

# ارزیابی منحنی مشخصه آب و خاک بر اساس تئوری تخلخل موضعی

غلامرضا رخشنده‌رو<sup>۱</sup>

عباس اسلامی حقیقت<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۶/۱/۱۶ پذیرش ۸۶/۱۲/۴)

## چکیده

مدل‌سازی محدوده غیر اشباع خاک و به طور مشخص تعیین منحنی مشخصه آب-خاک نقشی اساسی در مکانیک خاکهای غیر اشباع ایفا می‌کند. این منحنی به عوامل متعددی از جمله اندازه و منحنی دانه‌بندی ذرات بستگی دارد. یک روند محاسباتی قابل قبول در ارزیابی منحنی مشخصه آب-خاک، مدل‌سازی منحنی توزیع حفرات خاک بر اساس منحنی دانه‌بندی می‌باشد. در این مقاله، یک مدل برای در نظر گرفتن تخلخل موضعی متغیر در خاکهای دانه‌ای ریز با منحنی‌های مختلف دانه‌بندی ارائه گردیده و تأثیر آن در ارزیابی منحنی مشخصه آب-خاک بررسی شده است. مقایسه نتایج مدل حاضر با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل ارائه شده، و به طور خاص وابستگی مستقیم تخلخل موضعی با اندازه ذرات در خاکهای دانه‌ای ریز، پیش‌بینی دقیق‌تر منحنی مشخصه آب-خاک از طریق منحنی دانه‌بندی آن را امکان‌پذیر می‌سازد.

**واژه‌های کلیدی:** محدوده غیر اشباع، تخلخل موضعی، منحنی دانه‌بندی، منحنی مشخصه آب-خاک.

## Evaluating Soil-Water Characteristic Curve Based on Local Porosity Theory

Golamreza Rakhshandehroo<sup>1</sup>

Abbas Eslami Haghghat<sup>2</sup>

(Received Apr. 5, 2007 Accepted Feb. 23, 2008)

### Abstract

Modeling vadose zone, particularly the soil water characteristic curve, plays an essential role in unsaturated soil mechanics. This curve depends on such factors as particle size and distribution. A computational procedure acceptable for the assessment of the soil-water characteristic curve is modeling pore size distribution from particle size distribution. In this paper, a model is proposed that considers the variation in local void ratio and evaluates its effect on the soil-water characteristic curve in granular soils with different particle size distributions. Comparison of the results with experimental data shows that the model will predict the soil-water characteristic curve more accurately if a direct relation is established between local void ratio and particle size.

**Keywords:** Vadose Zone, Local Void Ratio, Particle Size Distribution (PSD), Soil Water Characteristic Curve (SWCC).

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shiraz University, rakhshan@shirazu.ac.ir

2. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shiraz University

۱- دانشیار دانشکده مهندسی، بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز، rakhshan@shirazu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

میزان آب موجود در محیط غیر اشباع خاک، نسبت معکوس با مکش موجود در آن ناحیه دارد که بر اساس منحنی مشخصه آب- خاک<sup>۱</sup> بیان می‌شود. این منحنی، میزان آب موجود در حفرات خاک را در مکشهای وارده به نمونه خاک، مشخص می‌سازد. با داشتن منحنی SWCC تا حد زیادی می‌توان نفوذپذیری و رفتار خاک در برابر عبور سیال و همچنین میزان پخش آلودگی در آن را- در صورتی که توده خاک در مجاورت منشأ آلودگی قرار داشته باشد- تعیین کرد. این منحنی همچنین رفتار خاک غیر اشباع در بارگذاریهای مختلف و فرایندهای تر شدگی و خشک شدگی که می‌تواند منجر به فرو ریزش<sup>۲</sup> توده خاک گردد را پیش‌بینی می‌کند. اندازه‌گیری SWCC در آزمایشگاه به وسایلی نظیر مکش سنج و یا صفحه فشار نیازمند است که کار کردن با آنها علاوه بر تجربه فنی، نیازمند صرف وقت و هزینه قابل توجهی می‌باشد.

منحنی مشخصه به نوبه خود به اندازه حفرات خاک و نحوه توزیع این حفرات در توده خاک، وابسته است [۱]. اندازه حفرات خاک و توزیع آنها، مشخصه پیچیده و در عین حال مهمی از خاک است که حتی در خاکهای متراکم شده‌ای که دارای یک دانه‌بندی می‌باشند نیز می‌تواند متفاوت باشد. متأسفانه توزیع اندازه حفرات<sup>۳</sup> در یک توده خاک متراکم شده، به راحتی قابل اندازه‌گیری نیست. روشهای آزمایشگاهی برای به دست آوردن منحنی توزیع حفرات در خاکهای دانه‌ای نیز مستلزم داشتن تجربه و امکانات متعددی مانند دستگاه تزریق جیوه می‌باشد. به هر حال، در صورت مشخص شدن منحنی توزیع حفرات، دستیابی به منحنی SWCC از طریق مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی، امکان‌پذیر می‌باشد [۲-۶].

در سالهای اخیر تلاشهای گسترده‌ای برای به دست آوردن توزیع حفرات و منحنی SWCC از پارامترهای ملموس تر خاک صورت گرفته است [۷]. از جمله این روشها، دستیابی به منحنی توزیع حفرات از روی منحنی دانه‌بندی<sup>۴</sup> (PSD) و تخلخل خاک می‌باشد [۲-۵]. در همین راستا از تکنیک‌هایی نظیر شبکه عصبی، برای پیش‌بینی منحنی SWCC نیز استفاده شده است [۸]. به عنوان نمونه فردلانده<sup>۵</sup> و همکارانش بر اساس بانک داده‌های آزمایشگاهی موجود در این زمینه، منحنی SWCC را از روی PSD پیش‌بینی کردند [۶]. قابل ذکر است که به علت سهولت اندازه‌گیری منحنی PSD، این منحنی برای به دست آوردن سایر پارامترهای خاک از جمله

نفوذپذیری نسبت به مکش نیز به کار برده شده است [۹-۱۲]. منحنی SWCC، علاوه بر تخلخل خاک به نحوه توزیع آن در توده خاک نیز بستگی دارد. از جمله محدودیتهای موجود در مدل‌سازی‌های صورت گرفته برای به دست آوردن منحنی SWCC، ثابت فرض شدن تخلخل در نقاط مختلف خاک می‌باشد [۵ و ۶]. این مدل‌ها، تخلخل یک توده خاک را به صورت کلی و یا میانگین در نظر می‌گیرند. این درحالی است که تخلخل در نقاط مختلف خاک به طور کلی به عوامل متعددی نظیر اندازه دانه‌های خاک، تراکم و آرایش آنها بستگی دارد. آرایش دانه‌های خاک به نوبه خود بسیار متنوع بوده که در این زمینه ساده‌سازی‌های زیادی نیز صورت گرفته است. به عنوان نمونه ساختارهای مکعبی، رمبوندریک و هرمی را برای خاکهای دانه‌ای در نظر گرفته‌اند [۱۳]. وجود ذرات ریزدانه و چسبیده، تنوع این گونه آرایش‌ها را پیچیده‌تر می‌سازد. ساختارهای لانه زنبوری<sup>۶</sup> و یا انعقادی<sup>۷</sup> برای خاکهای رسی و سیلتی، نمونه‌هایی از مدل‌های در نظر گرفته شده در این زمینه‌اند [۱۳]. در هر حال، تخلخل در یک توده خاک به اندازه ذرات خاک و نحوه قرارگیری دانه‌های با اندازه‌های مختلف در کنار یکدیگر، بستگی داشته و لذا توزیع حفرات و در نتیجه تخلخل در مناطق مختلف توده خاک متغیر خواهد بود [۱۴].

در این مقاله، یک مدل برای در نظر گرفتن تخلخل موضعی متغیر در خاکهای دانه‌ای ریز با منحنی‌های مختلف دانه‌بندی ارائه گردیده و تأثیر آن در ارزیابی منحنی SWCC بررسی شده است. این کار بر اساس تعمیم مدل آریا و پاریس صورت گرفته که تخلخل موضعی را ثابت فرض نموده‌اند [۵ و ۱۵]. در مدل ارائه شده، تخلخل موضعی توده خاک ثابت نبوده بلکه با توابع مختلفی به اندازه ذرات خاک مربوط شده و نحوه تغییرات منحنی SWCC بر این اساس، بررسی گردیده است. همچنین تأثیر منحنی دانه‌بندی، چه از لحاظ اندازه ذرات و چه از لحاظ نحوه توزیع آنها، بر روی منحنی SWCC در مدل موجود بررسی گردیده و قابلیت‌های این مدل در ارزیابی بهتر داده‌های آزمایشگاهی، نشان داده شده است.

## ۲- مبانی تئوریک

در یک توده خاک واقعی معمولاً پارامتری تحت عنوان تخلخل کلی و یا میانگین برای توده‌ای از خاک تعریف می‌شود [۱۶]. این پارامتر به نوعی نشان‌دهنده قدرت نگهداشت آب یا سیال در محدوده غیر اشباع خاک است. طبیعی است که توزیع تخلخل و درجه اشباع سیال در مناطق مختلف توده خاک متفاوت بوده و

<sup>1</sup> Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

<sup>2</sup> Collapse

<sup>3</sup> Pore Size Distribution

<sup>4</sup> Particle Size Distribution (PSD)

<sup>5</sup> Fredlund

<sup>6</sup> Honeycomb

<sup>7</sup> Flocculent

$R_i$  - یا میانگین شعاع ذرات برای هر بازه، از روی منحنی PSD مشخص می‌شود.

- در هر بازه، ذرات خاک به صورت تعداد  $n_i$  کره (با شعاع  $R_i$ ) معادل‌سازی شده که  $n_i$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$n_i \left( \frac{4}{3} \pi R_i^3 \right) = \frac{W_i}{\rho_s} \quad (1)$$

که  $\rho_s$  چگالی دانه‌های جامد می‌باشد.

- در این مرحله، منحنی PSD به صورت ذرات با شعاعهای مشخص و با وزنهای مربوطه، مجزاسازی شده است. در مدل ارائه شده، تخلخل موضعی به حفره‌ای که از یک ذره با شعاع  $R_i$  حاصل می‌شود، وابسته می‌گردد. لذا برای هر ذره با شعاع  $R_i$  یک تخلخل موضعی به صورت  $e_i = f(R_i)$  معرفی می‌شود.

- در تحقیقات گذشته، حفرات به صورت لوله‌های مویین شبیه‌سازی شده‌اند که حجم حفره در هر بازه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_v = \frac{W_i}{\rho_s} \times e_i = \pi r_i^2 h_i \quad (2)$$

که در آن

$r_i$  شعاع لوله مویین با ارتفاع  $h_i$  و  $h_i$  نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_i = 2R_i \times n_i^\alpha \quad (3)$$

که  $\alpha$  پارامتر تجربی است و بسته به نوع خاک بین ۱/۳۵ و ۱/۴۱ متغیر است [۲، ۵، ۱۵].

- بر اساس روابط فوق رابطه‌ای برای تعیین شعاع حفره در منحنی توزیع حفرات به صورت زیر به دست آمده است:

$$r_i = R_i \sqrt[e_i n_i^{(1-\alpha)}]{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

در مدل حاضر، با در نظر گرفتن توابع توانی یک پارامتری، تخلخل موضعی، متناسب با شعاع ذرات خاک به صورت رابطه زیر فرض گردید:

$$e_i = k \times R_i^m \quad (5)$$

که  $k$  ضریب نسبت و پارامتر  $m$  بیانگر نحوه وابستگی تخلخل به شعاع ذره می‌باشد. در این توابع، ضریب نسبت  $k$  به گونه‌ای تعیین می‌گردد که میانگین تخلخلهای موضعی برابر تخلخل کل توده خاک باشد. ضمناً با توجه به علامت  $m$ ، تغییرات تخلخل با شعاع ذرات خاک، به صورت مستقیم و یا معکوس خواهد بود.

برای رسیدن به منحنی مشخصه خاک از روی منحنی توزیع حفرات، از مدل لوله‌های مویین<sup>۲</sup> با قطرهای مختلف، استفاده گردید. برای این کار، منحنی توزیع حفرات نیز مجزاسازی شده و رابطه‌ای بین شعاع حفرات ( $r_i$ ) و مکش لازم برای تخلیه آن حفره ( $P_i$ ) از

تخلخل کلی در واقع میانگین توزیع تخلخل موضعی در المان حجم توده خاک می‌باشد. در هر حال تخلخل موضعی، تأثیر کلیدی در رفتار کلی خاک در برابر عبور سیال و منحنی SWCC خاک دارد [۵ و ۱۵].

تخلخل موضعی موجود در ساختار یک توده خاک، به نوبه خود به عوامل متعددی بستگی دارد [۱۳ و ۱۶]. از جمله این عوامل، اندازه ذرات خاک و نحوه قرارگیری و آرایش آنها در کنار یکدیگر است که به نوبه خود باعث به وجود آمدن اندازه حفرات متفاوت در خاک می‌گردند. حفرات با اندازه‌های متفاوت در نقاط مختلف خاک در حقیقت به وجود آورنده تخلخلهای موضعی در توده خاک هستند که لزوماً با تخلخل میانگین یکسان نیست. تغییرات اندازه حفرات به صورت تجمعی، در منحنی توزیع حفرات خاک نشان داده می‌شوند. این منحنی مشخص می‌کند که در یک توده خاک، چند درصد حفره‌ها شعاعی کمتر (و یا بیشتر) از یک شعاع معین را خواهند داشت.

یکی از روشهای محاسباتی برای ارزیابی منحنی SWCC بر اساس مجزاسازی<sup>۱</sup> منحنی PSD و دستیابی به منحنی توزیع حفرات خاک می‌باشد. در این روش، توده خاک ترکیبی از دانه‌هایی با اندازه‌های مساوی فرض می‌شود و خواص مجموعه (توده خاک) به صورت مجموع خواص جزئی این دانه‌ها در نظر گرفته می‌شود. اندازه حفرات و توزیع آنها نیز به اندازه دانه‌های خاک وابسته می‌گردد. در یکی از روشهای پیشنهادی در این زمینه، حفرات به صورت استوانه‌هایی با شعاع معین در نظر گرفته می‌شوند که این شعاع مستقیماً به اندازه ذرات بستگی دارد [۲ و ۵]. یکی از فرضیات مهم محدود کننده در روش مذکور آن است که تخلخل کل با تخلخل هر قسمت از توده خاک، یکسان بوده و متأثر از اندازه دانه‌های خاک نمی‌باشد.

در مدل حاضر، که بر اساس تعمیم مدل آریا و پاریس شکل گرفته، تخلخل موضعی موجود در نقاط مختلف، به اندازه ذرات خاک وابسته شده و جایگزین تخلخل میانگین گردیده است. مراحل محاسبه منحنی توزیع حفرات از روی منحنی PSD و تئوری‌های مربوطه، به صورت زیر خلاصه شده است:

- محور عمودی منحنی PSD به تعداد  $K$  بازه تقسیم‌بندی می‌شود و وزن مربوط به هر بازه در واحد وزن خاک ( $W_i$ ) به تناسب طول بازه محاسبه می‌شود، به طوری که رابطه  $\sum_{i=1}^K W_i = 1$  برقرار باشد.

<sup>1</sup> Discretization

<sup>2</sup> A Bundle of Capillary Tubes

رابطه کلونین به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$p_i = \frac{2T \cos \phi}{r_i} \quad (6)$$

که در آن

$\phi$  زاویه تماس (با تقریب خوبی می‌توان این زاویه را برابر صفر در نظر گرفت) و  $T$  کشش سطحی است که برای آب در دمای ۲۰ درجه برابر  $\frac{KN}{m^2} \times 10^{-5} \times 7/5$  می‌باشد.

ابتدا بر اساس فرضیه تخلخل موضعی متغیر، هر شعاع ذره ( $R_i$ ) به یک تخلخل موضعی معین ( $e_i$ ) طبق رابطه ۵ متناظر می‌گردد. سپس با داشتن منحنی دانه بندی ( $R_i$ ) و براساس رابطه ۴، منحنی توزیع حفرات ( $f_i$ ) مشخص می‌شود. با داشتن اندازه حفرات، مقدار مکش متناظر با هر حفره طبق رابطه ۶ محاسبه می‌گردد. برای محاسبه درصد رطوبت حجمی متناظر با هر مکش، از آنجا که تمامی حفرات کوچک‌تر از حفره با شعاع ( $f_i$ ) اشباع می‌باشند، درصد رطوبت حجمی برابر با درصد تجمعی تمامی حفرات کوچک‌تر از حفره با شعاع ( $f_i$ ) به حجم کل حفرات (محاسبه شده از روی تخلخل) خاک است. مراحل فوق در شکل ۱ قابل مشاهده است.

در این تحقیق، منحنی‌های دانه‌بندی مختلفی برای خاکهای دانه‌ای ریز در نظر گرفته شد. بر اساس طبقه بندی متحد<sup>۱</sup> و با توجه به ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب خمیدگی ( $C_s$ )، خاکهای خوب دانه‌بندی شده و بد دانه‌بندی شده (دارای دانه‌بندی یکنواخت یا گسسته)، مدل‌سازی گردیده و نحوه تأثیر این پارامترها در منحنی مشخصه خاک بحث گردید.

### ۳- روش انجام کار

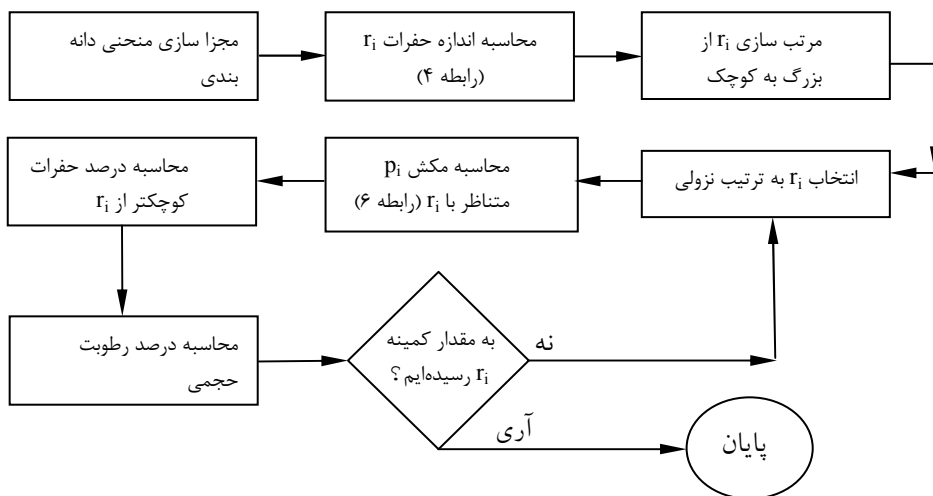
مدل تخلخل موضعی متغیر حاضر بر اساس رابطه ۵ و اتخاذ مقادیر ۱، ۲، صفر، ۱- و ۲- برای  $m$  شکل گرفت. بر این اساس، در

توابع  $e_i = k_1 \times R_i$  و  $e_i = k_2 \times R_i^2$  تخلخل موضعی نسبت مستقیم با اندازه ذره داشته و در توابع  $e_i = \frac{k_3}{R_i}$  و  $e_i = \frac{k_4}{R_i^2}$  تخلخل موضعی با معکوس اندازه ذره مرتبط می‌شود. البته برقراری تناسب معکوس بین  $e_i$  و  $R_i$  تنها برای تکمیل بحث و نتیجه‌گیری آورده شده و توجیه فیزیکی چندانی ندارد. به ازای  $m=0$  نیز، تخلخل موضعی ارتباطی با اندازه ذره نداشته و مقدار آن ثابت و برابر با مقدار تخلخل کل (یا میانگین) است.

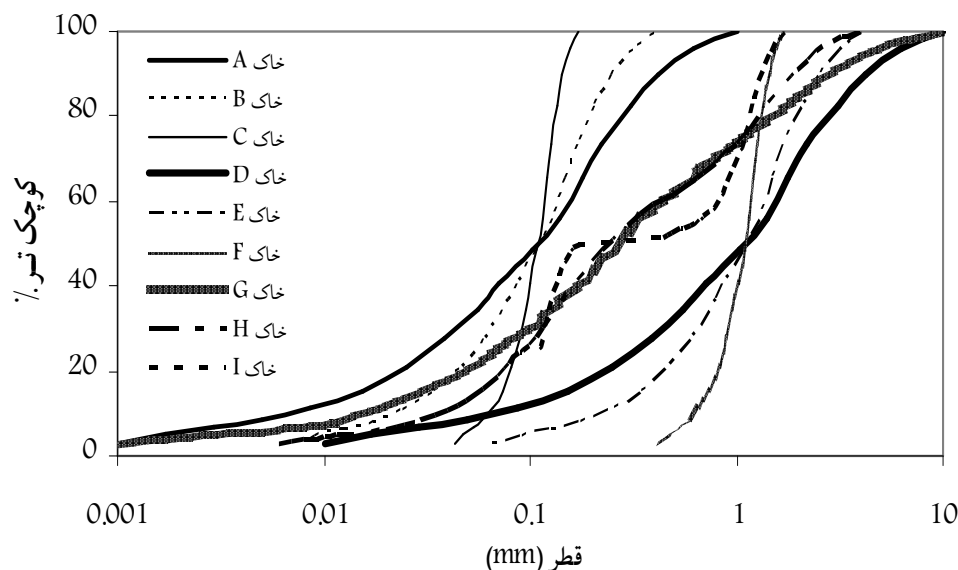
منحنی‌های دانه‌بندی مختلف مطالعه شده در شکل ۱ آمده است. خاک A شامل یک دانه‌بندی گسترده بوده (خوب دانه بندی شده) و خاکهای B و C به تدریج گستردگی کمتری دارند در حالی که اندازه متوسط ذرات این گروه از خاکها، ثابت نگهداشته شده است. به عبارت دیگر پارامتر  $C_u$  به ترتیب از خاک A به B و C کاهش می‌یابد (۲۹/۱، ۶/۶ و ۱/۲۳) با این حال اندازه مؤثر ذرات ( $D_{50}$ ) در آنها یکسان مانده است (۰/۱ میلی‌متر). به منظور بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها، منحنی خاکهای D، E و F به ترتیب از انتقال منحنی خاکهای A، B و C در فضای توزیع دانه‌بندی به سمت راست (افزایش اندازه ذرات) به دست آمدند. با این انتقال، مقدار  $D_{50}$  به ۱ میلی‌متر افزایش یافت و لیکن ضرایب یکنواختی و خمیدگی خاکهای متناظر، یکسان نگهداشته شدند.

برای دستیابی به خاکهای با منحنی دانه‌بندی گسسته (بد دانه‌بندی شده)، خاکهای G، H و I به ترتیب از ترکیب دو خاک A و D، B و E و نهایتاً C و F با اندازه وزنی یکسان، حاصل شدند (شکل ۱). از آنجا که پارامتر  $C_u$  از خاک A به B و C کاهش می‌یابد، طبیعی است که میزان گسستگی دانه‌بندی نیز از خاک G به H و I افزایش یابد. در خاکهای G، H و I مقدار  $C_u$  به ترتیب ۲۷/۹،

<sup>1</sup> Unified Classification



شکل ۱- روند نمای تعیین شعاع کمینه



شکل ۲- منحنی‌های دانه بندی خاک غیر اشباع در نظر گرفته شده در این تحقیق

منحنی دانه‌بندی و اندازه ذرات خاک، مطالعه شده و در انتها مدل تخلخل موضعی متغیر با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه گردیده است.

#### ۴-۱- مدل تخلخل موضعی متغیر

نحوه تغییرات تخلخل موضعی در منحنی توزیع حفرات و همچنین منحنی SWCC خاک تأثیرگذار است. لکن، این منحنی‌ها از دو منظر به یک واقعیت نگاه کرده و نحوه رفتار و تغییرات آنها، با هم تناظر یک به یک دارند. لذا اگر چه مقایسه‌های صورت گرفته در این بخش، عمدتاً بر اساس منحنی SWCC ارائه شده است ولی تمامی مباحث و بررسی‌ها و نتایج به دست آمده به منحنی توزیع حفرات خاک نیز قابل اعمال می‌باشد. همچنین در این بخش، مدل تخلخل ثابت به عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شده و تغییرات ناشی از اتخاذ مدل تخلخل موضعی متغیر، نسبت به آن سنجیده شده است. منحنی‌های توزیع حفرات و SWCC برای خاک A، با در نظر گرفتن توابع مختلف برای تخلخل موضعی، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. روند تغییرات مشابهی در منحنی‌های توزیع حفرات و SWCC برای تمام خاک‌های دیگر نیز مشاهده شد که به لحاظ رعایت اختصار از آوردن آنها خودداری گردیده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، به طور کلی ارتباط مستقیم (معکوس) تخلخل با شعاع ذرات، تأثیر بسیار زیادی (اندکی) در کاهش اندازه حفرات کوچک‌تر داشته در حالی که این گونه روابط باعث افزایش اندکی (زیادی) در اندازه حفرات بزرگ‌تر می‌گردند.

مطابق شکل ۳، هر چه تخلخل با توان بیشتری (از  $m = -2$  الی  $m = 2$ ) به اندازه شعاع ذرات مربوط گردد، محدوده تغییرات اندازه

$11/7$  و  $6/9$  و مقدار  $C_s$  به ترتیب  $0/88$ ،  $1/41$  و  $0/21$  می‌باشد. مقدار  $D_{50}$  در این خاکها نیز به ترتیب برابر  $0/27$ ،  $0/25$  و  $0/17$  میلی‌متر است. با اتخاذ منحنی‌های ارائه شده در شکل ۲، سعی شده است تا انواع دانه‌بندی‌هایی که عمدتاً در محدوده خاک‌های ماسه‌ای ریز، متوسط و درشت قرار می‌گیرند، پوشش داده شود. از آنجا که صرفاً بررسی تخلخل موضعی بر منحنی SWCC مورد نظر بوده است، خصوصیات دیگر این خاکها یکسان و به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$G_s = 2/65, e = 0/6, \alpha = 1/38$$

که در آن

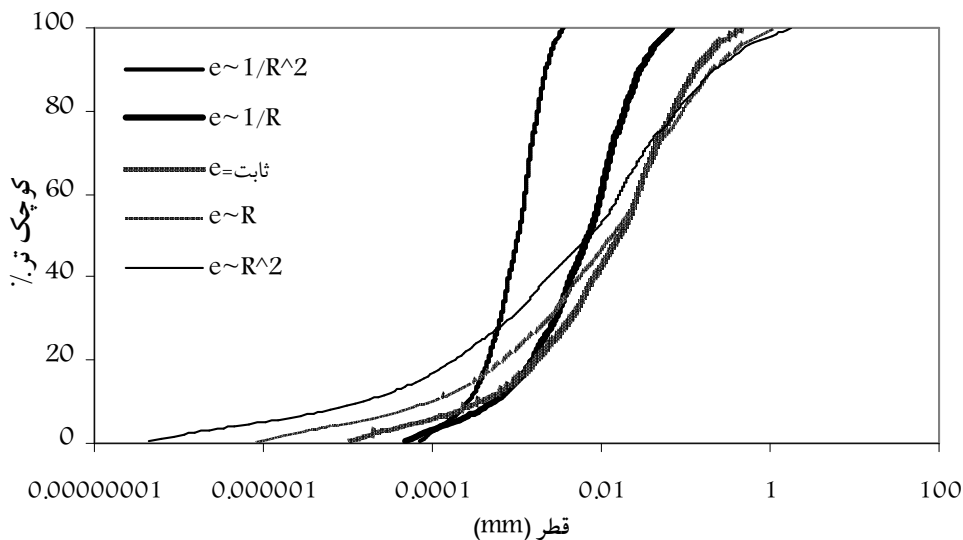
$G_s$  وزن مخصوص نسبی مصالح خاک و  $e$  تخلخل کل می‌باشد. به منظور مجزاسازی منحنی دانه‌بندی خاکها، انواع تقسیم‌بندی‌ها از جمله حسابی و لگاریتمی برای محورهای این منحنی‌ها بررسی گردید و در نهایت تقسیم‌بندی حسابی برای محور قائم، اتخاذ شد. پس از تقسیم بندی این محور به  $200$  بازه و محاسبه وزن متناظر با هر بازه ( $w_i$ )، شعاعهای متناظر و تعداد گرات معادل با آن نیز تعیین گردیدند. با داشتن پارامترهای فوق و استفاده از تئوری‌های مربوطه، منحنی‌های توزیع حفرات و سپس SWCC به دست آمدند.

#### ۴- نتایج

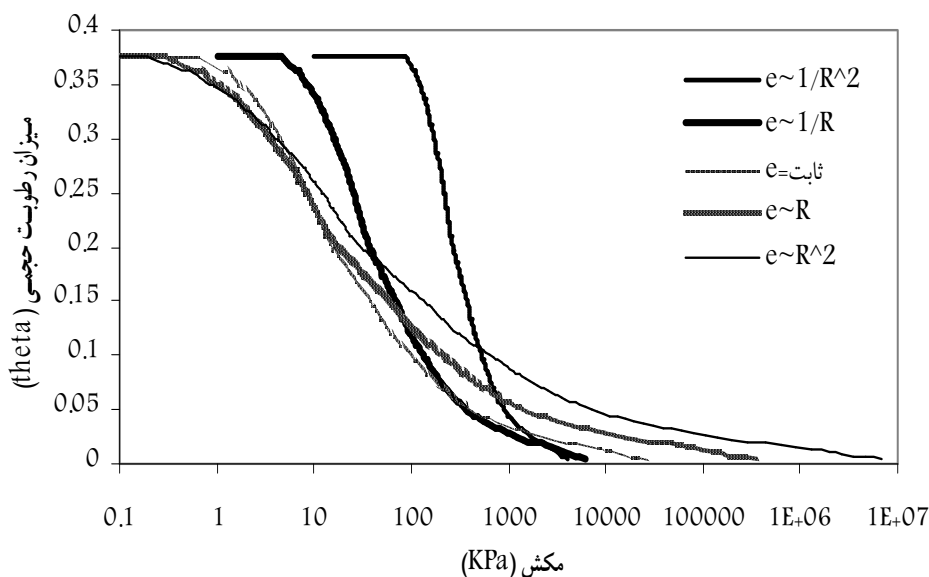
در این بخش، نتایج بررسی‌ها در سه زمینه نشان داده شده‌اند. در ابتدا تأثیر توابع مختلف برای مدل‌سازی تخلخل موضعی بر منحنی توزیع حفرات و همچنین منحنی SWCC بررسی شده است. سپس همین بحث برای انواع منحنی‌های دانه‌بندی و تأثیر نحوه گستردگی

منحنی SWCC خاکها دارد (شکل ۴). همان طور که در این شکل مشاهده می شود در صورتی که تخلخل نسبت مستقیم با شعاع ذره داشته باشد، دامنه تغییرات مکش افزایش یافته و در نتیجه منحنی SWCC گسترده و پخش می گردد. در این حالت، مقدار مکش لازم برای ورود هوا به توده خاک اشباع، کاهش می یابد که بیانگر آن است که اندازه بزرگ ترین حفرات توده خاک، بزرگ تر شده است. هر چه این نسبت با توان مثبت و بزرگ تر  $m$  صورت پذیرد، چنین تأثیری شدیدتر است. همچنین ارتباط مستقیم تخلخل با اندازه ذرات، باعث می شود تا شعاع حفرات کوچک تری حاصل شده و لذا

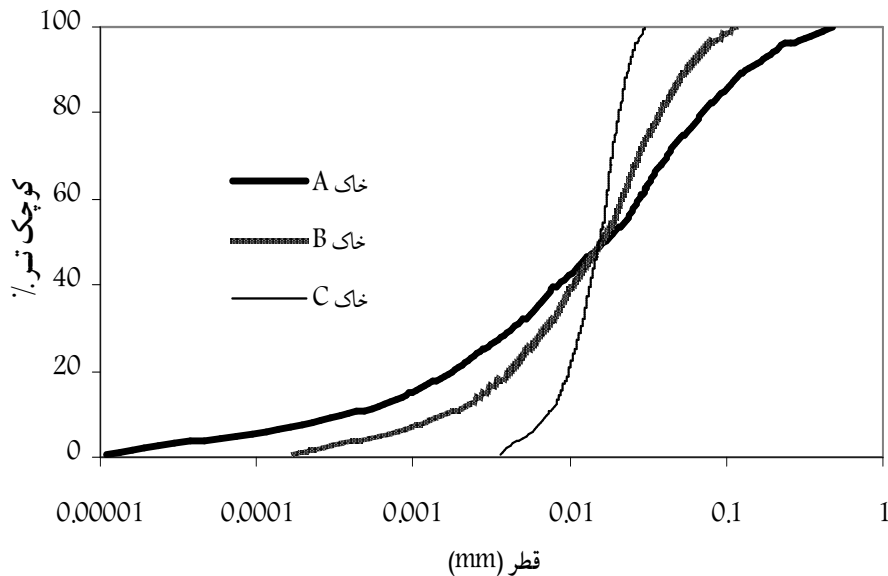
حفرات خاک بیشتر می گردد. افزایش لگاریتمی این محدوده تغییرات در خاکهای مختلف از  $2/27$  برابر (مربوط به خاک D) تا  $0/3$  برابر (مربوط به خاک C) متغیر بود. به طور کلی به علت نحوه وابستگی تخلخل موضعی به اندازه شعاع ذرات، هر چه منحنی دانه بندی خاک گسترده تر باشد، این افزایش بیشتر خواهد بود. اما در مدل تخلخل موضعی متغیر ارائه شده، تخلخل می تواند ثابت بوده ( $m$  برابر با صفر) و یا نسبت مستقیم ( $m$  های مثبت) و یا معکوس ( $m$  های منفی) با اندازه شعاع ذرات خاک داشته باشد. تغییرات در منحنی توزیع حفرات، به نوبه خود تأثیر مشابهی در



شکل ۳- منحنی توزیع حفرات خاک A بر اساس مدل تخلخل متغیر



شکل ۴- منحنی SWCC خاک A بر اساس مدل تخلخل موضعی متغیر



شکل ۵- تأثیر گستردگی منحنی دانه بندی بر منحنی SWCC

ثابت را نشان می دهد. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، با کاهش گستردگی منحنی دانه بندی (از خاک A به B و از B به C) در این گروه از خاکها، محدوده مکشهای لازم برای تخلیه حفرات خاک نیز کاهش می یابد. به عبارت دیگر با "فشرده شدن" منحنی دانه بندی، منحنی SWCC نیز "فشرده" می شود. همین روند در دو گروه خاک دیگر (D، E، F، G و H، I) و برای سایر روابط استفاده شده در مدل تخلخل موضعی متغیر نیز مشاهده گردید که برای رعایت اختصار از آوردن آنها خودداری شده است. حداکثر "فشرده گی" منحنی SWCC در گروه خاک A، B و C (نسبت به خاک D و بر حسب انرژی آزاد حفره) برای رابطه تخلخل با اندازه ذرات به صورت  $e_i = \frac{k_4}{R_i^2}$ ، برابر ۷۵/۲ درصد و حداقل فشرده گی در گروه خاک A و B، C و رابطه تخلخل موضعی با اندازه ذرات به صورت  $e_i = \frac{k_3}{R_i}$ ، برابر ۲۱/۹ درصد مشاهده گردید. به نظر می رسد که با توجه به روابط تئوری ارائه شده، به طور کلی خاکهای با منحنی دانه بندی فشرده تر، منحنی SWCC فشرده تری داشته و این فشرده گی با کاهش m در مدل تخلخل موضعی متغیر بیشتر می گردد.

منحنی دانه بندی خاکهای D، E و F به ترتیب از انتقال منحنی دانه بندی خاکهای A، B و C حاصل شده اند و نسبت به آنها درشت دانه تر می باشند. تأثیر این عامل (انتقال) در منحنی SWCC برای خاکهای B و E (برای نمونه) و در حالت تخلخل موضعی ثابت در شکل ۶ نشان داده شده است. تأثیر مشابهی برای سایر خاکهای انتقال یافته و سایر روابط استفاده شده در مدل تخلخل موضعی

مکشهای بیشتری برای تخلیه حفرات کوچک لازم گردد. از آنجا که انرژی آزاد حفره<sup>۱</sup> بیان کننده مقدار مکش خاک می باشد  $(PFE = \log_{10} \frac{\text{soil suction (cm)}}{1 \text{ (cm)}})$ ، میزان گستردگی منحنی های SWCC با این پارامتر مقایسه گردیده است. حداکثر افزایش دامنه تغییرات مکش بر حسب انرژی آزاد حفره نسبت به حالت تخلخل ثابت در تابع  $e_i = k_2 \times R_i^2$  و در خاک G مشاهده شد (۶۰ درصد) و حداقل این افزایش مربوط به تابع  $e_i = k_1 \times R_i$  و در خاک C بود (۷/۹ درصد).

رابطه معکوس تخلخل با شعاع ذره، باعث افزایش مکش لازم برای ورود هوا به توده خاک اشباع و کاهش مکش بیشینه گردید (شکل ۴). لذا بر اساس رابطه معکوس تخلخل با شعاع ذره، حفرات خاک در محدوده کوچک تری از تغییرات مکش، تخلیه خواهند شد. به عبارت دیگر، این روابط باعث کاهش دامنه تغییرات مکش شده و لذا منحنی SWCC را "فشرده" می کنند. حداکثر کاهش دامنه تغییرات انرژی آزاد، نسبت به حالت تخلخل ثابت در تابع  $e_i = \frac{k_4}{R_i^2}$  و در خاک F مشاهده گردید (۴۲ درصد) و حداقل این کاهش مربوط به تابع  $e_i = \frac{k_3}{R_i}$  و در خاک C بود (۸/۴ درصد).

#### ۴-۲- تأثیر منحنی دانه بندی

شکل ۵ تأثیر میزان گستردگی منحنی دانه بندی بر منحنی SWCC برای گروه خاکهای A، B و C (به عنوان نمونه) در حالت تخلخل

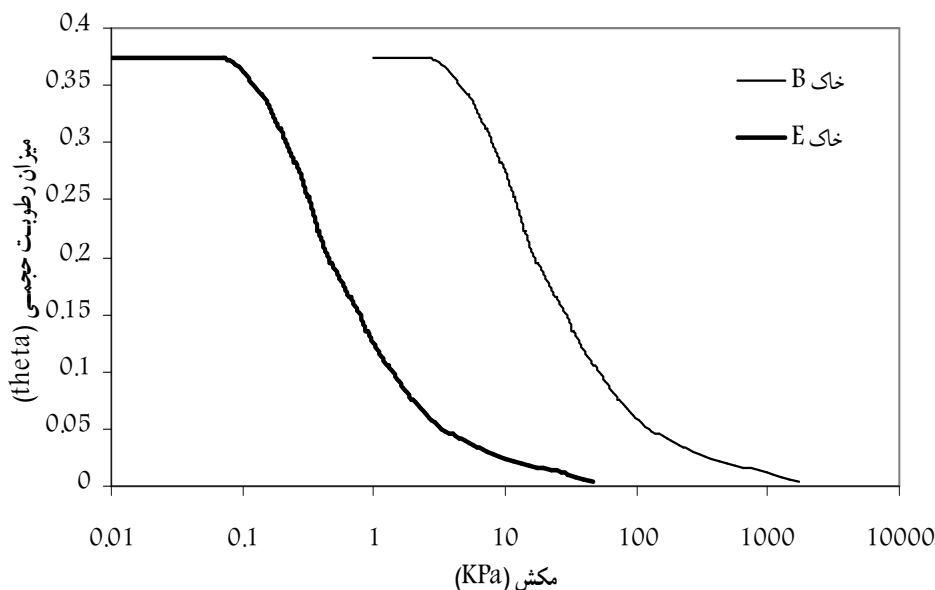
<sup>۱</sup> Pore Free Energy (PFE)

متغیر بود. به نظر می‌رسد که با توجه به تئوری مدل تخلخل موضعی متغیر، با افزایش اندازه ذرات خاک (انتقال منحنی دانه‌بندی)، حفرات بزرگ‌تری حاصل شده و در نتیجه مقدار مکشهای کمتری برای تخلیه این حفرات، لازم می‌باشد.

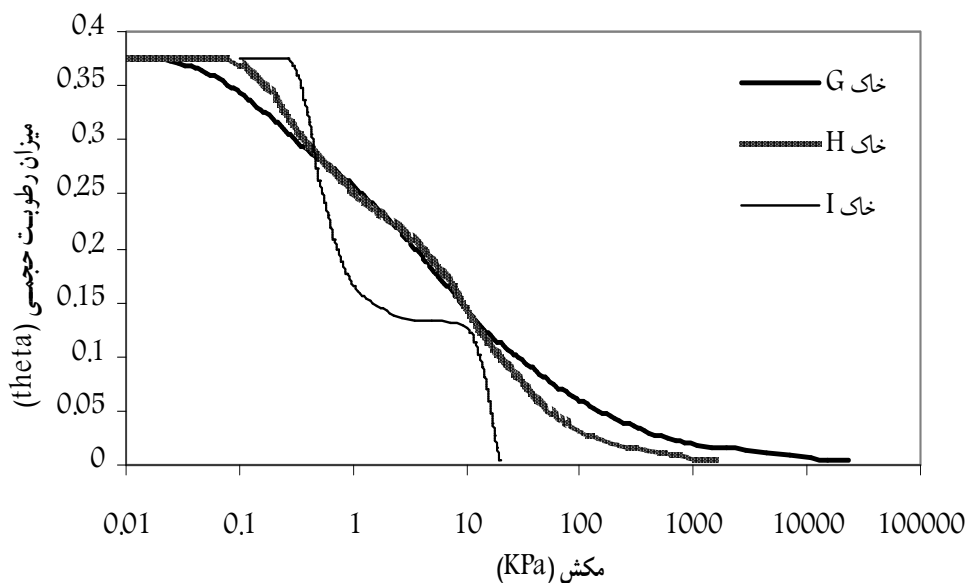
تأثیر افزایش گسستگی منحنی دانه‌بندی از خاک G به H و از H به I در حالت تخلخل موضعی ثابت در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود این عامل (گسستگی منحنی دانه‌بندی) تأثیر قابل توجهی بر منحنی SWCC دارد به طوری که با گسسته‌تر شدن منحنی دانه‌بندی خاک (از G به

متغیر مشاهده گردید که برای رعایت اختصار از آوردن آنها خودداری گردیده است. همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، با افزایش اندازه متوسط دانه‌ها، مکش لازم برای تخلیه حفرات خاک، کاهش می‌یابد.

به عبارت دیگر "انتقال" منحنی دانه‌بندی به یک سمت باعث "انتقال" منحنی SWCC به سمت مخالف می‌گردد. با انتقال منحنی‌های دانه‌بندی گروه خاکهای C، B و A به گروه خاکهای F، E و D میزان انتقال منحنی‌های SWCC در این خاکها ۳/۹۷ درصد بوده و مستقل از روابط استفاده شده برای تخلخل، در مدل تخلخل

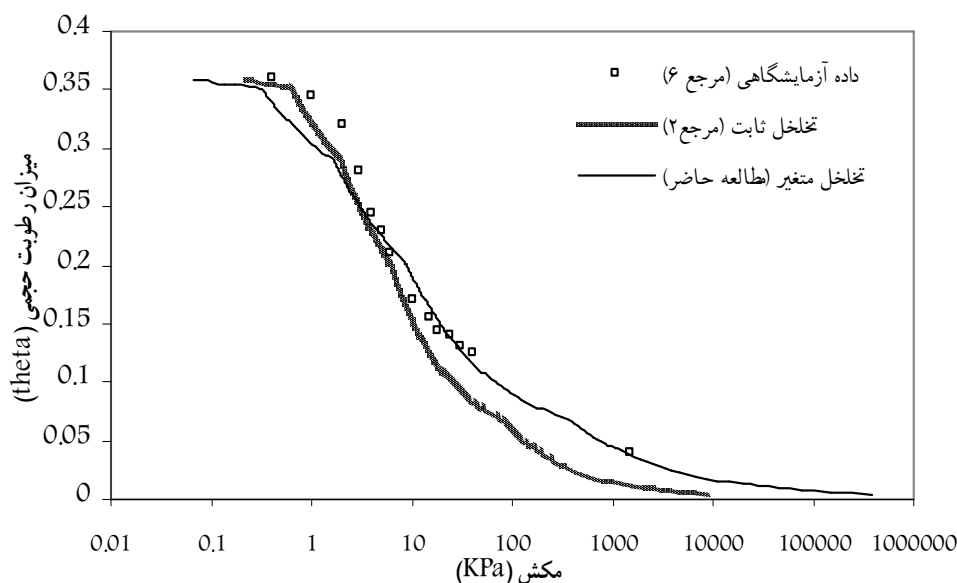


شکل ۶- تأثیر انتقال منحنی دانه‌بندی خاک بر منحنی SWCC



شکل ۷- تأثیر گسستگی منحنی دانه‌بندی بر منحنی SWCC





شکل ۸- مقایسه مدل‌های تخلخل موضعی متغیر و ثابت با داده‌های آزمایشگاهی

خاک است و لذا پارامتر ثابتی نبوده و باید برای خاکهای مختلف به طور جداگانه تعیین گردد.

همان طور که مشاهده می‌شود مدل تخلخل موضعی متغیر در مجموع تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی، مخصوصاً در محدوده مکشهای بالا، دارد. با معرفی خطا به صورت مجموع قدر مطلق تفاضل مدل و داده‌های آزمایشگاهی، مدل تخلخل موضعی متغیر نسبت به مدل تخلخل ثابت، مقدار خطا را به میزان ۴۰ درصد کاهش داده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل تخلخل موضعی متغیر، و به طور خاص وابستگی مستقیم تخلخل موضعی با اندازه ذرات در خاکهای دانه‌ای ریز، پیش‌بینی دقیق‌تر منحنی SWCC را از طریق PSD امکان‌پذیر می‌سازد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل تخلخل موضعی متغیر برای ناحیه غیر اشباع خاک ارائه گردید که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در حرکت سیال در محیط غیر اشباع و پیش‌بینی منحنی SWCC خاک داشته باشد. در این مدل‌سازی تخلخل موضعی خاک با روابط مختلف مستقیم و معکوس به اندازه ذرات خاک مرتبط شد. با اتخاذ منحنی‌های فرضی دانه‌بندی در محدوده خاکهای دانه‌ای ریز و با استفاده از تئوری‌های موجود، تأثیر مدل مذکور در پیش‌بینی منحنی مشخصه این خاکها، بررسی شد.

ارتباط مستقیم تخلخل با شعاع ذرات، تأثیر بسیار زیادی در کاهش اندازه حفرات کوچک‌تر داشت در حالی که این‌گونه روابط باعث افزایش اندکی در اندازه حفرات بزرگ‌تر گردید. با این

منحنی SWCC آن نیز گسسته‌تر می‌شود [۱۷]. علت این امر آن است که با حذف محدوده‌ای از اندازه ذرات خاک، محدوده‌ای از اندازه حفرات و همچنین مکشهای معادل این حفرات نیز حذف شده و لذا در محدوده‌ای از مکش، هیچ آبی از نمونه خارج نخواهد شد. همچنین با افزایش مقدار  $m$  در مدل تخلخل موضعی متغیر، میزان گسستگی منحنی SWCC نیز افزایش یافت.

### ۳-۴- مقایسه مدل تخلخل موضعی متغیر با نتایج آزمایشگاهی

بر اساس برخی آزمایش‌های انجام شده، مدل تخلخل ثابت، حفرات خاک را در مکشهایی کمتر از مکشهای واقعی مشاهده شده تخلیه می‌کند [۶]. به عبارت دیگر این مدل حفرات بزرگ‌تری برای خاک پیش‌بینی کرده و توانایی شبیه‌سازی محدوده مکشهای بالا در منحنی SWCC را ندارد. مقایسه رفتار مدل تخلخل موضعی متغیر و مدل تخلخل ثابت بر اساس یک‌سری از این آزمایش‌ها، در شکل ۸ نشان داده شده است [۶].

در مدل تخلخل موضعی متغیر، روابط مختلفی برای شبیه‌سازی این داده‌های آزمایشگاهی، در نظر گرفته شد. بهترین منحنی بر اساس رابطه  $e_i = k \times R_i^{1.5}$  به دست آمد که در این شکل آورده شده است. اتخاذ ضریب  $m$  برابر با ۱/۵ متناسب با مکش بیشینه  $10^6$  kPa بوده که بیشترین مکش لازم برای تخلیه آبهای موجود در حفرات توده خاک مورد نظر می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. ذکر این نکته ضروری است که ضریب  $m$  برای این خاک مشخص و مورد آزمایش برابر با ۱/۵ به دست آمده است. این ضریب، مشخصه هر

ارتباط، دامنه تغییرات مکش به طور کلی افزایش یافته و در نتیجه منحنی مشخصه خاکها، گسترده و پخش شدند. از طرف دیگر، ارتباط معکوس تخلخل با شعاع ذرات، باعث افزایش اندکی در اندازه حفرات کوچک تر و کاهش شدیدی در اندازه حفرات بزرگ تر گردید. چنین ارتباطی باعث کاهش دامنه تغییرات مکش شده و در نتیجه منحنی مشخصه را "فشرده" می کند. مشاهده گردید که میزان گستردگی و یا گسستگی منحنی دانه بندی تأثیر مستقیم در منحنی مشخصه خاک دارد. همچنین با

افزایش اندازه ذرات خاک (انتقال منحنی دانه بندی)، حفرات بزرگ تری حاصل شده و در نتیجه مقدار مکشهای کمتری برای تخلیه این حفرات، لازم گردید و نهایتاً منحنی مشخصه نیز "انتقال" یافت. با مقایسه نتایج به دست آمده با داده های آزمایشگاهی مشخص گردید که مدل تخلخل موضعی متغیر، و به طور خاص وابستگی مستقیم تخلخل موضعی با اندازه ذرات در خاکهای دانه ای ریز، پیش بینی دقیق تر منحنی مشخصه خاک از طریق منحنی دانه بندی آن را امکان پذیر می سازد.

## ۶- مراجع

- 1- Sims, P. H., and Yanful, E. K. (2002). "Predicting soil-water characteristic curve of compacted plastic soils from measured pore-size distribution." *Geotechnique*, 52 (4), 269-278.
- 2- Arya, L. M., and Paris, J. F. (1981). "A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 (6), 1023-1030.
- 3- Tyler, S. W., and Wheatcraft, S. W. (1988). "Application of fractal mathematics to soil water retention estimation." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 (4), 987-996.
- 4- Rieu, M., and Sposito, G. (1991). "Fractal fragmentation, soil porosity, and water properties: I.Theory." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 (5), 1231-1238.
- 5- Arya, L. M., Leij, F. J., Van Genuchten, M. T., and Shouse, P. J. (1999). "Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63 (3), 510-519.
- 6- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., and Wilson, G. W. (1997). "Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-Size distribution and volume-mass properties." 3<sup>rd</sup> Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro, Brazil.
- 7- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., and Chapuis, R. P. (2003). "A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties." *Can. Geotech. J.*, 40 (6), 1104-1122.
- 8- Johari, A., Habibagahi, G., and Ghahramani, A. (2006). "Prediction of soil-water characteristic curve using genetic programming." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (5), 661-665.
- 9- Arya, L. M., Leij, F. J., Shouse, P. J., and Van Genuchten, M. T. (1999). "Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63 (5), 1063-1070.
- 10- Gimenez, D., Perfect, E., Rawls, W. J., and Pachepsky, Y. (1997). "Fractal model for predicting soil hydraulic properties." *Engineering Geology*, 48 (3), 161-183.
- 11- Vereecken, H. (1995). "Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties." *Geoderma*, 65 (1), 81-92.
- 12- Schaap, M. G., and Lebron, I. (2001). "Using microscope observations of thin section to estimate soil permeability with the kozeny-carman equation." *Journal of Hydrology*, 251 (3), 186-201.
- ۱۳- وفائیان، م. (۱۳۷۶). *خواص مهندسی خاک، انتشارات ارکان، اصفهان.*
- 14- Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley and sons, New York.
- 15- Basile, A., and D'urso, G. (1997). "Experimental correction of simplified methods for predicting water retention curve in clay-loamy soils from particle-size determination." *Soil Technology*, 10 (3), 261-272.
- ۱۶- ابن جلال، ر.، و شفیعی بجزستان، م. (۱۳۷۰). *اصول نظری و عملی مکانیک خاک، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.*
- 17- Limin, Z., and Qun, C. (2005). "Predicting bimodal soil-water characteristic curves." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (5), 666-670.
- 18- Fredlund, D. G., and Anqing, X. (1994). "Equations for the soil water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), 531-532.
- 19- Fredlund, D. G., Anqing, X., and Shangyan, H. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve." *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4), 533-546.