

## ارزیابی برخی مدل‌های انقباض در خاک‌های آماس‌پذیر در دشت زرین استان چهارمحال و بختیاری

افسانه ساعد، شجاع قربانی دشتکی<sup>1</sup>، بیژن خلیلی مقدم، حبیب خداوردی‌لو و فرزاد مرادی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهرکرد؛ afsaneh.saed@yahoo.com

استادیار دانشگاه شهرکرد؛ shoja2002@yahoo.com

استادیار دانشگاه رامین اهواز؛ moghaddam623@yahoo.ie

استادیار دانشگاه ارومیه؛ hkhodaverdiloo@yahoo.com

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه رامین اهواز؛ farzadmp2@yahoo.com

دریافت: 91/8/28 و پذیرش: 92/7/22

### چکیده

حجم خاک‌های ورتی‌سول با تغییر رطوبت، تغییر کرده و موجب دگرگونی آرایش خلل و فرج خاک می‌گردد. منحنی انقباض، میزان تغییر تخلخل خاک را در اثر کاهش رطوبت خاک نشان می‌دهد. به منظور کمی‌سازی این منحنی، مدل‌های زیادی ارائه شده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل‌های مک‌گری و مالاونت، گرانولت و گرنیت، پنگ و هورن و کورنلیس و همکاران در برآورد منحنی انقباض برخی خاک‌های آماس‌پذیر دشت زرین واقع در استان چهارمحال و بختیاری بود. بدین منظور، 35 نمونه خاک از منطقه موردنظر به گونه‌ای انتخاب شد که دامنه‌ای وسیع از انقباض خاک را پوشش دهند. منحنی انقباض خاک‌ها به وسیله دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. مدل‌های یادشده به داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد. سپس کارآیی هر یک از مدل‌ها در برآورد منحنی انقباض خاک با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خط<sup>2</sup>، میانگین خط<sup>3</sup>، قدرمطلق میانگین خط<sup>4</sup> و شاخص اطلاعاتی آکاپکه<sup>5</sup> ارزیابی شد. همچنین احتمال صحیح بودن مدل با کمترین AIC محاسبه شد. نتایج نشان داد مدل‌های یادشده قادر به بیان بخش اعظمی از تغییرات منحنی انقباض در خاک‌های مورد مطالعه بوده‌اند. با این وجود، مدل گرانولت و گرنیت، با AIC برابر با 57/29- و مقادیر RMSE، ME و AME به ترتیب 0/00052، 0/00122- و 0/0054 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در مقایسه با سایر مدل‌ها کارآیی بیشتری در برآورد منحنی انقباض این خاک‌ها داشت. بر این اساس، مدل مک‌گری و مالاونت با AIC برابر با 48/82- و RMSE، AME و ME به ترتیب برابر با 0/0101 و 0/00342 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب عملکرد پایینی برای برآورد منحنی انقباض این خاک‌ها نشان داد. بنابراین جهت برآورد منحنی انقباض در خاک‌های آماس‌پذیر این منطقه، استفاده از مدل گرانولت و گرنیت پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: منحنی انقباض، مدل مک‌گری و مالاونت، مدل گرانولت و گرنیت، مدل پنگ و هورن، مدل کورنلیس

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی

2. RMSE  
3. ME  
4. AME  
5. AIC

## مقدمه

متناسب<sup>4</sup> نام نهادند. در مرحله سوم که مرحله انقباض باقی‌مانده<sup>5</sup> است کاهش حجم خاک کمتر از کاهش مقدار آب می‌باشد. مرحله چهارم انقباض صفر<sup>6</sup> نام دارد، در این این مرحله یا تغییری بسیار اندک در حجم وجود دارد و یا اصلاً تغییری در حجم خاک رخ نمی‌دهد و در واقع ذرات به متراکم‌ترین وضعیت خود می‌رسند (برانسویجک، 1991). مرز بین مرحله انقباض نرمال و انقباض ساختاری نقطه ورود هوا به خاک است (کوتیلک، 1996).

شکل منحنی انقباض، شبیه به منحنی رطوبتی است، اما بر عکس آن می‌باشد (پنگ و هورن، 2005). جهت بیان منحنی انقباض، مدل‌های زیادی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های گیرالدز و همکاران (1983)، مک‌گری و مالفنت (1987)، کیم و همکاران (1992)، گرانولت و گرت (2001 و 2002) و پنگ و هورن (2005) و کورنلیس و همکاران (2004) اشاره کرد. در این پژوهش، مدل‌های مک‌گری و مالفنت (1987)، گرانولت و گرت (2004)، پنگ و هورن (2005) و کورنلیس و همکاران (2006) مورد استفاده قرار گرفت. در این چهار مدل نسبت پوکی به عنوان تابعی از نسبت حجمی آب بیان می‌شود. مدل مک‌گری و مالفنت (1987) مدلی است که هر چهار بخش منحنی انقباض را توصیف می‌کند. این مدل به صورت زیر ارائه شده است:

$$c = c_r + \frac{e_v}{1 + \exp[-\beta(\vartheta - \vartheta_1)]} \quad (1)$$

در این مدل،  $e$  نسبت پوکی،  $\vartheta$  نسبت حجمی آب،  $e_r$  نسبت پوکی باقیمانده (در خاک آون-خشک با دمای 105 درجه سانتی‌گراد)،  $e_v$  حداکثر دامنه تغییرات نسبت پوکی  $(e_s - e_r)$ ،  $e_s$  نسبت پوکی در حالت اشباع،  $\vartheta_1$  نسبت حجمی آب در نقطه عطف منحنی و  $\beta$  پارامتر شبیه مدل است که به نقطه ورود هوا به خاک بستگی دارد. در این مدل  $\vartheta_1$  و  $\beta$  پارامترهای برازش‌یافته هستند. مدل پنگ و هورن (2005) مدلی است که بر اساس مدل نگهداشت رطوبتی ون‌گنوختن (1980) به دست آمده و به صورت زیر است:

$$e = \begin{cases} e_r & \vartheta = 0 \\ e_r + \frac{e_s - e_r}{\left[1 + \left(\frac{e_s - e_r}{e_s - e_r}\right)^m\right]} & 0 < \vartheta < \vartheta_s \quad n > 0 \\ e_s & \vartheta = \vartheta_s \end{cases} \quad (2)$$

خاک‌های رتتی‌سول، به دلیل داشتن کانی‌های رسی گروه اسمکتایت به ویژه مونت‌موریلونایت، در هنگام خشک و تر شدن به ترتیب منقبض و منبسط شده و خاک‌هایی آماس‌پذیر به شمار می‌آیند (کریس مانو و همکاران، 2007؛ حیدری و همکاران، 2008). منحنی انقباض، تغییر حجم این خاک‌ها را در اثر تغییرات رطوبت خاک نشان می‌دهد. منحنی انقباض بر بازآرایی جدید ذرات و منافذ خاک و همچنین انتقال آب و املاح در این خاک‌ها مؤثر است (اسمایلز، 2000؛ گارنیر و همکاران، 1997). بنابراین بیان کمی و دقیق این منحنی اهمیت زیادی در مطالعات خاک و آب دارد.

خاک‌های آماس‌پذیر در رویارویی با نوسانات فصلی رطوبت، به صورت تناوبی منبسط و منقبض می‌شوند (تیریتی و همکاران، 2002). به هنگام خشک شدن این خاک‌ها رطوبت خاک کاهش می‌یابد، اما هوایی جایگزین آن نمی‌شود، در نتیجه خاک منقبض شده و در آن درز و ترک ایجاد می‌شود. همانطور که شکل 1 نشان می‌دهد در هنگام خشک شدن چهار مرحله در پدیده انقباض قابل تشخیص است (هنس، 1923؛ استیرک، 1954 و برانسویجک، 1991). مرحله‌ی نخست؛ مرحله انقباض ساختاری<sup>1</sup> است و مربوط به تغییر حجم کم خاک همراه با خروج آب از منافذ درشت تحت مکش کم می‌باشد. در این مرحله آب از ماکروپوره‌های پایدار خارج می‌شود و بنابراین شکل خاک تغییر نمی‌کند. این مرحله تنها در خاک‌هایی که ساختمان خوبی دارند و یا فعالیت بیولوژیکی در آن‌ها بالاست، رخ می‌دهد (کورنلیس و همکاران، 2006b). مرحله دوم؛ انقباض خطی یا نرمال<sup>2</sup> است که نشان‌دهنده کاهش حجم، متناسب با خروج آب از سیستم در مکش 0/03 تا 1 مگاپاسکال و حتی تا 1/5 مگاپاسکال می‌باشد.

در این مرحله، تغییری تدریجی در شکل و در الگوی توزیع خلل و فرج سیستم متخلخل رخ می‌دهد. شیب این بخش از منحنی در خاک‌های رسی بدون ساختمان برابر با یک (اسپوزیتو و گیرالدز، 1976؛ چرتکاو، 2000؛ چرتکاو، 2003) و در خاک‌هایی که ساختمان خوبی دارند خیلی کمتر از یک است (برادو و همکاران، 1999). درز و ترک‌ها در این مرحله شکل می‌گیرند. میشل (1992) و گرانولت و گرت (2001) این مرحله از انقباض را به ترتیب انقباض پایه<sup>3</sup> و انقباض

4. Proportional shrinkage

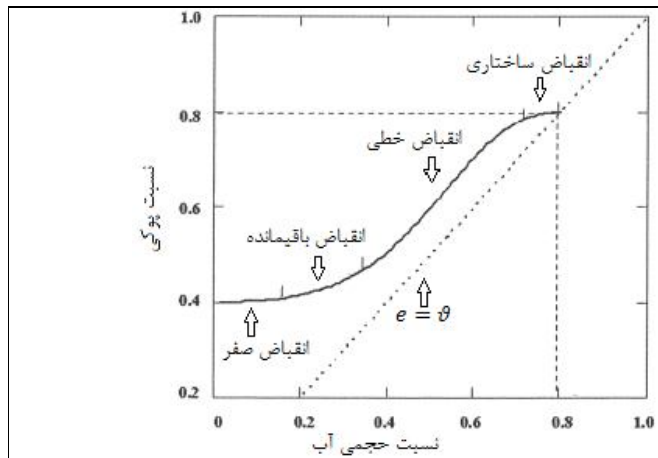
5. Residual shrinkage

6. Zero shrinkage

1. Structural shrinkage

2. Normal or Line shrinkage

3. Base shrinkage



شکل 1- تغییرات حجم خاک در اثر تغییر رطوبت خاک، منحنی انقباض (پنگ و هورن، 2005)

با توجه به تغییر حجم خاک‌های ورتی‌سول در اثر تغییرات رطوبت خاک و تأثیر منحنی انقباض حاصله بر بازآرایی جدید ذرات و منافذ خاک و انتقال آب و املاح در این خاک‌ها (اسمایلز، 2000؛ گارنیر و همکاران، 1999)، بیان کمی و دقیق این منحنی اهمیت زیادی در مطالعات خاک و آب دارد. تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده از مدل‌های انقباض در خاک‌های آماس‌پذیر دشت زرین واقع در استان چهارمحال و بختیاری انجام نگردیده است، بنابراین هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد این چهار مدل به منظور برآورد منحنی انقباض در این منطقه بود.

#### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، دشت زرین در استان چهارمحال و بختیاری بود که دارای خاک‌های ورتی‌سول می‌باشد (بهمنی، 1388 و سرشوق، 1388). نمونه‌برداری از عمق 0-30 سانتی‌متری خاک و به گونه‌ای انجام شد که نمونه‌ها دامنه وسیعی از انقباض خاک را پوشش دهند. منحنی انقباض خاک به وسیله دستگاه صفحات فشاری و جعبه شنی اندازه‌گیری شد. بدین منظور تغییر حجم نمونه‌های خاک در پتانسیل ماتریک‌های 0، -33، -100، -500، -1000 و -1500 کیلوپاسکال به روش پارافین اندازه‌گیری گردید. سپس، مدل مک‌گری و ملافنت (1987)، مدل گرانولت و گرنت (2004)، مدل پنگ و هورن (2005) و مدل کورنلیس و همکاران (2006) به روش بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا به داده‌ها برازش یافت و مقدار بهینه‌ی پارامترهای هر مدل به دست آمد. ارزیابی مدل‌های یادشده مستلزم تعیین نسبت پوکی ( $e_i$ ) و نسبت حجمی آب ( $v_i$ ) در هر مکش بود که به ترتیب با محاسبه نسبت حجم منافذ به حجم

که در آن پارامترهای برازش‌یافته  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  هستند که در واقع پارامترهای شکل<sup>1</sup> مدل می‌باشند. مدل گرانولت و گرنت (2001 و 2002) مدلی چهار پارامتری با بیان ریاضی زیر است:

$$e = e_s + a \left\{ \exp\left(\frac{b}{g^c}\right) - \exp\left(\frac{b}{e_s^c}\right) \right\} \quad (3)$$

که در آن  $e_s$ ،  $a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای مدل می‌باشند. گرانولت و گرنت (2004) برای تعیین پارامتر  $a$  رابطه زیر را ارائه دادند:

$$a = (e_s - e_r) \exp(b \times e_s^{-c}) \quad (4)$$

بنابراین گرانولت و گرنت (2004) با جایگذاری معادله 4 در معادله 3، مدل خود را به صورت زیر بیان نمودند:

$$e = e_r + (e_s - e_r) \exp[b(e_s^{-c} - \theta^{-c})] \quad (5)$$

در مدل اصلاح‌شده‌ی آن‌ها پارامترهای برازش‌یافته  $b$  و  $c$  می‌باشد.

کورنلیس و همکاران (2006a) با تغییراتی در مدل گرانولت و گرنت (2004)، مدل انقباض را ساده نموده و به صورت زیر ارائه دادند:

$$e = e_r + a \times \exp\left(-\frac{b}{g^c}\right) \quad (6)$$

در این مدل نیز  $a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای برازش‌یافته هستند.

<sup>1</sup> Shape parameter

$$p = \frac{\exp(0.5\Delta)}{1 + \exp(0.5\Delta)} \quad (12)$$

که در آن  $\Delta$  قدرمطلق تفاوت AIC دو مدل مورد مقایسه است.

### بحث و نتایج

مقادیر میانگین رطوبت حجمی، حجم نمونه، جرم ویژه ظاهری، نسبت پوکی و نسبت حجمی آب در خاک‌های مورد مطالعه برای هر مکش در جدول 1 ارائه شده است. بر اساس جدول 1 با افزایش مکش (از حالت اشباع به خشک) و کاهش رطوبت خاک نسبت پوکی کاهش یافته است. تغییر نسبت پوکی خاک‌های آماس‌پذیر در اثر تغییر رطوبت خاک توسط باگارلو و آیوینو (2012) و لیائو و همکاران (2011) نیز گزارش شده است. دلیل تغییر پوکی خاک ناشی از به هم خوردن آرایش ذرات و منافذ خاک در اثر کاهش آب خاک می‌باشد (نوآموز و منصوری، 2010). در حالت اشباع، میانگین نسبت پوکی برابر با 0/69 و در حالت خشک ( $e_p$ ) کمتر از حالت اشباع و برابر با 0/26 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود. با کاهش رطوبت، سیستم متخلخل دچار تغییر تدریجی در شکل و آرایش خلل و فرج می‌گردد و حجم نمونه خاک کاهش می‌یابد (کوئیلک، 1996). کاهش حجم نمونه خاک با افزایش مکش، از حالت اشباع به خشک، منجر به افزایش جرم ویژه ظاهری با افزایش مکش می‌گردد. داسوگ و همکاران (1988) و همچنین رائو و همکاران (2001) در پژوهش خود کاهش جرم ویژه ظاهری با افزایش رطوبت خاک را مشاهده نمودند. در حالت اشباع، تمامی منافذ خاک را آب اشغال کرده است و به همین دلیل نسبت حجمی آب در این حالت برابر با نسبت پوکی خواهد بود ( $\theta_s = e_s$ ). همانطور که با افزایش مکش، رطوبت حجمی کاهش می‌یابد، نسبت حجمی رطوبت نیز کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج گرانولت و گران (2004) و بن‌سلام و همکاران (2012) همخوانی دارد.

ذرات خاک و نسبت حجم آب خاک به حجم ذرات خاک محاسبه گردید. به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها، مقادیر میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، قدرمطلق میانگین خطا (AME) و شاخص اطلاعاتی آکایکه (AIC) به صورت زیر محاسبه شد:

$$ME = \sum_1^n \frac{e_p - e_m}{n} \quad (7)$$

$$AME = \sum_1^n \frac{|e_p - e_m|}{n} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (e_p - e_m)^2}{n}} \quad (9)$$

$$AIC = N \ln \left( \frac{SSB}{N} \right) + 2(p+1) + \frac{2(p+1)(p+2)}{N-p-2} \quad (10)$$

$$SSE = \sum_1^N (e_m - e_p)^2 \quad (11)$$

که در آن‌ها  $e_p$  و  $e_m$  به ترتیب نسبت پوکی برآوردشده و محاسبه‌شده،  $n$  تعداد نمونه‌ها،  $N$  تعداد داده‌های انقباض برای هر نمونه خاک،  $p$  تعداد پارامترهای مدل و  $SSE$  مجموع مربعات خطا می‌باشد. ME شاخصی برای نشان دادن کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل است. مقادیر منفی و مثبت آن به ترتیب مبین کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی مدل می‌باشد. مقدار RMSE خطای برآوردشده را در برآورد نسبت پوکی بیان می‌کند و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر مدل است. AME شاخصی است که قدرمطلق میانگین خطای برآوردشده مدل را بیان می‌کند. مقدار آن همواره مثبت است. هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل خطای کمتری دارد. شاخص AIC برای بررسی تأثیر تعداد پارامترهای مدل‌ها استفاده شد. از این منظر مدل با کمترین مقدار AIC بهترین مدل است. بنابراین بهترین مدل، مدلی است که کمترین مقدار میانگین RMSE و AME و نزدیکترین میانگین ME به صفر را در تمامی نمونه‌ها داشته باشد. احتمال اینکه مدل با کمترین AIC صحیح‌ترین مدل باشد نیز با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

جدول 1- میانگین برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در هر مکش

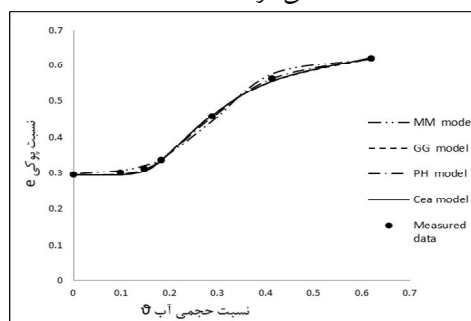
0	33	100	500	1000	1500	خاک خشک	مکش (kPa)
0/60	0/39	0/32	0/21	0/18	0/15	0/00	رطوبت حجمی ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )
9/35	8/81	8/08	7/31	7/08	6/95	6/92	حجم نمونه ( $\text{cm}^3$ )
0/69	0/60	0/47	0/33	0/29	0/27	0/26	نسبت پوکی ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )
0/69	0/47	0/35	0/23	0/19	0/15	0/00	نسبت حجمی آب ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )
0/75	0/83	0/99	1/12	1/16	1/18	1/21	جرم ویژه ظاهری ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

مکعب بر سانتی‌متر مکعب برآورد کردند. در حالت آون- خشک هر چهار مدل نسبت پوکی را بین 0/15 تا 0/58 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برآورد کردند. در هر چهار مدل، نسبت پوکی با افزایش مکش، کاهش یافت. نتایج مشابهی توسط گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006a) گزارش شده است.

در شکل 2 منحنی انقباض مشاهده شده و برازش شده از هر یک از مدل‌های مک‌گری و مالاونت (1987)، گرانولت و گرت (2004)، پنگ و هورن (2005) و کورنلیس و همکاران (2006) نشان داده شده است. مدل گرانولت و گرت (2004) و مدل مک‌گری و مالاونت (1987) به ترتیب بیشترین و کمترین همخوانی را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان دادند. کورنلیس و همکاران (2006b) نیز 9 مدل انقباض را به داده‌های خود برازش دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که مدل اول مک‌گری و مالاونت (1987) بیشترین تبعیت را از داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند و کمترین تبعیت مربوط به مدل گیرالدز و همکاران (1983) بود.

با تطابق شکل‌های 1 و 2 و همچنین نتایج فوق می‌توان دریافت که مرحله انقباض صفر تقریباً از حالت خشک تا نقطه پژمردگی دائم ادامه داشت. میانگین نسبت حجمی رطوبت در این مرحله برابر با 0/075 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود. مرحله انقباض باقیمانده بین نقطه پژمردگی دائم تا مکش نزدیک به 500 کیلوپاسکال و میانگین رطوبت این مرحله برابر با 0/19 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود. مرحله انقباض نرمال از مکش 500 کیلوپاسکال تا 33 کیلوپاسکال و مرحله انقباض ساختاری از رطوبت ظرفیت مزرعه تا حالت اشباع خاک ادامه یافت. میانگین رطوبت این دو مرحله به ترتیب برابر با 0/35 و 0/58 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود.

با برازش مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده، نسبت پوکی برای هر نمونه برآورد شد. مدل گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006) نسبت پوکی را در اکثر مکش‌ها تقریباً یکسان برآورد کردند. احتمالاً دلیل این امر آن است که مدل کورنلیس و همکاران (2006) مدلی است که با ایجاد تغییراتی در مدل گرانولت و گرت (2004) به دست آمده است. در حالت اشباع، هر چهار مدل مقدار نسبت پوکی را تقریباً یکسان برآورد کردند. نسبت پوکی برآورد شده در این حالت بین 0/51 تا 0/99 برآورد شد. در رطوبت ظرفیت مزرعه تفاوت کمی بین نسبت پوکی برآورد شده از مدل‌ها می‌باشد. مدل مک‌گری و مالاونت (1987) کمترین مقدار نسبت پوکی را در رطوبت ظرفیت مزرعه 0/46 و بیشترین مقدار آن را 0/95 برآورد کرده است. مدل پنگ و هورن (2005) در رطوبت ظرفیت مزرعه کمترین و بیشترین مقدار نسبت پوکی را به ترتیب برابر با 0/45 و 0/93 برآورد کرد. در حالیکه مدل‌های گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006) در این رطوبت، نسبت پوکی را بین 0/45 تا 0/92 برآورد کردند. در مکش 100 کیلوپاسکال مدل مک‌گری و مالاونت (1987) نسبت پوکی را از 0/30 تا 0/81، مدل پنگ و هورن (2005) بین 0/33 تا 0/81 و مدل‌های گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006) بین 0/33 تا 0/82 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برآورد کردند. در مکش 500 کیلوپاسکال، مدل مک‌گری و مالاونت (1987) و پنگ و هورن (2005) نسبت پوکی را به ترتیب بین 0/21 تا 0/65 و 0/20 تا 0/65 و مدل گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006) بین 0/20 تا 0/66 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برآورد کردند. مدل مک‌گری و مالاونت (1987) نسبت پوکی را در مکش 1000 کیلوپاسکال از 0/17 تا 0/60، مدل پنگ و هورن (2005) از 0/15 تا 0/59 و مدل‌های گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006) از 0/15 تا 0/58 سانتی‌متر



شکل 2- منحنی انقباض مشاهده شده و برازش شده از مدل‌های مک‌گری و مالاونت (MM)، گرانولت و گرت (GG)، پنگ و هورن (PH) و کورنلیس و همکاران (Cea)

مک‌گری و مالاغت (1987) به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار RMSE را نسبت به سایر مدل‌ها داشتند، که نشان‌دهنده کارایی کمتر مدل مک‌گری و مالاغت (1987) در برآورد نسبت پوکی خاک، می‌باشد. مدل کورنلیس و همکاران (2006a) دارای بیشترین مقدار AIC در بین مدل‌ها بوده و مدل گرانولت و گرت (2004) کمترین AIC را داشت. کورنلیس و همکاران (2006b) در ارزیابی مدل‌های انقباض مدل‌هایی داشتند که با وجود اینکه بیشترین تعداد پارامتر را داشت، اما AIC در آن کمتر از سایر مدل‌ها بود.

مقادیر میانگین آماره‌های ME، AME، RMSE و AIC برای هر یک از مدل‌ها در جدول 2 آمده است. مقادیر منفی شاخص ME در مدل گرانولت و گرت (2004) و کورنلیس و همکاران (2006)، بیانگر این است که این دو مدل، نسبت پوکی را کم‌برآورد کرده‌اند، در حالیکه دو مدل دیگر که مقادیر ME آن‌ها مثبت است، بیش‌برآورد داشته‌اند. کمترین مقدار AME مربوط به مدل پنگ و هورن (2005) و بیشترین مقدار آن مربوط به مدل مک‌گری و مالاغت (1987) است. در مقایسه مدل‌ها از نظر RMSE، مدل گرانولت و گرت (2004) و مدل

جدول 2- میانگین شاخص‌های آماری برای هر مدل

رتبه نهایی مدل	mAME (cm <sup>3</sup> .cm <sup>3</sup> )	mME (cm <sup>3</sup> .cm <sup>3</sup> )	mRMSE (cm <sup>3</sup> .cm <sup>3</sup> )	mAIC	مدل
4	0/0101(4)	0/00342	0/0122(4)	-48/82(3)	مک‌گری و مالاغت (1987)
1	0/0054(2)	-0/00122	0/00052(1)	-57/29(1)	گرانولت و گرت (2004)
2	0/0038(1)	0/00051	0/0052(2)	-55/45(2)	پنگ و هورن (2005)
3	0/0057(3)	-0/00076	0/0073(3)	-43/66(4)	کورنلیس و همکاران (2006)

اعداد درون پرانتز رتبه هر مدل بر اساس آماره هر ستون می‌باشد.

هر دو مدل محاسبه شده و احتمال اینکه مدلی که AIC کمتری دارد، صحیح‌تر از مدل دیگر باشد را بیان می‌کند.

جدول 3 احتمال اینکه مدل با کمترین AIC مدل صحیح باشد (P) را ارائه کرده است. در واقع مقدار P بین

جدول 3- احتمال صحیح بودن مدل با کمترین AIC

کورنلیس و همکاران (2006a)	مک‌گری و مالاغت (1987)	پنگ و هورن (2005)	گرانولت و گرت (2004)	
0/999	0/985	0/715	-	گرانولت و گرت (2004)
0/997	0/965	-	0	پنگ و هورن (2005)
0/930	-	0	0	مک‌گری و مالاغت (1987)

در جدول 4 میانگین پارامترهای هر یک از مدل‌ها آمده است. پنگ و هورن (2005) مقدار پارامتر  $\alpha$  و m را بیش از 1000 نیز به دست آوردند اما در نتایج این پژوهش بیشترین مقدار پارامتر  $\alpha$  26/27 و پارامتر m 38/70 بود. اما مقادیر n تقریباً نتایج یکسانی داشت. نتایج مشابه پارامترهای مدل کورنلیس و همکاران (2006a) و مدل گرانولت و گرت (2004) به این دلیل است که مدل کورنلیس و همکاران (2006a) در واقع ویرایش اصلاح‌شده مدل گرانولت و گرت (2004) می‌باشد. بنابراین پارامترها مشابه و نتایج آن‌ها تقریباً یکسان بود.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد مدل‌های مک‌گری و مالاغت (1987)، گرانولت و گرت (2004)، پنگ و هورن (2005) و کورنلیس و همکاران (2006) در برآورد

AIC مدل گرانولت و گرت (2004) از بقیه کمتر است و طبق این جدول احتمال اینکه این مدل صحیح‌تر از مدل‌های مک‌گری و مالاغت (1987)، پنگ و هورن (2005) و کورنلیس و همکاران (2006a) باشد به ترتیب برابر با 0/985، 0/715 و 0/999 می‌باشد. مدل پنگ و هورن (2005) در مقایسه با مدل‌های مک‌گری و مالاغت (1987) و کورنلیس و همکاران (2006a) AIC کمتری دارد و احتمال اینکه این مدل از دو مدل یادشده صحیح‌تر باشد به ترتیب برابر با 0/965 و 0/997 است. AIC مدل مک‌گری و مالاغت (1987) از مدل کورنلیس و همکاران (2006a) کمتر است و احتمال صحیح‌تر بودن آن نسبت به مدل کورنلیس و همکاران (2006a) برابر با 0/93 می‌باشد.

می‌شود جهت برآورد منحنی انقباض در خاک‌های آماس‌پذیر دشت زرین در استان چهارمحال و بختیاری از مدل انقباض گرانولت و گرنیت (2004) استفاده شود.

منحنی انقباض خاک‌های آماس‌پذیر دشت زرین در استان چهارمحال و بختیاری مورد ارزیابی قرار گرفت. از بین مدل‌های برازش‌شده مدل گرانولت و گرنیت (2004) برآورد بهتری از منحنی انقباض داشت، بنابراین توصیه

جدول 4- میانگین پارامترهای هر مدل

مدل پارامتر	مک‌گری و مالافنت				گرانولت و گرنیت				پنگ و هورن				کورنلیس و همکاران				
	$\beta$	$\theta_i$	$e_r$	$e_v$	b	c	$e_r$	$e_s$	m	n	a	$e_r$	c	b	a	$e_r$	
حداقل	12/49	0/24	0/15	0/31	0/01	1/15	0/15	0/52	1/17	1/09	0/95	0/15	0/52	1/15	0/02	0/33	0/15
حداکثر	18/75	0/54	0/58	0/59	4/45	0/24	0/58	0/99	38/7	2/55	26/27	0/58	0/99	4/32	0/24	0/78	0/58
میانگین	14/55	0/35	0/26	0/43	2/28	0/10	0/26	0/69	13/00	1/70	8/05	0/26	0/69	2/25	0/10	0/54	0/26

### فهرست منابع:

1. بهمنی م. 1388. مقایسه ویژگی‌های کانی‌شناسی خاک‌های کلسی‌سول و ورتی‌سول استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری و ارتباط آنها با وضعیت پتانسیم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
2. سرشوق م. 1388. اثر جهت و موقعیت شیب بر تعدادی از ویژگی‌های مورفولوژی، فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌های منطقه چلگرد استان چهارمحال و بختیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
3. Bagarello V. Iovino M. 2012. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. *Geoderma* 187-188:67-76.
4. Bensallam S. Bahi L. Ejjaouani H. and Shakhirev V. 2012. A new shrinkage curve model, applied to Moroccan clayey soil. *International Journal of Geosciences* 3:507-514.
5. Braudeau E. Costantini J.M. Bellier G. and Colleuille H. 1999. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. *Soil Science Society of America Journal* 63:525-535.
6. Bronswijk J.J.B. 1991. Relation between vertical soil movements and water-content changes in cracking clays. *Soil Science Society of America Journal* 55:1220-1226.
7. Chertkov V.Y. 2000. Modeling the pore structure and shrinkage curve of soil clay matrix. *Geoderma* 95:215-246.
8. Chertkov V.Y. 2003. Modelling the shrinkage curve of soil clay pastes. *Geoderma* 112:71-95.
9. Cornelis W.M. Corluy J. Medina H. Hartmann R. Van Meirvenne M. and Ruiz M.E. 2006a. A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage. *European Journal of Soil Science* 57:258-268.
10. Cornelis W.M. Corluy J. Medina H. Diaz J. Hartmann R. Van Meirvenne M. and Ruiz M.E. 2006b. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. *Geoderma* 137:179-191.
11. Crescimanno D. Santis A.D. and Provenzano G. 2007. Soil structure and bypass flow processes in a Vertisol under sprinkler and drip irrigation. *Geoderma* 138:110-118.
12. Dasog G.S. Acton D.F. Mermut A.R. and De Jong E. 1988. Shrink-swell potential and cracking in clay soils of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 68:251-260.
13. Garnier P. Rieu M. Boivin P. Vauclin M. and Bveye P. 1997. Determining the hydraulic properties of a swelling soil from a transient evaporation experiment. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1555-1563.

14. Giraldez J.V. Sposito G. and Delgado C. 1983. A general soil volume change equation I: The two-parameter model. *Soil Science Society of America Journal* 47:419–422.
15. Groenevelt P.H. and Grant C.D. 2001. Re-evaluation of the structural properties of some British swelling soils. *European Journal of Soil Science* 52:469–477.
16. Groenevelt P.H. and Grant C.D. 2002. Curvature of shrinkage lines in relation to the consistency and structure of a Norwegian clay soil. *Geoderma* 106:235–245.
17. Groenevelt P.H. and Grant C.D. 2004. Analysis of soil shrinkage data. *Soil and Tillage Research* 79: 71–77.
18. Haines W.B. 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil. *Journal of Agricultural Science Cambridge* 13:293–310.
19. Heidari A. Mahmoodi Sh. Roozitalab M.H. and Mermut A.R. 2008. Diversity of Clay Minerals in the Vertisols of Three Different Climatic Regions in Western Iran. *Journal of Agricultural Science Technology* 10:269–284.
20. Kim D.J. Vereecken H. Feyen J. Boels D. and Bronswijk J.J.B. 1992. On the characterization of properties of an unripe marine clay soil. 1. Shrinkage processes of an unripe marine clay soil in relation to physical ripening. *Soil Science* 153:471–481.
21. Kutilek M. 1996. Water retentions and water management of Vertisols. In: N. Ahmad and A. Mermut (Ed.), *Vertisols and technologies for their management*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp.201-230.
22. Liao K.H. Xu S.H. Wu J.C. Ji S.H. and Lin Q. 2011. Assessing soil water retention characteristics and their spatial variability using pedotransfer functions. *Pedosphere* 21(4):413–422.
23. McGarry D. and Malafant K.W.J. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Science Society of America Journal* 51:290–297.
24. Mitchell A.R. 1992. Shrinkage terminology: escape from ‘normalcy’. *Soil Science Society of America Journal* 56:993–994.
25. Nowamooz H. and Masroufi F. 2010. Relationships between soil fabric and suction cycles in compacted swelling soils. *Engineering Geology* 114:444–455.
26. Peng X. and Horn R. 2005. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Science Society of America Journal* 69:584–592.
27. Rao S.M. Reddy B.V.V. and Muttharam M. 2001. The impact of cycling wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils. *Engineering Geology* 60:223-233.
28. Smiles D.E. 2000. Hydrology of swelling soil: A review. *Australian Journal of Soil Research* 38: 501-521.
29. Sposito G. and Giraldez J.V. 1976. Thermodynamic stability and law of corresponding states in swelling soils. *Soil Science Society of America Journal* 40:352–358.
30. Stirk G.B. 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research* 5:279–290.
31. Tripathy S. Subba Rao K.S. and Fredlund D G. 2002. Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian Geotechnical Journal* 39:938-959.
32. 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.