



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 13
No. 2 (50)**

Received:
2023-07-09

Accepted:
2023-10-23

Pages: 125-133

Estimation of Soil Particle-Size Distribution Curve Based on Three Parametric Pedotransfer Functions

Hamid Reza Fooladmand¹

1) Associated Professor of Irrigation and Drainage, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
Corresponding author email: hrfoolad@yahoo.com

Abstract:

Background and Aim: The particle-size distribution (PSD) curve is one of the most important soil properties, and many models have been presented for fitting to the measured data of this curve. Also, there are some methods for estimating of this curve including its estimation using more easily available soil properties which can be called parametric pedotransfer functions. The main objective of this study was the estimation of PSD curve with some different models based on the parametric pedotransfer functions.

Method: In this study, the models of Haverkamp and Parlange (1986) with two conditions, Assouline et al. (1998), and Fredlund et al. (2000) were employed for fitting to the measured data of this curve. All mentioned models contain several parameters, and the estimation of PSD curve may be accomplished by knowing the models parameters. To do this, some equations were derived for estimating the parameters of the model of Haverkamp and Parlange (1986) in two assumptions, and the model of Assouline et al. (1998). Also, the equations for estimating Fredlund et al. (2000) model were computed from Fooladmand and Mansuri (2013). All estimated equations for the model parameters have been obtained only based on soil texture data (amounts of clay, silt, sand, geometric mean and geometric standard deviation of the particle-size diameter) which are available easily and common in measuring and computing for soil samples. For this purpose, 30 soil samples were collected from different locations in Fars Province, south of Iran to calibrate the equation, and 10 soils in this area plus 30 soils of UNSODA soil data bases were used to validate the obtained results. 40 soils in validation stage have been divided into three groups containing fine, medium and course textures. The best derived equations for estimating the parameters of the model of Haverkamp and Parlange (1986) with two assumptions, and the model of Assouline et al. (1998) were obtained by using the step by step linear regression procedure. Then, the root mean square error (RMSE), geometric mean error ratio (GMER) and geometric standard deviation of the error ratio (GSDER) have been used to evaluate the obtained results in the validation stage.

Results: The results indicated that the model of Fredlund et al. (2000) was appropriate for soils with fine and course textures, and the model of Assouline et al. (1998) was appropriate for soils with medium texture. Also, the results indicated that two conditions of the model of Haverkamp and Parlange (1986) were not appropriate for estimating the PSD curve.

Keywords: Particle-size distribution curve, Pedotransfer function, Fars province, UNSODA





شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰
شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir

iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم

شماره ۲ (۵۰)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۸/۰۱

صفحات: ۱۳۳-۱۲۵

تخمین منحنی توزیع دانه‌بندی خاک بر مبنای سه تابع انتقالی پارامتریک

حمیدرضا فولادمند^۱

(۱) دانشیار آبیاری و زهکشی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران.
ایمیل مسئول مکاتبات: hrfoolad@yahoo.com

چکیده:

زمینه و هدف: منحنی توزیع دانه‌بندی خاک از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است و مدل‌های متعددی برای برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده این منحنی ارائه شده است. همچنین روش‌هایی برای تخمین این منحنی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تخمین آن با استفاده از روش آسان‌تر ویژگی‌های خاک در دسترس با نام توابع انتقالی پارامتریک اشاره نمود. هدف اصلی از این پژوهش تخمین منحنی توزیع دانه‌بندی خاک از چند مدل مختلف بر مبنای توابع انتقالی پارامتریک می‌باشد.

روش پژوهش: در این پژوهش از مدل‌های هاورکمپ و پارلانگ در دو حالت مختلف، مدل آسولین و همکاران و مدل فردلانگ و همکاران برای برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی استفاده شد. کلیه مدل‌های ذکر شده دارای چندین پارامتر می‌باشند که با معلوم بودن آن‌ها امکان تخمین منحنی دانه‌بندی وجود دارد. برای برآورد پارامترهای مدل‌های اول و دوم روابطی تجربی ساخته شد و برای مدل سوم از روابط ارائه شده توسط فولادمند و منصور استفاده شد. کلیه روابط برآورد شده با بکارگیری داده‌های بافت خاک (مقادیر رس، سیلت، شن، میانگین هندسی ذرات خاک و انحراف معیار هندسی ذرات خاک) به دست آمدند که اندازه‌گیری و محاسبه آن‌ها برای بیشتر نمونه‌های خاک ساده و متداول است. برای انجام این پژوهش از ۳۰ نمونه خاک در استان فارس برای واسنجی روابط و از ۱۰ خاک دیگر در این منطقه به علاوه ۳۰ نمونه خاک از مجموعه خاک‌های آنسودا برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده استفاده شد. ۴۰ نمونه خاک به کار رفته در مرحله صحت‌سنجی به سه گروه بافت ریز، متوسط و درشت تقسیم شدند. مناسب‌ترین روابط استخراج شده برای تخمین پارامترهای مدل‌های هاورکمپ و پارلانگ در دو حالت مختلف و مدل آسولین و همکاران از روش رگرسیون گام به گام تعیین شدند. برای ارزیابی نتایج از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین هندسی نسبت خطا و انحراف معیار هندسی نسبت خطا استفاده شدند.

نتایج: نتایج نشان داد که مدل فردلانگ و همکاران برای خاک‌های با بافت ریز و درشت و مدل آسولین و همکاران برای خاک‌های با بافت متوسط مناسب می‌باشند. همچنین نتایج نشان داد که دو حالت مدل هاورکمپ و پارلانگ برای تخمین منحنی دانه‌بندی مناسب نیستند.

واژه‌های کلیدی: منحنی دانه‌بندی، توابع انتقالی، استان فارس، آنسودا



مقدمه

منحنی دانه‌بندی خاک نشان‌دهنده رابطه بین قطر ذرات خاک و درصد ذرات کوچک‌تر از هر قطر است و در بسیاری از مسایل مربوط به خاک کاربرد دارد. از جمله روش‌های مستقیم اندازه‌گیری این منحنی در آزمایشگاه استفاده از روش ترکیب شستشوی خاک با الک و هیدرومتر است که تا حدودی وقت‌گیر می‌باشد. پس از اندازه‌گیری این منحنی در آزمایشگاه لازم است که از معادله‌ای مناسب برای برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده نمود، از این‌رو تاکنون روش‌های متعددی برای برازش یک رابطه ریاضی مناسب بر داده‌های اندازه‌گیری شده این منحنی ارائه شده است. همچنین روش‌هایی نیز برای تخمین این منحنی وجود دارد. از آنجا که در بسیاری از خاک‌ها تنها اطلاعات مربوط به درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک موجود است لذا تخمین کل منحنی دانه‌بندی خاک از روی اطلاعات بافت خاک مورد توجه محققین قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به مدل اسکگز و همکاران (۲۰۰۱) اشاره نمود که توسط فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) بهبود یافته است و در پژوهش‌های دیگری مانند پژوهش‌های موسوی و همکاران (۲۰۱۲)، بیگی هرچگانی و استواری (۲۰۱۳) و ماهادول و همکاران (۲۰۲۳) نیز به کار رفته است.

از جمله روش‌های دیگر تخمین منحنی دانه‌بندی می‌توان به توابع انتقالی اشاره نمود. منظور از توابع انتقالی آن است که بتوان از ویژگی‌های زودبافت خاک مانند اطلاعات بافت خاک به ویژگی‌های دیربافت خاک مانند منحنی مشخصه آب خاک و یا منحنی دانه‌بندی دست یافت. توابع انتقالی منحنی دانه‌بندی به صورت پارامتریک می‌باشند. در این توابع از یک رابطه ریاضی برای برازش منحنی دانه‌بندی استفاده می‌شود که دارای تعدادی پارامتر می‌باشد. سپس با استفاده از این توابع پارامترهای به کار رفته در مدل مورد نظر برآورد می‌گردد. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به توابع به دست آمده توسط فولادمند و منصوری (۲۰۱۳) برای مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) اشاره نمود.

هدف اصلی از این پژوهش تخمین منحنی دانه‌بندی خاک با استفاده از چند تابع انتقالی پارامتریک برای تعدادی از نمونه‌های خاک تهیه شده در استان فارس و تعدادی از خاک‌های بانک اطلاعاتی آنسودا می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ۴۰ نمونه خاک سطحی از مناطق زرقان، بیضاء، استهبان، آباد، مرودشت و فسا در استان فارس تهیه شد و موقعیت جغرافیایی طولی و عرضی هر نمونه خاک با استفاده از دستگاه GPS بر مبنای سیستم UTM تعیین

گردید. منحنی دانه‌بندی هر خاک در آزمایشگاه از روش ترکیبی شستشوی خاک با الک و هیدرومتر اندازه‌گیری و سپس بر مبنای سیستم طبقه‌بندی آمریکایی ذرات خاک مقادیر رس، سیلت و شن هر خاک تعیین شد. در آزمایش شستشوی خاک با الک مقدار ۱۵۰۰ گرم از خاک مورد نظر به تدریج بر روی الک شماره ۲۰۰ (به قطر ۰/۰۷۴ میلی‌متر) ریخته شده و در زیر شیر آب به آرامی شستشو داده می‌شود. در این صورت کلیه ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۰۷۴ میلی‌متر شسته می‌شوند و ذرات با قطر بزرگ‌تر از ۰/۰۷۴ میلی‌متر بر روی الک باقی می‌مانند. در این حالت آب خارج شده از الک کاملاً صاف و زلال بوده و دیگر حالت گل‌آلود نخواهد داشت. سپس خاک خیس باقی‌مانده بر روی الک به یک ظرف منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت در درون آن (گرمخانه) قرار داده می‌شود تا کاملاً خشک شود. در ادامه خاک خشک شده بر روی الک‌های مورد نظر قرار داده می‌شود تا مقدار خاک باقی‌مانده بر روی هر الک تعیین گردد. در این پژوهش از الک‌های شماره ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به ترتیب با قطرهای ۲، ۰/۸۵، ۰/۴۲۵، ۰/۳، ۰/۲۱۲، ۰/۱۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر استفاده شد و برای آزمایش هیدرومتر نیز قرائت‌ها در زمان‌های ۰/۵، ۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۵۰ و ۱۴۴۰ دقیقه انجام شد. از بین نمونه‌های خاک ۳۰ نمونه برای واسنجی توابع انتخاب شدند و ۱۰ نمونه دیگر به اضافه ۳۰ نمونه خاک از مجموعه خاک‌های آنسودا (Leij et al., 1996) برای ارزیابی نتایج به کار رفتند. ۴۰ نمونه خاک بکار رفته در مرحله ارزیابی به سه گروه بافت ریز (شامل بافت‌های رس، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی)، بافت متوسط (شامل بافت‌های لوم، سیلت لوم و لوم رسی) و بافت درشت (شامل بافت‌های شن لومی و لوم شنی) تقسیم شدند. لازم به ذکر است که فولادمند و هادی‌پور (۲۰۱۲) و فولادمند و گلکار (۲۰۱۸) نیز بافت‌های مختلف خاک را به صورت ذکر شده به سه گروه ریز، متوسط و درشت تقسیم‌بندی نموده‌اند. همچنین با استفاده از نرم‌افزار ایزی‌فیت از بین شناخته‌شده‌ترین توزیع‌های آماری شامل نرمال، لوگ‌نرمال، پیرسون و لوگ‌پیرسون، بهترین توزیع آماری برازش یافته بر داده‌های رس، سیلت و شن در مرحله واسنجی و هر یک از گروه‌های بافتی در مرحله ارزیابی نیز تعیین شدند. اطلاعات جغرافیایی و بافتی خاک‌های استان فارس در جدول ۱ و اطلاعات بافتی خاک‌های آنسودا در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در جدول ۱ خاک‌هایی که برای مرحله ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند نیز مشخص شده‌اند. در جدول‌های ۳ و ۴ نیز اطلاعات آماری خلاصه شده خاک‌های استفاده شده در مراحل واسنجی و ارزیابی آورده شده‌اند. چنانچه در جدول‌های ۳ و ۴ نیز مشاهده می‌شود توزیع‌های آماری متفاوتی بر داده‌های اولیه رس، سیلت و شن خاک برازش یافته‌اند.

جدول ۱. اطلاعات جغرافیایی و بافتی ۴۰ نمونه خاک استان فارس

منطقه	محل برداشت نمونه	مختصات طولی	مختصات عرضی	بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن
زرقان	لپویی	۶۵۸۵۴۳	۳۲۹۸۵۲۳	لوم	۱۰	۴۹	۴۱
زرقان	لپویی	۶۵۸۰۵۴	۳۲۹۸۶۵۶	لوم	۱۴	۴۷	۳۹
زرقان	لپویی	۶۵۲۹۹۶	۳۲۹۹۸۸۱	لوم	۱۵	۴۲	۴۳
بیضاء	روستای چاه سرخ	۶۵۵۹۴۵	۳۳۰۰۵۲۷	لوم سیلتی	۱۳	۵۲	۳۵
بیضاء	روستای چاه سرخ	۶۵۵۸۰۴	۳۳۰۰۶۷۹	لوم سیلتی	۱۵	۵۴	۳۱
بیضاء	روستای چاه سرخ	۶۵۲۶۳۹	۳۳۰۲۳۳۰	لوم	۱۳	۴۹	۳۸
بیضاء	روستای چاه سرخ	۶۵۵۳۶۴	۳۳۰۰۳۳۸	لوم	۹	۴۰	۵۱
استهبان	رونیز	۷۵۸۵۹۵	۴۲۲۹۴۹۰	لوم شنی	۶	۴۰	۵۴
استهبان	رونیز	۷۶۵۲۲۳	۳۲۳۱۲۱۳	لوم سیلتی	۱۳	۵۶	۳۱
استهبان	ابتدای جاده خیر	۷۷۷۹۶۳	۳۲۳۳۵۷۷	شن لومی	۱	۲۴	۷۵
آباده	مزرعه ۳۰۰۰	۶۶۹۶۹۴	۳۴۳۳۳۰۲	لوم شنی	۹	۳۴	۵۷
آباده*	روستای دغ بالا	۶۷۹۶۹۳	۳۴۳۵۳۴۰	لوم شنی	۸	۳۳	۵۹
آباده	روستای نجفآباد	۶۶۴۷۵۳	۳۴۳۶۸۴۲	لوم سیلتی	۱۲	۵۰	۳۸
آباده*	دشت نجفآباد	۶۲۹۴۵۸	۳۴۴۶۶۲۱	لوم	۱۳	۴۱	۴۶
آباده*	آران	۶۰۶۳۲۸	۳۴۴۴۰۰۰	لوم	۱۳	۴۲	۴۵
آباده*	حشمتیه	۶۵۲۹۶۴	۳۴۴۸۴۲۹	لوم شنی	۷	۴۰	۵۳
آباده	گرم‌شیخی	۶۱۰۳۶۹	۳۴۱۷۴۶۹	لوم سیلتی	۲۸	۵۴	۱۸
آباده	مزرعه تخت‌چمن	۵۹۴۰۵۸	۳۴۱۶۱۸۲	لوم رسی سیلتی	۳۲	۵۷	۱۱
آباده*	مزرعه آب‌سیاه	۵۹۹۳۵۳	۳۴۱۷۵۲۸	لوم رسی سیلتی	۳۲	۵۰	۱۸
آباده	مزرعه ساریاتان	۶۱۳۲۸۲	۳۴۳۲۹۷۵	لوم سیلتی	۱۸	۶۱	۲۱
مرودشت*	روستای کوه سبز	۶۶۴۵۴۷	۳۳۱۱۳۲۷	رس سیلتی	۴۲	۵۰	۸
مرودشت	مجتمع گوشت	۶۶۰۷۶۷	۳۳۱۸۷۳۵	لوم سیلتی	۲۶	۵۶	۱۸
مرودشت	روستای شرکت خارا	۶۵۶۵۶۱	۳۳۱۹۴۷۴	رس سیلتی	۴۶	۵۰	۴
مرودشت	روستای زرگران	۶۵۵۰۲۵	۳۳۲۴۱۶۱	لوم رسی سیلتی	۳۰	۶۲	۸
مرودشت	تخت‌جمشید	۶۸۱۲۸۷	۳۳۱۳۴۰۲	لوم رسی سیلتی	۳۲	۵۶	۱۲
مرودشت*	روستای فیروزی	۶۷۷۳۸۰	۳۳۱۲۱۹۱	لوم رسی سیلتی	۲۸	۶۲	۱۰
مرودشت	کمربندی نزدیک راه‌آهن	۶۷۶۴۲۴	۳۳۱۳۰۳۴	لوم رسی سیلتی	۳۹	۵۳	۸
مرودشت	دانشگاه آزاد	۶۷۷۵۴۸	۳۳۱۰۹۲۲	لوم رسی سیلتی	۳۴	۶۰	۶
فسا*	روستای کوهگر	۶۸۳۰۷۲	۳۱۷۴۰۱۹	شن لومی	۴	۱۶	۸۰
فسا	روستای کوهگر	۶۸۲۶۶۰	۳۱۷۴۳۳۱	لوم شنی	۷	۳۰	۶۳
فسا	بیدزد	۷۸۴۴۰۰	۳۱۷۵۹۹۹	لوم شنی	۹	۲۸	۶۳
فسا	بیدزد	۷۸۶۴۵۴	۳۱۷۶۴۵۲	شن لومی	۴	۱۷	۷۹
فسا*	روستای نصیرآباد	۷۸۱۲۸۹	۳۱۷۲۸۳۶	لوم سیلتی	۱۲	۵۲	۳۶
فسا	روستای نصیرآباد	۷۸۲۰۴۶	۳۱۷۲۸۷۱	شن لومی	۶	۱۸	۷۶
فسا	امام زاده پیرعبدالله	۷۶۶۴۷۰	۲۲۰۰۴۹۲	لوم	۲۶	۵۰	۲۴
فسا	امام زاده پیرعبدالله	۷۶۵۳۴۳	۲۲۰۰۹۴۱	لوم سیلتی	۲۴	۵۶	۲۰
فسا	امام زاده پیرعبدالله	۷۶۴۹۹۰	۲۲۰۰۶۰۱	لوم رسی سیلتی	۳۰	۵۸	۱۲
فسا*	روستای جیلان	۷۸۱۱۶۸	۳۱۹۶۸۳۲	لوم رسی سیلتی	۲۸	۵۴	۱۸
فسا	روستای جیلان	۷۸۰۵۵۹	۳۲۶۶۴۰۸	لوم رسی سیلتی	۳۴	۵۴	۱۲
فسا	ده‌شیب	۷۷۹۰۲۶	۳۲۱۶۲۲۱	لوم سیلتی	۲۷	۵۵	۱۸

استفاده شده در مرحله ارزیابی

جدول ۲. اطلاعات خاک‌های استفاده شده آنسودا در مرحله ارزیابی

بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن
رس	۵۸	۳۸	۴	لوم	۲۶	۲۸	۴۶
رس	۴۵	۳۴	۲۱	لوم	۲۱	۵۰	۲۹
رس	۵۷	۳۹	۴	توم	۲۴	۳۷	۳۹
رس	۴۹	۳۴	۱۷	لوم سیلتی	۲۲	۵۷	۲۱
رس	۵۴	۳۶	۱۰	لوم سیلتی	۲۷	۵۰	۲۳
رس	۵۱	۳۷	۱۲	لوم سیلتی	۱۱	۵۳	۳۶
رس	۴۷	۳۹	۱۴	لوم رسی	۳۵	۴۴	۲۱
رس	۵۴	۳۴	۱۲	لوم رسی	۳۶	۳۶	۲۸
رس سیلتی	۵۳	۴۰	۷	لوم رسی	۳۲	۳۴	۳۴
لوم	۲۴	۳۶	۴۰	لوم شنی	۱۸	۲۷	۵۵
لوم	۲۳	۳۲	۴۵	لوم شنی	۳۲	۳۳	۳۵
لوم	۱۶	۴۳	۴۱	لوم شنی	۸	۳۰	۶۲
لوم	۱۶	۴۰	۴۴	لوم شنی	۱۱	۲۸	۶۱
لوم	۱۶	۴۲	۴۲	لوم شنی	۱۹	۲۸	۵۳
لوم	۱۸	۴۲	۴۰	لوم شنی	۱۱	۲۵	۶۴

جدول ۳. اطلاعات آماری ۳۰ نمونه خاک به کار رفته در مرحله واسنجی

ذرات خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	میان	انحراف معیار	بهترین توزیع آماری
رس	۱/۲	۴۶/۰	۱۹/۴	۱۵/۰	۱۱/۷	لوگ پیرسون
سیلت	۱۷/۰	۶۲/۰	۴۷/۰	۵۱/۰	۱۲/۷	لوگ پیرسون
شن	۴/۰	۷۹/۰	۳۳/۵	۳۱/۰	۲۲/۶	لوگ پیرسون

جدول ۴. اطلاعات آماری ۴۰ نمونه خاک به کار رفته در مرحله ارزیابی

گروه بافتی	تعداد نمونه‌های خاک	ذرات خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	میان	انحراف معیار	بهترین توزیع آماری
ریز	۱۸	رس	۲۸/۰	۵۸/۰	۴۶/۱	۴۰/۵	۱۰/۶	لوگ پیرسون
		سیلت	۳۴/۰	۶۲/۰	۴۲/۱	۳۹/۰	۸/۹	پیرسون
		شن	۳/۵	۲۰/۵	۱۱/۸	۱۷/۵	۵/۳	پیرسون
متوسط	۱۳	رس	۱۱/۰	۳۶/۰	۲۱/۴	۱۸/۰	۷/۷	لوگ پیرسون
		سیلت	۲۸/۱	۵۶/۶	۴۲/۲	۴۲/۰	۷/۷	پیرسون
		شن	۲۱/۳	۴۶/۳	۳۶/۵	۴۱/۰	۸/۵	نرمال
درشت	۹	رس	۴/۰	۱۸/۶	۱۱/۱	۱۱/۰	۵/۱	لوگ پیرسون
		سیلت	۱۶/۰	۴۰/۲	۲۸/۱	۲۸/۰	۶/۵	نرمال
		شن	۵۲/۵	۸۰/۰	۶۰/۸	۵۹/۰	۸/۳	نرمال

در این پژوهش از سه مدل مختلف زیر برای برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی استفاده شد:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad (3)$$

بر مبنای رابطه‌های ۲ و ۳ در ادامه متن مدل فوق با علامت‌های HP1 و HP2 نشان داده شده‌اند.

ب) مدل آسولین و همکاران (۱۹۹۸): این مدل به صورت زیر می‌باشد:

$$P(d) = c + (1-c)[1 - \exp(-ad^b)] \quad (4)$$

الف) مدل هاورکمپ و پارلانگ (۱۹۸۶): این مدل که برگرفته از مدل ونگنوختن (۱۹۸۰) برای منحنی مشخصه آب خاک است، به صورت زیر است:

$$P(d) = \left[1 + \left(\frac{d_a}{d} \right)^n \right]^{-m} \quad (1)$$

که در آن $P(d)$ مقدار کوچک‌تر از هر قطر ذره خاک بر حسب گرم بر گرم، d قطر ذره خاک بر حسب میلی‌متر و d_a و m

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_i - E_i)^2}{N}} \quad (11)$$

$$x_i = \frac{E_i}{M_i} \quad (12)$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{N} \sum \ln(x_i)\right) \quad (13)$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{N-1} \sum [\ln(x_i) - \ln(GMER)]^2\right)^{0.5}\right] \quad (14)$$

که در آن‌ها x_i نسبت خطا، E_i و M_i به ترتیب مقادیر تخمین‌زده شده و اندازه‌گیری شده $P(d)$ و N تعداد قسمت‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی در هر نمونه خاک می‌باشد. هر چه $RMSE$ به صفر نزدیک‌تر باشد، اختلاف بین مقادیر تخمین‌زده شده و اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مناسب‌تر است. اگر $GMER$ برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین‌زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند. در صورتی که $GMER$ کمتر از یک شود مقادیر تخمین‌زده شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند و چنانچه $GMER$ بیشتر از یک شود مقادیر تخمین‌زده شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. همچنین چنانچه $GSDER$ برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین‌زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند و افزایش $GSDER$ نسبت به یک بیانگر افزایش فاصله بین مقادیر تخمین‌زده شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین شرایط آن است که مقادیر $GMER$ و $GSDER$ نزدیک به یک باشند (Tietje and Hennings, 1996).

نتایج و بحث

روابط به دست آمده در این پژوهش برای تخمین پارامترهای مدل‌های HP1، HP2 و A و همچنین روابط گزارش شده توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) برای مدل F به صورت زیر می‌باشند:

مدل HP1

$$d_a = 0.0021d_g + 0.00015Clay + 0.0017Sand \quad (15)$$

$$n = 10.837d_g + 0.04Clay \quad (16)$$

مدل HP2

$$d_a = 0.0046d_g + 0.0021Sand \quad (17)$$

$$n = 0.0506Clay + 0.0516Sand \quad (18)$$

مدل A

$$a = -2103.83d_g + 14.46Sand \quad (19)$$

$$b = -3.68d_g + 0.043Sand + 0.0152Clay \quad (20)$$

$$c = 0.96d_g + 0.024d_g + 0.0048Clay - 0.0055Sand \quad (21)$$

که در آن a ، b و c ضرایب معادله می‌باشند و D نیز بر مبنای قطر ذرات خاک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D = \frac{d - 0.002}{2 - 0.002} \quad (5)$$

$P(d)$ و d نیز مشابه توضیحات ذکر شده قبلی می‌باشند. این مدل در ادامه با علامت A نشان داده شده است.

ج- مدل فردلانند و همکاران (۲۰۰۰): این مدل به صورت زیر می‌باشد:

$$P(d) = \frac{1}{\left\{ \text{Ln} \left[\exp(1) + \left(\frac{q}{d} \right)^s \right] \right\}^r} \left\{ 1 - \left[\frac{\text{Ln} \left(1 + \frac{d_r}{d} \right)}{\text{Ln} \left(1 + \frac{d_r}{d_m} \right)} \right]^7 \right\} \quad (6)$$

که در آن $P(d)$ و d نیز مشابه توضیحات ذکر شده قبلی می‌باشند و s ، r ، q ، d_r ضرایب معادله هستند و مقدار d_m نیز برابر 0.001 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. این مدل در ادامه با علامت F نشان داده شده است.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS روابطی به صورت رگرسیون خطی چند متغیره با استفاده از روش رگرسیون گیری گام به گام برای تخمین پارامترهای مدل‌های HP1، HP2 و A ارائه شد. برای این منظور متغیرهای مختلف وارد معادله شده و به ترتیب متغیرهای دارای سطح معنی‌داری بیشتر (دارای اهمیت کمتر) از معادله رگرسیونی حذف می‌شوند. همچنین فولادمند و منصور (۲۰۱۳) با استفاده از ۳۰ نمونه خاک ذکر شده در این پژوهش در مرحله واسنجی در پژوهش خود روابطی رگرسیونی برای تخمین پارامترهای مدل F به دست آورده‌اند که از روابط فوق در پژوهش فعلی استفاده شده است. در روابط بکار رفته در این پژوهش جدا از درصد ذرات رس، سیلت و شن از مقادیر میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک نیز استفاده شده است که از روابط شیرازی و بورزما (۱۹۸۴) به دست می‌آیند:

$$k = 0.01(f_c \text{Ln}0.001 + f_{s1} \text{Ln}0.026 + f_{sa} \text{Ln}1.025) \quad (7)$$

$$d_g = \exp(k) \quad (8)$$

$$t^2 = 0.01 \{ f_c (\text{Ln}0.001)^2 + f_{s1} (\text{Ln}0.026)^2 + f_{sa} (\text{Ln}1.025)^2 \} - k^2 \quad (9)$$

$$\delta_g = \exp(t) \quad (10)$$

که در آن d_g و δ_g به ترتیب میانگین و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات خاک بر حسب میلی‌متر و f_c ، f_{s1} و f_{sa} به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک می‌باشند.

برای ارزیابی نتایج به دست آمده در این پژوهش از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) به صورت روابط زیر استفاده شدند (Tietje and Hennings, 1996):

مدل F

$$q = 0.18612 + 0.00088\text{Clay} - 0.00265\text{Silt} + 0.00393\phi_g \quad (22)$$

$$r = 0.52961 + 0.01728\text{Sand} - 1.63977d_g - 0.04897\phi_g \quad (23)$$

$$s = 3.72\exp(-0.03\text{Clay}) \quad (24)$$

که در آن‌ها Clay، Silt و Sand به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک می‌باشند و d_g و ϕ_g قبلاً تعریف شده‌اند. همچنین مقدار d_r مدل F توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) برابر مقدار ثابت ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب R^2 روابط ۱۵ تا ۲۱ نیز به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۸۷، ۰/۸۸، ۰/۷۲، ۰/۹۷ و ۰/۹۷ می‌باشند که نشان‌دهنده دقت مناسب برآورد پارامترهای مدل‌های به کار رفته در این پژوهش می‌باشد. همچنین مقدار ضریب R^2 روابط ۲۲ تا ۲۴ که توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) به دست آمده‌اند به ترتیب برابر ۰/۶۳، ۰/۸۱ و ۰/۶۳ می‌باشند.

در ادامه با استفاده از روابط به دست آمده در این پژوهش برای مدل‌های HP1، HP2 و A و همچنین روابط گزارش شده توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) برای مدل F، منحنی دانه‌بندی برای ۴۰ نمونه خاک مرحله ارزیابی تخمین زده شد و نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. مقادیر میانگین آماره‌های RMSE، GMER و GSDER در مرحله ارزیابی نتایج برای سه گروه بافتی به کار رفته در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود مدل F با توجه به مقادیر RMSE و GSDER برای بافت‌های ریز و درشت مناسب‌تر از سه مدل دیگر است و با توجه به مقدار GMER در این دو گروه بافتی نتایج منجر به تخمین بیشتر منحنی دانه‌بندی شده است، به عبارتی دیگر منحنی‌های دانه‌بندی تخمین‌زده‌شده در قطره‌های یکسان منجر به مقادیر بیشتر درصد ذرات کوچک‌تر از هر قطر شده‌اند. لذا نتایج بیانگر آن است که انتخاب مقدار ثابت ۱۰۰۰ برای پارامتر

d_r این مدل که توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) پیشنهاد شده است، برای گروه‌های بافتی ریز و درشت مناسب می‌باشد. همچنین مناسب بودن مدل F برای بافت‌های رس سیلتی و لوم رسی سیلتی توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) و برای بافت‌های رس سیلتی، لوم رسی سیلتی و لوم شنی توسط نبی‌زاده و بیگی هرچگانی (۲۰۱۱) گزارش شده است که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد.

از طرف دیگر نتایج جدول ۵ بیانگر آن است که مدل A با توجه به مقادیر RMSE و GSDER برای گروه بافتی متوسط مناسب‌تر از سه مدل دیگر است و با توجه به مقدار GMER در این گروه بافتی نتایج منجر به تخمین بیشتر منحنی دانه‌بندی شده است، هرچند که میانگین مقدار GMER در این گروه بافتی به یک بسیار نزدیک است.

در شکل‌های ۱ تا ۳ نیز منحنی دانه‌بندی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط مدل مناسب برای یک نمونه خاک از هر یک از سه گروه بافتی به کار رفته در این پژوهش ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از چهار مدل پارامتریک برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شد و از خاک‌های متفاوت برای واسنجی پارامترهای مدل‌ها و ارزیابی نتایج به دست آمده استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای به دست آمده مدل فردلاند (۲۰۰۰) توسط فولادمند و منصور (۲۰۱۳) برای خاک‌های با بافت ریز و درشت مناسب می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که پارامترهای به دست آمده مدل آسولین و همکاران (۱۹۹۸) برای خاک‌های با بافت متوسط مناسب است. از طرف دیگر نتایج نشان داد که دو حالت مختلف مدل هاورکمپ و پارلانگ (۱۹۸۶) برای تخمین منحنی دانه‌بندی مناسب نیستند.

جدول ۵. مقدار میانگین آماره‌های استفاده شده در گروه‌های مختلف بافتی با استفاده از مدل‌های مختلف

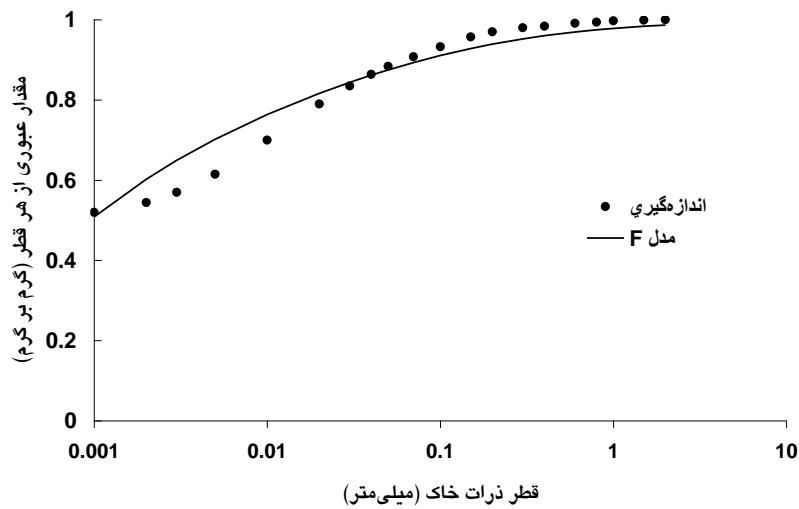
مدل / گروه بافتی	GMER		GSDER		RMSE	
	متوسط	درشت	ریز	متوسط	درشت	متوسط
HP1*	۱/۰۷۲	۰/۵۶۱	۲/۶۰۳	۱/۴۱۰	۳/۰۶۵	۰/۱۱۷
HP2**	۰/۵۱۲	۰/۲۵۰	۳/۴۷۳	۳/۵۴۵	۸/۱۴۰	۰/۱۸۱
A***	۰/۹۸۳	۱/۰۷۰	۱/۱۲۲	۱/۱۳۹	۱/۳۹۳	۰/۱۱۵
F****	۱/۰۴۵	۱/۱۷۷	۱/۱۰۴	۱/۲۰۸	۱/۱۵۸	۰/۰۸۱

* مدل هاورکمپ و پارلانگ (۱۹۸۶) بر مبنای رابطه ۲

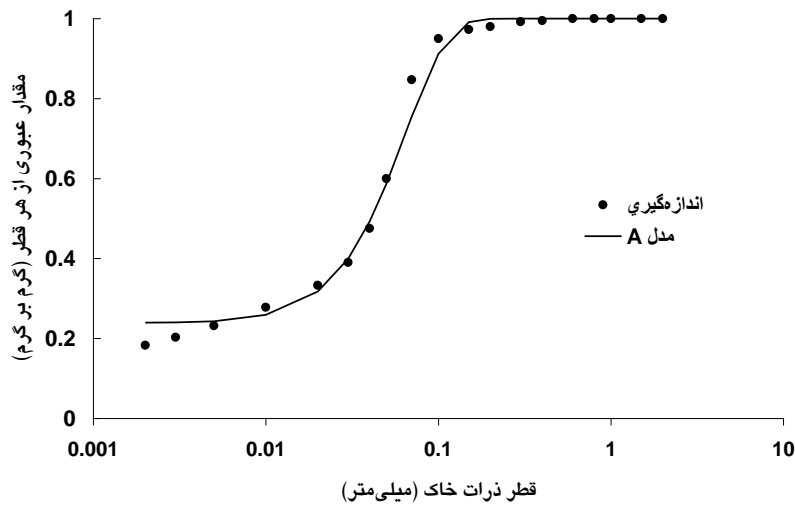
** مدل هاورکمپ و پارلانگ (۱۹۸۶) بر مبنای رابطه ۳

*** مدل آسولین و همکاران (۱۹۹۸)

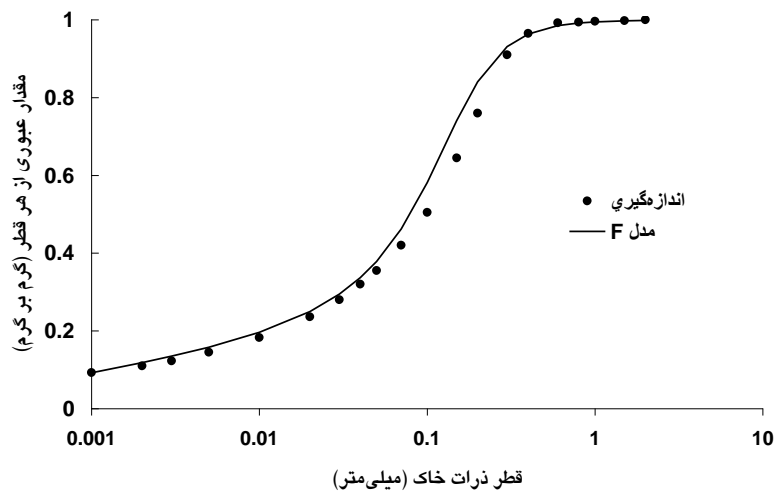
**** مدل فردلاند و همکاران (۲۰۰۰)



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از مدل فردلانند و همکاران (۲۰۰۰) در یک نمونه خاک با بافت ریز



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از مدل آسولین و همکاران (۱۹۹۸) در یک نمونه خاک با بافت متوسط



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با استفاده از مدل فردلانند و همکاران (۲۰۰۰) در یک نمونه خاک با بافت درشت

Reference:

- Assouline, S., Tessier, D., & Bruand, A. (1998). A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*. 34: 223-231.
- Beigi Harchegani, H., & Ostovari, Y. (2013). Evaluation and comparison of Grey GM (1,1) and Skaggs models in estimating particle size distribution of soils in the Shahrekord plain. *Journal of Water and Soil*. 26(6): 1318-1328. (In Persian)
- Fooladmand, H. R. & Sepaskhah, A. R. (2006). Improved estimation of the soil particle-size distribution from textural data. *Biosystem Engineering*. 94: 133-138.
- Fooladmand, H. R. & Hadipour, S. (2012). Evaluation of parametric pedotransfer functions for estimating soil water characteristic curve in Fars province. *Journal of Water and Soil Science*. 15(4) : 25-37. (In Persian)
- Fooladmand, H. R., & Mansuri, M. (2013). Comparison of two models for estimating soil particle-size distribution curve based on soil textural data. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 59: 83-92.
- Fooladmand, H. R. & Golkar, P. (2018). Fitting different models of soil-moisture characteristic curve on 30 soil samples in Fars province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 25(1) : 319-326. (In Persian)
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., & Wilson, G. W. (2000). An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*. 37: 817-827.
- Haverkamp, R., & Parlange, J. Y. (1986). Predicting the water retention curve from particle-size distribution: I. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*. 142: 325-339.
- Leij, F. J., Alves, W. J., van Genuchten, M. Th., & Williams, J. R. (1996). The UNSODA unsaturated soil hydraulic database user's manual. Version 1.0. Tech. Rep. EPA/600/R-96/095. U.S. EPA, Cincinnati, OH.
- Mahadule, P. A., Ranshur, N. J., & Patil, M. R. (2023). Particle size distribution models fitting in silty clay and silty clay loam textures soils of Pune district. *The Pharma Innovation Journal*. 12(6): 99-102.
- Moosavi, A. A., Mansoorinasab, H., & Mostafavi, M. (2012). Modified Skaggs model for prediction of soil particle-size distribution from limited textural data. *International Journal of Agricultural Research and Review*. 2(4): 373-380.
- Nabizadeh, E., & Beigi Harchegani, H. (2011). Performance of eight mathematical models in describing particle size distribution of some soils from Charmahal-va-Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil Science*. 57: 63-75. (In Persian)
- Shirazi, M. A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 142-147.
- Skaggs, T. H., Arya, L. M., Shouse, P. J., & Mohanty, B.P. (2001). Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 1038-1044.
- Tietje, O., & Hennings, V. (1996). Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*. 69: 71-84.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 892-898.