) درصد ریزدانه، ج) حد روانی و د) حد خمیری ۳۰
شکل ۲-۲۱ تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک با الف) مدول ریزی، ب) حد خمیری، ج) حد روانی (Ahangar-Asr et al., 2011) ۳۲
شکل ۲-۲۲ تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک با الف) مدول ریزی، ب) ضریب یکنواختی، ج) حد خمیری (Ahangar-Asr et al., 2011) ۳۳
شکل ۲-۲۳ دوایر مور و پوش گسیختگی الف) تنش کل، ب) تنش مؤثر ۳۵
شکل ۲-۲۴ روند تغییرات زاویه اصطکاک خاک با تغییرات الف) نسبت ریزدانه به درشت دانه، ب) حد روانی، ج) چگالی خاک (Mousavi *et al*., 2011) ۳۸
شکل ۲-۲۵ درصد اهمیت پارامترهای ورودی در تخمین چسبندگی (Mollahasani *et al*., 2011) ۳۹
شکل ۲-۲۶ پوش گسیختگی ماسه در نرخ‌های مختلف بارگذاری (Abdullah I.Al-Mhaidib., 2006) ۴۰
شکل ۳-۱ فراوانی داده‌های استفاده شده از هر یک از منابع مذکور ۴۳
شکل ۳-۲ دیاگرام عمومی پروسهٔ EPR (Rezania *et al*., 2008) ۴۷
شکل ۳-۳ ساختار کلی شبکهٔ MLP ۵۱
شکل ۴-۱ مقادیر تخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش) ۵۶
شکل ۴-۲ مقادیر تخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) ۵۷
شکل ۴-۳ روند تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر نسبت اندازه مؤثر ذرات به اندازه متوسط ذرات ۵۸
شکل ۴-۴ روند تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر درصد تراکم ۵۹
شکل ۴-۵ روند تغییرات ضریب نفوذپذیری در برابر نشانهٔ خمیری ۵۹
شکل ۴-۶ مقادیر تخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش) ۶۱
شکل ۴-۷ مقادیر تخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) ۶۱
شکل ۴-۸ مقادیرتخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تجربی آن با حذف D_{10} ۶۳
شکل ۴-۹ مقادیرتخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تجربی آن با حذف D_{50} ۶۳
شکل ۴-۱۰ مقادیرتخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تجربی آن با حذف LL ۶۳
شکل ۴-۱۱ مقادیرتخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تجربی آن با حذف PL ۶۳

شکل ۴-۱۲ مقادیرتخمین یافتهٔ ضریب نفوذپذیری در برابر مقادیر تجربی آن با حذف Cd ۶۴
شکل ۴-۱۳ منحنی توزیع نرمال روابط نفوذپذیری ارائه شده در تحقیق حاضر و تحقیقات Wang & Huang (1984) و Ahangar-Asr et al. (2011) ۶۶
شکل ۴-۱۴ مقادیر تخمین یافتهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش.. ۶۸
شکل ۴-۱۵ مقادیر تخمین یافتهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) .. ۶۸
شکل ۴-۱۶ روند تغییرات MDD در برابر درصد شن ۶۹
شکل ۴-۱۷ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات درصد ماسهٔ درشت ۶۹
شکل ۴-۱۸ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات درصد ماسهٔ متوسط ۷۰
شکل ۴-۱۹ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات درصد ماسهٔ ریز ۷۰
شکل ۴-۲۰ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات درصد سیلت ۷۰
شکل ۴-۲۱ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات درصد رس ۷۰
شکل ۴-۲۲ روند تغییرات MDD در برابر تغیرات حد خمیری ۷۱
شکل ۴-۲۳ مقادیر تخمین یافتهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش) ۷۲
شکل ۴-۲۴ مقادیر تخمین یافتهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) .. ۷۳
شکل ۴-۲۵ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف درصد شن در برابر مقادیر تجربی ۷۴
شکل ۴-۲۶ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف درصد ماسه در برابر مقادیر تجربی ۷۴
شکل ۴-۲۷ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف درصد ریزدانه در برابر مقادیر تجربی ۷۴
شکل ۴-۲۸ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف چگالی ویژه در برابر مقادیر تجربی ۷۴
شکل ۴-۲۹ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف حد روانی در برابر مقادیر تجربی ۷۵
شکل ۴-۳۰ مقادیر تخمین یافتهٔ MDD با حذف حد خمیری در برابر مقادیر تجربی ۷۵
شکل ۴-۳۱ منحنی توزیع نرمال روابط حداکثر وزن مخصوص خشک ارائه شده در تحقیق حاضر و تحقیقات Wang & Huang (1984) و Ahangar-asr et al. (2011) ۷۷
شکل ۴-۳۲ مقادیر تخمین یافتهٔ درصد رطوبت بهینه با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش) ۷۸
شکل ۴-۳۳ مقادیر تخمین یافتهٔ درصد رطوبت بهینه با استفاده از EPR در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) ۷۹

شکل ۴-۳۴ روند تغییرات OMC با درصد رس ۸۰
شکل ۴-۳۵ روند تغییرات OMC با چگالی ویژه ۸۰
شکل ۴-۳۶ روند تغییرات OMC با حد خمیری ۸۱
شکل ۴-۳۷ روند تغییرات OMC با حداکثر وزن مخصوص خشک ۸۱
شکل ۴-۳۸ مقادیر تخمین یافتهٔ درصد رطوبت بهینه با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های آموزش) ۸۲
شکل ۴-۳۹ مقادیر تخمین یافتهٔ درصد رطوبت بهینه با استفاده از ANN در برابر مقادیر تجربی (داده‌های تست) ۸۲
شکل ۴-۴۰ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف درصد شن در برابر مقادیر تجربی ۸۳
شکل ۴-۴۱ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف درصد ماسه در برابر مقادیر تجربی ۸۳
شکل ۴-۴۲ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف درصد ریزدانه در برابر مقادیر تجربی ۸۴
شکل ۴-۴۳ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف چگالی ویژه در برابر مقادیر تجربی ۸۴
شکل ۴-۴۴ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف حد روانی در برابر مقادیر تجربی ۸۴
شکل ۴-۴۵ مقادیر تخمین یافتهٔ OMC با حذف حد خمیری در برابر مقادیر تجربی ۸۴
شکل ۴-۴۶ منحنی توزیع نرمال روابط درصد رطوبت بهینه ارائه شده در تحقیق حاضر و تحقیقات Wang & Huang (1984) و Ahangar-Asr et al. (2011) ۸۶
شکل ۴-۴۷ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک از رابطهٔ EPR در برابر مقادیر تجربی آن (داده‌های آموزش) ۸۸
شکل ۴-۸۷ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک از رابطهٔ EPR در برابر مقادیر تجربی آن (داده‌های تست) ۸۸
شکل ۴-۴۹ روند تغییرات زاویه اصطکاک مؤثر خاک در برابر تغییرات درصد درشت دانه ۸۹
شکل ۴-۵۰ روند تغییرات زاویه اصطکاک مؤثر خاک در برابر تغییرات درصد ریز دانه ۸۹
شکل ۴-۵۱ روند تغییرات زاویه اصطکاک مؤثر خاک در برابر تغییرات وزن مخصوص خاک ۹۰
شکل ۴-۵۲ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک از مدل ANN در برابر مقادیر تجربی آن (داده‌های آموزش) ۹۱
شکل ۴-۵۳ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک از مدل ANN در برابر مقادیر تجربی آن (داده‌های تست) ۹۲
شکل ۴-۵۴ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک با حذف درصد درشت دانه در برابر مقادیر تجربی ۹۳
شکل ۴-۵۵ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک با حذف حد روانی در برابر مقادیر تجربی ۹۳
شکل ۴-۵۶ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک با حذف وزن مخصوص خاک در برابر مقادیر تجربی ۹۴

شکل ۴-۵۷ مقادیر تخمین یافتهٔ زاویه اصطکاک با حذف نرخ برش در برابر مقادیر تجربی ۹۴

شکل ۴-۵۸ منحنی توزیع نرمال روابط زاویه اصطکاک مؤثر خاک ارائه شده در تحقیق حاضر و Mousavi *et al*. (2011) ۹۶

فهرست جدول‌ها

جدول ۲- ۱ مقایسهٔ ضرایب تعیین به دست آمده از روش‌های مختلف در تخمین ضریب نفوذپذیری (Ahangar-Asr *et al.*, 2011) ۱۶

جدول ۲-۲ مقایسهٔ ضرایب تعیین به دست آمده از روش‌های مختلف در تخمین پارامترهای تراکمی (Ahangar-Asr et al., 2011) ۳۱

جدول ۳-۱ محدودهٔ تغییرات خواص فیزیکی نمونه‌های خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر ۴۴

جدول ۳-۲ محدودهٔ تغییرات پارامترهای تراکمی، نفوذپذیری و زاویه اصطکاک داخلی ۴۵

جدول ۴-۱ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از EPR در تخمین ضریب نفوذپذیری ۵۷

جدول ۴-۲ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از ANN در تخمین ضریب نفوذپذیری ۶۲

جدول ۴-۳ نتایج تحلیل حساسیت بر روی مدل ضریب نفوذپذیری ۶۴

جدول ۴-۴ مقایسهٔ عملکرد رابطهٔ ضریب نفوذپذیری ارائه شده با تحقیقات پیشین ۶۵

جدول ۴-۵ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از EPR در تخمین حداکثر وزن مخصوص خشک ۶۷

جدول ۴-۶ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از ANN در تخمین حداکثر وزن مخصوص خشک ۷۳

جدول ۴-۷ نتایج تحلیل حساسیت بر روی مدل حداکثر وزن مخصوص خشک ۷۶

جدول ۴-۸ مقایسهٔ عملکرد رابطهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک ارائه شده با تحقیقات پیشین ۷۶

جدول ۴-۹ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از EPR در تخمین درصد رطوبت بهینه ۷۹

جدول ۴-۱۰ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از ANN در تخمین درصد رطوبت بهینه ۸۳

جدول ۴-۱۱ نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی مدل درصد رطوبت بهینه ۸۵

جدول ۴-۱۲ مقایسهٔ عملکرد رابطهٔ درصد رطوبت بهینه ارائه شده با تحقیقات پیشین..... ۸۶

جدول ۴-۱۳ ارزیابی عملکرد رابطهٔ به دست آمده از EPR در تخمین زاویه اصطکاک مؤثر ۸۷

جدول ۴-۱۴ ارزیابی عملکرد مدل شبکهٔ عصبی در تخمین زاویه اصطکاک مؤثر ۹۲

جدول ۴-۱۵ نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته بر روی مدل زاویه اصطکاک مؤثر ۹۵

جدول ۴-۱۶ مقایسهٔ عملکرد رابطهٔ زاویه اصطکاک داخلی مؤثر ارائه شده با تحقیقات پیشین ۹۵

چکیده

ارزیابی مشخصات ژئوتکینیکی خاکها براساس نتایج آزمایشهای دانه بندی و حدود اتربرگ

پریچهر تیزپا

ارزیابی مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی خاکها همواره گام اول در اغلب پروژه‌های مهندسی عمران می‌باشد. از آن جا که انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک نیازمند صرف زمان و هزینهٔ قابل توجهی می‌باشد، در دست داشتن روابطی که قادر به تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بستر با سطح دقت مطلوبی باشند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ از جمله آزمایش‌هایی هستند که در ابتدای تمامی پروژه‌های ژئوتکنیکی صورت می‌گیرند، از این رو می‌توان از نتایج این آزمایش‌ها به منظور تخمین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها بهره برد. در تحقیق حاضر، روابط و مدل‌هایی جهت تخمین برخی پارامترهای مهم ژئوتکنیکی از قبیل ضریب نفوذپذیری، حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه و زاویهٔ اصطکاک داخلی مؤثر خاک بر اساس خصوصیات دانه‌بندی و حدود اتربرگ ارائه شده است. بدین منظور از بانک داده‌ای مشتمل بر ۵۹۵ مورد نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم، نفوذپذیری و سه محوری زهکشی شده استفاده گردیده است.

در این راستا، بعد از شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر روی مقادیر هر یک از پارامترهای فوق‌الذکر با بهره‌گیری از از دو تکنیک رگرسیون تکاملی چندجمله‌ای بر پایهٔ الگوریتم ژنتیک و شبکهٔ عصبی مصنوعی روابط و مدل‌هایی با سطح دقت بالا ارائه شده است. هم‌چنین به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده مطالعات پارامتریک و تحلیل حساسیت بر روی نتایج صورت گرفته و نتایج در قالب جداول و نمودارها ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ضریب نفوذپذیری، حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه، زاویهٔ اصطکاک، رگرسیون تکاملی چندجمله‌ای و شبکهٔ عصبی مصنوعی

Abstract

Evaluation of geotechnical properties of soils based on granulometry and Atterberg limit tests

Parichehr Tizpa

Determination of the soil properties and their geotechnical parameters is always the first step in civil engineering projects. Since laboratory tests to determine the geotechnical properties of soils require considerable time and expense, it is desirable to have prediction models capable of predicting the geotechnical properties of soils. Index tests such as grain size distribution and Atterberg limits are the first tests which are conducted in any type of earthwork project. Thus these easily measured indexes can be used to obtain prediction models for geotechnical properties of soil. The current study presents prediction models and relationships which relate maximum dry density, optimum moisture content, permeability and effective friction angle to the soil index properties. In this regard, a database including total number of 595 data sets was compiled. The database contains the results of grain size distribution, Atterberg limits, compaction, permeability and consolidated-drained triaxial compression tests.

In this order, the most influencing variables on the above mentioned parameters have been identified and two methods have been employed to predict these geotechnical parameters: evolutionary polynomial regression and artificial neural network. To evaluate the performance of the developed models the parametric study and sensitivity analysis have been performed. The results are presented in graphs and tables.

Keywords: Permeability, Maximum dry density, Optimum moisture content, Effective friction angle, Evolutionary polynomial regression, Artificial neural network

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه گام اول در اغلب پروژه‌های مهندسی عمران ارزیابی مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک می‌باشد. بدین منظور داده‌های ژئوتکنیکی باید با استفاده از آزمون‌های محلی و آزمایشگاهی گردآوری و تفسیر شوند. شناسایی ژئوتکنیکی زمین باید به گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که معیارهای طراحی، ساخت و تأمین عملکرد سازهٔ مورد نظر را فراهم نماید. ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی ساختگاه تابعی از نوع پروژه، شرایط زمین و هم‌چنین بودجه پروژهٔ مورد نظر می‌باشد. این شناسایی‌ها که شامل بررسی لایه‌بندی خاک و خصوصیات مهندسی آن می‌باشد، گاهاً به شدت تحت تأثیر محدودیت‌های مالی پروژه قرار می‌گیرند و از این رو معمولا حجم بررسی‌های اولیه ژئوتکنیکی و تعیین مشخصات مکانیکی خاک بستر دچار جرح و تعدیل‌های قابل ملاحظه‌ای می‌گردد که این امر حاکم بر سطح دقت مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر محدودیت‌های مالی، موضوع زمان‌بر بودن آزمون‌های آزمایشگاهی را نیز باید افزود که پروسهٔ ارزیابی‌های ژئوتکنیکی را دچار وقفه می‌کند. با توجه به مسائل ذکر شده، در دست داشتن روابطی که قادر به تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بستر با سطح دقت مطلوبی باشند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نفوذپذیری و مقاومت برشی دو پارامتر بسیار مهم در طراحی اغلب پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌باشند. ضریب نفوذپذیری و مقاومت برشی خاک به درجهٔ تراکم خاک وابسته هستند. در حین پروسهٔ تراکم، در نتیجهٔ کاهش حجم حفرات خاک مقاومت برشی و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. از سویی افزایش درصد رطوبت خاک سبب کاهش مقاومت برشی آن می‌شود. در بعضی موارد نفوذپذیری و مقاومت برشی مورد نیاز باید در نقطهٔ اوج منحنی تراکم (حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه) به دست آیند. از این رو در دست داشتن حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در مطالعات ژئوتکنیکی از اهمیت بالایی برخوردار

است. انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین پارامترهای تراوایی، تراکمی و مقاومت برشی از جمله آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند. از این رو تلاش‌هایی به منظور ارائهٔ روابطی جهت تخمین این پارامترها صورت گرفته است.

همان‌گونه که ذکر شد، مطالعات بسیاری به منظور تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک صورت گرفته است که در این میان می‌توان به مطالعات Rowan & Graham (1948)، Davidson & Gardiner (1949)، Turnball (1948)، Jumikis (1946)، Ring et al. (1962)، Ramiah et al. (1970)، Nagaraj (1994) و بسیاری دیگر به منظور مرتبط ساختن پارامترهای تراکمی به خواص فیزیکی خاک اشاره کرد. از میان تلاش‌های صورت گرفته جهت تخمین ضریب نفوذپذیری خاک بر اساس خواص اولیه خاک می‌توان به تحقیقات Hazen (1911)، Carman (1937)، Burmister (1954)، Olson (1963)، Mitchell *et al.* (1965)، Wang and Huang (1983)، Koltermann and Gorelick (1995)، Boadu (2000)، Chapuis (2004)، Sinha and Wang (2008)، Cote *et al.* (2012) اشاره کرد. در مطالعات ذکر شده به وضوح مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری خاک به مشخصات دانه‌بندی و حدود اتربرگ آن وابسته است.

در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در زمینهٔ تخمین پارامترهای مقاومت برشی صورت گرفته است. Kayadelen et al. (2009)، Kayadelen (2008) و Mousavi et al. (2011) با بهره‌گیری از شبکهٔ عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک سعی در تخمین زاویه اصطکاک خاک با استفاده از خواص فیزیکی آن داشته‌اند.

۱-۲ شرح مختصری از تحقیق حاضر

همان‌گونه که در قسمت قبل ذکر شد، با توجه به محدویت مالی و زمانی حاکم بر پروژه‌های عمرانی در اختیار داشتن روابط و مدل‌هایی جهت ارزیابی و تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از این رو در تحقیق حاضر سعی بر این مهم بوده است. بررسی مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که مشخصات تراوایی خاک، پارامترهای تراکمی و مقاومت برشی خاک را می‌توان با دقت قابل قبولی بر اساس خواص فیزیکی و اولیه خاک تخمین زد. از این‌رو در تحقیق حاضر با استفاده از بانک داده‌ای مشتمل بر ۵۹۵ نمونه روابط و مدل‌هایی جهت تخمین ضریب نفوذپذیری، حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک ارائه گردیده است. بانک دادهٔ مورد نظر شامل نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم، نفوذپذیری و سه محوری زهکشی شده می‌باشد. به منظور حصول روابط و مدل‌های مطلوب از دو روش بهره گرفته شده است.

در مرحلهٔ اول با شناسایی و انتخاب متغیرهای تأثیرگذار بر هریک از پارامترهای خروجی مورد نظر و با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی[1] روابطی ارائه گردیده است که قادر به تخمین هر یک از پارامترهای ضریب نفوذپذیری، حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه و زاویه اصطکاک داخلی خاک با سطح دقت بالایی می‌باشند. هم‌چنین به منظور بررسی هرچه بهتر عملکرد روابط به دست آمده، بر روی این روابط مطالعات پارامتریک صورت گرفته است. به منظور بررسی روند تغییرات پارامتر خروجی با هر یک از متغیرها در شرایطی که همهٔ متغیرها بجز یکی برابر با مقدار میانگین خود در نظر گرفته شده‌اند، پارامتر خروجی به ازای تغییر یک متغیر باقیمانده در محدودهٔ تغییراتش محاسبه می‌شود. این روند برای تمام متغیرها تکرار می‌شود و بدین صورت روند تغییرات پارامتر خروجی مورد نظر با متغیرهای ورودی به وضوح مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر، به منظور ارزیابی مشخصات ژئوتکنیکی مورد نظر از شبکهٔ عصبی مصنوعی استفاده شده است. در تحقیق حاضر، از شبکهٔ پرسپترون چندلایه[2] متشکل از سه لایهٔ پنهان که به ترتیب ۹، ۱۰ و ۱ نرون دارند، استفاده شده است. هم‌چنین به منظور بررسی اهمیت هر یک از متغیرهای ورودی در دقت مدل ارائه شده تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های به دست آمده از شبکهٔ عصبی صورت گرفته است. بدین منظور در هر مرحله وزن یکی از پارامترهای ورودی صفر در نظر گرفته شده است و شبکهٔ عصبی با پارامترهای ورودی باقی‌مانده آموزش داده می‌شود. مقایسهٔ مقادیر تخمین یافته در این حالت با مقادیر به دست آمده از مدل اصلی نمایانگر میزان اهمیت پارامتر حذف شده بر روی دقت مدل به دست آمده می‌باشد. بدین ترتیب اثر و اهمیت پارامتر حذف شده بر روی متغیر خروجی به وضوح مشاهده خواهد شد.

۱-۳ اهداف تحقیق حاضر

همان گونه که در بخش قبل اشاره شد، در تحقیق حاضر با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی و شبکهٔ عصبی مصنوعی روابط و مدل‌هایی جهت تخمین ضریب نفوذپذیری، حداکثر وزن مخصوص خشک، درصد رطوبت بهینه و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر اساس مشخصات دانه‌بندی و حدود اتربرگ آن ارائه شده است. در ادامه به بررسی تأثیر هریک از متغیرهای ورودی در عملکرد مدل‌های به دست آمده پرداخته شده است. در این راستا نتایج در قالب نمودارهای مختلف و به صورت زیر ارائه گردیده است:

- روند تغییرات ضریب نفوذپذیری به ازای افزایش نشانهٔ خمیری، درصد تراکم و یکنواختی اندازه ذرات خاک
- تأثیر اندازه مؤثر و متوسط ذرات، حدود اتربرگ و درصد تراکم بر روی میزان نفوذپذیری خاک

[1] Evolutionary Polynomial Regression
[2] Multilayer Perceptron

- بررسی روند تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک در برابر تغییرات درصد درشت دانه، ریزدانه و حد خمیری
- تأثیر درصد درشت دانه و ریزدانه، چگالی مخصوص و حدود اتربرگ بر حداکثر وزن مخصوص خشک
- بررسی تغییرات درصد رطوبت بهینه با درصد ریزدانه، چگالی مخصوص، حد خمیری و حداکثر وزن مخصوص خشک
- بررسی تأثیر درصد درشت دانه و ریزدانه، چگالی مخصوص و حدود اتربرگ بر مقادیر درصد رطوبت بهینه
- روند تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک در برابر تغییرات درصد ریزدانه و درشت دانه خاک و وزن مخصوص خاک
- تأثیر درصد ذرات ریزدانه و درشت دانهٔ خاک، وزن مخصوص خشک خاک و نیز سرعت برش بر روی مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک

۱-۴ معرفی فصول

در فصل اول بیان مسئله، هدف‌های کلی از انجام پایان نامه و معرفی بخش‌های مختلف پایان نامه ارائه شده است. در فصل دوم مروری بر ادبیات فنی ارائه شده است، که به تحقیقات صورت گرفتهٔ گذشته در زمینهٔ ارزیابی خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها بر اساس مشخصات فیزیکی آن پرداخته شده است. فصل سوم به معرفی بانک دادهٔ استفاده شده و هم‌چنین روش‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر می‌پردازد. در فصل چهارم جزئیات مدل‌سازی‌ها ارائه گردیده و خروجی‌ها و نتایج حاصله ارائه گردیده است. در انتها در فصل پنجم با جمع بندی موضوع و کارهای انجام گرفته، نتایج حاصل از این تحقیق ارائه گردیده و پیشنهاداتی در زمینهٔ ادامهٔ مطالعهٔ حاضر عنوان می‌گردد.

فصل دوم

مروری بر ادبیات فنی