

بررسی گلدانی الگوی جذب آب ذرت بین رطوبت معادل ظرفیت زراعی تا رطوبت اشباع

حوریه بزرگان^{1*}، محمد حسین محمدی و افشین توکلی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛

h.bozorgan@yahoo.com

استادیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛

mohammadi@znu.ac

استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان؛

tavakoli@znu.ic.ir

چکیده

اهمیت آب در مناطق خشک و نیمه خشک منجر شده است تا در مصرف آن برای اهداف کشاورزی دقت زیادی به عمل آید. از این رو مفاهیمی در ارتباط با مدیریت آب از جمله دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR)، و با حداقل محدودیت (LLWR) ارائه شده است. مطالعات مختلفی برای اصلاح حدود مربوط به این مفاهیم صورت گرفته است. در مطالعه حاضر یکی از دو حد بالایی مفهوم LLWR در رابطه با تهویه در دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی برای گیاه ذرت با استفاده از پارامترهای تبخیر و تعرق در طول دوره رشد گیاه، عملکرد و WUE در مکشهای مختلف رطوبتی (۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، ۶۰، ۴۰ سانتی متر) بررسی شد. مطالعه حاضر در طی دو سال کشت گلخانه ای و در 6 تیمار برای دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی انجام گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که میزان تبخیر و تعرق روزانه در مکش ماتریک های بزرگتر از 60 و 80 سانتی متر به ترتیب برای خاک لوم شنی و لوم رسی به عدد ثابتی می رسد. عملکرد و WUE نیز در همین مکش ها بیشترین مقادیر را دارند. میزان رطوبت متناظر با این دو مکش (60 و 80) به ترتیب برابر 0/47 و 0/52 و میزان تخلخل تهویه ای آنها 0/04 و 0/06 به ترتیب برای خاک لوم شنی و لوم رسی بود. که این مکش ها به عنوان بالاترین حد LLWR و بالاترین WUE در گیاه ذرت پیشنهاد گردید. مطالعه حاضر نشان داد که تخلخل تهویه 10 درصد نمی تواند به عنوان آستانه محدودیت تهویه برای ذرت کاملاً صحیح باشد.

واژه‌های کلیدی: دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، کارایی مصرف آب، تهویه، دور آبیاری

مقدمه

تهویه رشد گیاه کاهش می‌یابد (اویانگ و بورزما 1992) و کمبود اکسیژن به شدت فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت تاثیر قرار

بسیاری از واکنشهای بیولوژیکی خاک در حضور اکسیژن انجام می‌شوند. در خاکهای بدون

آدرس نویسنده مسؤول: تبریز، کدپستی: 5184665715- صندوق پستی: 5184665715

* دریافت: فروردین، 1391 و پذیرش: بهمن، 1391

دادند که میزان این حساسیت مستقل از جرم مخصوص ظاهری خاک است. سیگل ایسم و همکاران (2005) نشان دادند که برخی گیاهان در محدوده رطوبتی خارج از LLWR و در شرایط تخلخل تهویه ای کمتر از 10% رشد بهتری دارند که این امر نشان می دهد که LLWR شاخص کاملی از وضعیت رطوبت قابل جذب نیست. آوست و همکاران (1998) بیان نمودند که در تعریف حد بالای LLWR بر مبنای تخلخل تهویه ای 10%، تفاوت و تنوع در خصوصیات گیاهی، مانند عمق توسعه ریشه و شدت تنفس و نیز ویژگی های فیزیکی خاک و پیوستگی منافذ جهت انتقال گازها در نظر گرفته نمی شود.

مطابق تعریف، ظرفیت آب خاک در ضریب رطوبتی FC زمانی است که خروج آب ثقلی از پروفیل خاک متوقف می شود (میلر و کلوت 1967، کرکهام 2005، نقبی 1998، تیلور و اشکرافت 1972). به دلیل آنکه تعریف آب ثقلی پایه فیزیکی ندارد، تعاریف کاربردی تری برای ضریب FC مطرح شده است. نقبی (1998) بیان کرد که رطوبت FC (θ_{up-Nac}) زمانی حاصل می شود که شدت جریان زهکشی به 0/05 میلیمتر در روز برسد، که این تعریف پیش بینی ضریب FC را به تنهایی با منحنی هدایت هیدرولیکی خاک میسر می سازد. رطوبت متناظر با پتانسیل ماتریک 33- کیلوپاسکال در خاک در حال زهکشی نیز به عنوان معادل FC شناخته شده است (لینزلی و فرانزینی 1972 و کلمن 1947) که با θ_{up-suc} نشان داده می شود، که به سهولت از منحنی مشخصه آب خاک به دست می آید. فرض اینکه جذب آب توسط گیاه تا ضریب FC امکانپذیر نمی باشد، در تضاد با گزارشات است که بیان می دارند جذب آب توسط برخی گیاهان در شرایط نزدیک به اشباع نیز اتفاق می افتد (ونگنوختن و هوفمن 1984، ونگنوختن 1987 و هوپت و همکاران 2003).

مطالعاتی که اثر توام خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک و نیز خصوصیات گیاهی را بر LLWR

می دهد (بونامپروما 1972). اولین علایم فیزیولوژی قابل تشخیص ناشی از تنش تهویه ای در گیاهان عبارتند از: کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه ای و تعرق گیاهی (شافی و همکاران 1992). به همین دلیل تهویه از عوامل مهم خاکی برای رشد گیاهان عالی محسوب می شود. پخشیدگی گازها در خاک بویژه زمانیکه تخلخل تهویه ای کمتر از 10% است، متوقف می گردد (وسلینگ و ویجک 1957) و بنابراین ریشه گیاهان نیاز به حداقل 10% فضای تهویه ای دارند تا به بقای خود ادامه دهند (کرکهام 2005). پائرسی و همکاران (1983) تخلخل تهویه ای محدود کننده رشد ریشه برای خاک لوم رسی و لوم شنی را به ترتیب 11 و 19 درصد گزارش کرده اند. آب قابل دسترس برای گیاه (AW^1) که با دو حد بالایی و پائینی FC^2 و PWP^3 تعریف می شود، یکی از مفاهیم رطوبتی است که در گذشته در تعیین دامنه رطوبتی بهینه برای رشد گیاه مورد استفاده قرار می گرفت. بعدها به دلیل ضعف حدود بالا و پائین آن، مفهوم دامنه رطوبتی بدون محدودیت $NLWR^4$ (لتی 1985) و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت $LLWR^5$ (داسیلوا و همکاران 1994) برای بینش جامعی از وضعیت جذب آب توسط گیاه ارائه گردید. در تعریف این دو دامنه، ضریب رطوبتی FC به عنوان حد بالایی رطوبت بهینه رشد گیاهی به تنهایی مورد تردید قرار گرفته و اثر تخلخل تهویه ای بحرانی نیز به عنوان دیگر عامل تعیین کننده حد بالایی دامنه رطوبتی بهینه رشد گیاه لحاظ شده است. یکی از حدود بالایی LLWR تخلخل تهویه ای 10% (θ_{up-afp}) در نظر گرفته می شود. داسیلوا و همکاران (1994) نشان دادند که LLWR به ویژه در خاکهایی با بافت سنگین به مقادیر حد تخلخل تهویه ای حساس تر است. آنها همچنین نشان

1. Available Water

2. Field Capacity

3. Permanent Wilting Point

4. Non Limiting Water Range

5. Least Limiting Water Range

این تحقیق پی بردن به حد بالای رطوبت قابل جذب توسط گیاه ذرت (به عنوان یک گیاه مقاوم به تهویه) و همچنین تعیین دقیق حد بالای LLWR در دو خاک متفاوت می باشد.

مواد و روشها

ویژگی های خاک

در این پژوهش دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی از عمق 0-20 سانتی متری به ترتیب از منطقه چمن سلطانیه و باغ سیب دانشگاه زنجان نمونه برداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از کوبیدن و خشک نمودن از الک 8 میلی متری عبور داده شدند و در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفتند. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (بایکاس 1962)، مواد آلی (نلسون و سومر 1982)، کربنات کلسیم معادل (گوه و همکاران 1993)، جرم مخصوص حقیقی و ظاهری (کلوت و دیرکسن 1986) تعیین شدند (جدول 1).

بررسی کرده اند محدود می باشند. محمدی و همکاران (2010) یک حد بالایی برای رطوبت قابل جذب توسط گیاهان پیشنهاد نمودند، به نحوی که تلفیقی از خصوصیات فیزیکی خاک و ویژگی های ریشه گیاه باشد. آنها منحنی رطوبتی را بعنوان تنها ویژگی فیزیکی در دسترس فرض نموده و عمق توسعه و شدت تنفس ریشه را ویژگی های موثر گیاهی در نظر گرفتند. و حساسیت حد پیشنهادی خود را به ویژگی های فوق ارزیابی نموده و گزارش کردند که رطوبت FC نمی تواند حد بالای رطوبت قابل جذب توسط گیاهان باشد. با توجه به اینکه بسیاری از محدوده های رطوبتی پیشنهاد شده جهت جذب آب توسط گیاه، وابستگی شدیدی به حد بالایی رطوبت قابل جذب توسط گیاهدارند و این حد غالباً توسط تهویه کنترل می گردد و نزدیک به رطوبت اشباع خاک است، بنابراین ضروری است که الگوی تغییرات جذب آب توسط گیاهان مختلف از نقطه FC تا رطوبت اشباع خاک مورد مطالعه قرار گیرد تا حد بالا مشخص و وابستگی آن به عوامل مختلف تعیین گردد. لذا هدف از

جدول 1- برخی از خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاکهای مورد آزمایش

K (ppm)	کربنات کلسیم معادل (%)	P (ppm)	جرم مخصوص حقیقی (g/cm ³)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	ماده آلی (%)	رطوبت حجمی در		بافت خاک
						نقطه پژمردگی دائم (%)	مکش 33 کیلو پاسکال (%)	
174/8	38/12	58	2/6	1/29	1/34	18/9	43/6	Sandy loam
331/8	33/87	60/59	2/6	1/11	2/85	22/1	39/5	Clay loam

با استفاده از غشای فشاری در مکشهای 300، 500، 1000، 1500 کیلو پاسکال تعیین گردید (کلوت 1986). برآزش معادله ونگنوختن (1980) بر منحنی های رطوبتی تجربی با استفاده از نرم افزار RETC انجام گرفت (ونگنوختن و همکاران 1991). در این نرم افزار ضرایب θ_s ، θ_r ، α و n از طریق رگرسیون غیرخطی و

به منظور تعیین منحنی مشخصه آب خاک، از استوانه های آزمایشی کوچک جهت نمونه برداری استفاده شد. نمونه برداری در اعماق 5 و 15 سانتیمتر انجام گرفته و نمونه ها به آزمایشگاه منتقل گردیدند. نمونه ها با محلول 0/001 نرمال کلرید کلسیم از پائین اشباع و رطوبت آنها با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در مکشهای 33، 10، 50، 100، 200 کیلو پاسکال، و همچنین

حداقل کردن مجذور اختلافات، بین رطوبت اندازه گیری شده و پیش بینی شده بدست می آید.

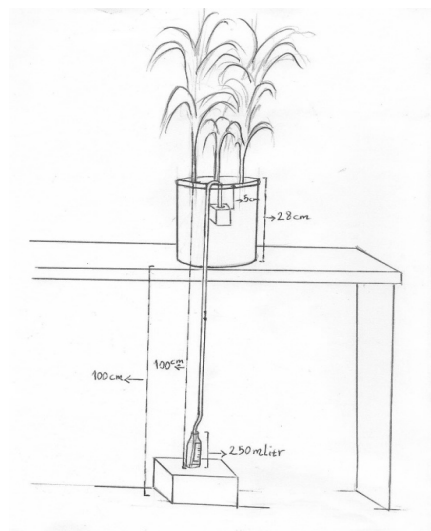
تانسیومتر

اندازه گیری پتانسیل ماتریک با وسایل ساده ای به نام تانسیومتر انجام می شود. که در آزمایشگاه به دلیل نیاز به تعداد زیادی از این دستگاه، تانسیومترها به صورت دستی ساخته شدند. بدین ترتیب که در ساخت کلاهک آن‌ها از آجرهای 3 سانتی متری استفاده گردید، و آجرها به طول 5 سانتی متر بریده و سپس با مته سوراخ شدند و یک شیلنگ شفاف به طول 1/5 متر به هر کلاهک آجری متصل گردید و برای جلوگیری از ورود هوا عایق بندی کاملی در محل اتصال شیلنگ به کلاهک صورت گرفت. در مرحله بعد کلاهک های آجری ساخته شده در آب به مدت چند ساعت اشباع شدند و سپس مقداری دوغاب سیمان تهیه گردید، آجرها در دوغاب فرو برده شده و با ایجاد مکش هوا توسط کمپرسور از طریق شیلنگ‌های متصل به آجرها، تمامی منافذ درشت آن‌ها مسدود گردید. این عمل جهت عایق بندی کامل منافذ درشت در برابر ورود هوا صورت گرفت. سپس تانسیومترها جهت عبور آب با شدت مناسب و عدم نفوذ هوا تست شدند و آنهایی که مورد تایید قرار گرفتند جهت استفاده و قرار دادن در داخل گلدانها انتخاب شدند. در مرحله بعدی شیلنگ و کلاهک متصل به آن پر از آب جوشیده شده سرد شده گردید. سپس کلاهک تانسیومترها در داخل گلدان و در عمق 5 سانتی متری خاک تعبیه شده و سپس سر شیلنگ متصل به آن در فاصله عمودی مورد نظر (از مرکز گلدان) ثابت گردید (شکل 1). بدین ترتیب مکشی معادل فاصله عمودی سر شیلنگ تا کلاهک بر خاک

اعمال شد. به نحوی که تانسیومترها قادر بودند کلیه آبی که با مکش کمتر از فاصله عمودی سر شیلنگ تا کلاهک، توسط خاک نگهداری می شود، را زهکشی نمایند. از طرف دیگر اتصال سر شیلنگ به ظرف محتوی آب این امکان را فراهم می نمود که در حالتی که مکش ماتریک خاک بیش از مکش آب درون تانسیومتر (برابر با فاصله عمودی سر شیلنگ تا کلاهک) است، آب از ظرف به طرف کلاهک و در نتیجه خاک حرکت نماید. بدین ترتیب این تانسیومترها مکش خاک را در یک محدوده مشخص تثبیت می نمودند. با کاهش آب درون گلدان میزان رطوبت مصرفی توسط گیاه نیز با اندازه گیری مقدار آب جذب شده از ظرفهای مدرج متصل به شیلنگ بدست آمد. همچنین روزانه مقداری آب بر روی گلدانها به نحوی اضافه گردید که آب اضافی توسط تانسیومترها خارج گردد. این فرآیند زهکشی در عرض حداکثر یک ساعت به اتمام می رسید و سپس در کل طول روز مکش خاک تثبیت میگردید.

کشت گیاه ذرت

5 بذر گیاه ذرت، در 2 نوع خاک با بافتهای لوم رسی و لوم شنی در 6 مکش مختلف (20، 40، 60، 80، 100، 120 سانتی متر) در سو تکرار (مکش 120 سانتی- متر با 4 تکرار) به صورت گلخانه‌ای در درون گلدان های 20 کیلوگرمی کاشته شدند. برای اعمال مکشهای مورد نظر، گلدانها روی سکویی به ارتفاع یک متر از سطح زمین قرار داده شدند. با تنظیم ارتفاع بطری‌های حاوی آب مقطر متصل به شیلنگ و تانسیومترها نسبت به سطح مرجع، مکشهای مورد نظر اعمال شدند (شکل 1).



شکل 1- نمایی کلی از نحوه کارکرد و جایگزاری تانسومتر در خاک یک گلدان

مقدار آب مصرفی در کل دوره (گرم بر لیتر) بدست آمد. در این تحقیق، کشت گیاه ذرت برای دو سال متوالی تکرار شد.

نتایج

خصوصیات هیدرولیکی خاکها

مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (1980) به شکل زیر ارائه شده است:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3)$$

که در آن α عکس پتانسیل ورود هوا ($1/L$)، θ_s رطوبت خاک در حالت اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده خاک و یا رطوبتی که در آن منحنی رطوبتی حالت مجانب دارد، m و n پارامترهای تجربی هستند که از برازش بدست می آیند و شکل منحنی رطوبتی را مشخص می نمایند. h مکش ماتریک خاک و θ رطوبت نظیر آن می باشد. پارامترهای حاصل از برازش مدل ونگنوختن بر داده‌های منحنی رطوبتی تجربی در دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی در جدول 2 آمده است.

آب جذب شده توسط خاک گلدانها به صورت روزانه ثبت و کاهش سطح آب در بطری‌ها با افزودن آب جبران شد. پس از جوانه زنی ذرت با انجام هرس در هر گلدان سه گیاه باقی ماند. جمع آوری داده‌ها تا محصول دهی گیاه ذرت ادامه یافت، سپس بخش هوایی برداشت شده و وزن ماده خشک آن (Y) بدست آمد. پس از جمع آوری داده‌های گلخانه‌ای، اعداد روزانه که نشان دهنده تبخیر و تعرق واقعی روزانه (ETc_i) متناظر برای هر مکش خاک بود، ثبت شده و طبق معادله (1) مقدار ارتفاع آب مصرفی در کل دوره (WR) به دست آمد و برای رسم منحنی های تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفت.

$$WR = \sum_{i=1}^n ETc_i \quad (1)$$

و سپس با استفاده از معادله زیر کارایی مصرف آب (WUE^1) برای هر مکش در هر دو خاک تعیین شد (ویتر 1962).

$$WUE = \frac{Y}{WR.S} \quad (2)$$

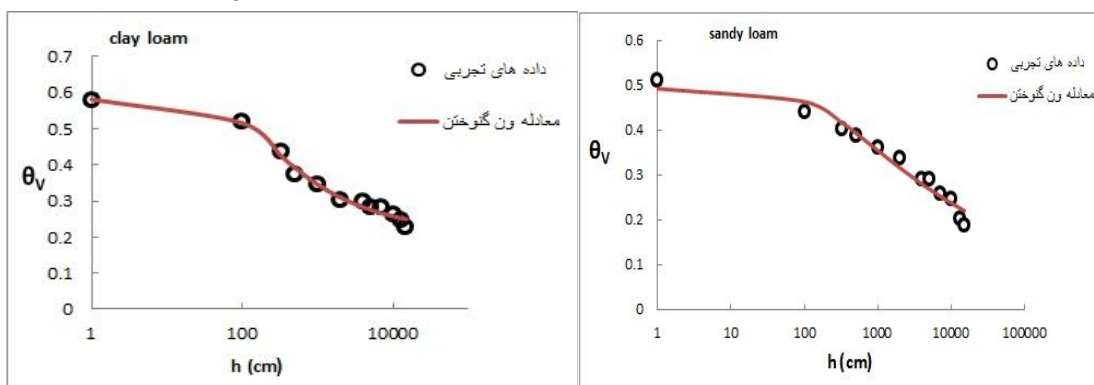
که S سطح مقطع گلدان است. در رابطه (2) مقدار کارایی مصرف آب بر حسب ماده خشک بخش هوایی به ازاء

¹ . Water Use Efficiency

جدول 2- پارامترهای حاصل از برازش مدل ون گنوختن بر داده‌های منحنی رطوبتی تجربی در دو نوع بافت خاک

پارامترهای معادله ون گنوختن در حالت $m = 1 - 1/n$						
نام خاک	Θ_s (m^3/m^3)	n	m	Θ_r (m^3/m^3)	α (1/cm)	R^2
Sandy loam	0/49	1/18	0/153	0	0/00554	0/98
Clay loam	0/58	1/44	0/307	0/207	0/00913	0/99

برازش مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (1980) بر داده‌های تجربی خاکهای مورد آزمایش در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2- برازش مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (1980) بر داده‌های تجربی در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی استفاده شده در این تحقیق

مصرف آب

گیاه ذرت (Y) و راندمان مصرف آب (WUE) متناظر با مکش‌های مختلف مورد مطالعه در دو نوع بافت لوم شنی و لوم رسی برای گیاه ذرت در جدول 3 آمده است.

میزان مجموع تبخیر و تعرق که برابر با مصرف آب (WR) است و میزان عملکرد خشک بخش هوایی

جدول 3- میزان ET، Y و WUE متناظر با مکش‌های مختلف مورد مطالعه برای گیاه ذرت

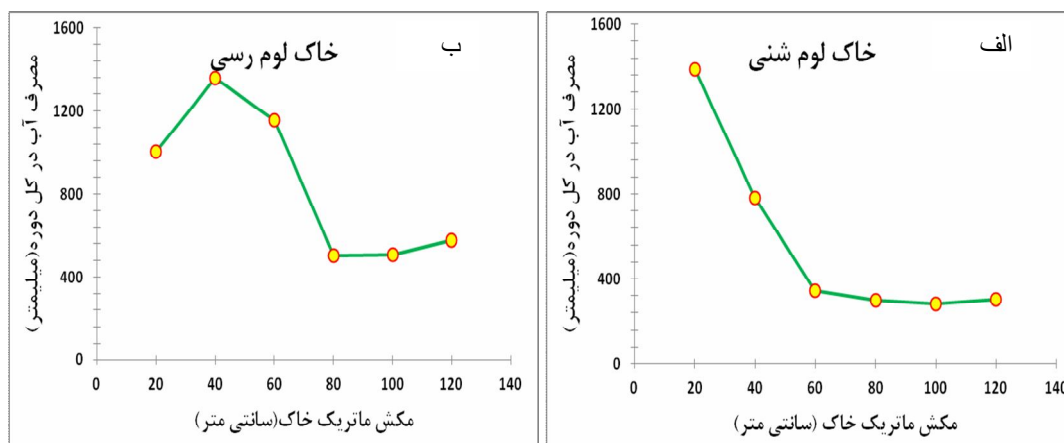
WUE(g/lit)		Y(g)		WR(mm)		مکش (cm)
لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	لوم رسی	لوم شنی	
6/1	3/4	234/07	178/50	1004	1384	20
4/9	7/5	254/73	223/56	1355	782	40
6/3	20/5	275/50	269/66	1155	344	60
16/1	18/2	309/21	207/56	502	299	80
12/2	17/8	236/29	192/56	509	283	100
11/9	16/3	261/24	188/53	575	304	120

سانتی متر میزان مصرف آب کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در خاک لوم شنی از مکش ماتریک 20 سانتی متر شروع شده و تا

جدول 3 نشان می‌دهد که در هر دو نوع بافت لوم شنی و لوم رسی با افزایش مکش ماتریک (h) از 20 تا 120

سپس از مکش 80 تا 120 سانتی متر به حالت تقریباً ثابتی می-رسد (شکل 3-ب)، که این مقدار ثابت را می توان تقریباً 530 میلی لیتر بر روز در نظر گرفت. این مقدار بیشتر از مصرف آب گیاه ذرت در خاک لوم شنی در مکش های ماتریک متناظر می-باشد.

مکش ماتریک 60 سانتی متر ادامه دارد و از مکش ماتریک 80 تا 120 سانتی متر به حالت تقریباً ثابتی می رسد (شکل 3-الف). که این مقدار ثابت را به طور میانگین می توان برابر 300 میلی متر در نظر گرفت. به طور مشابه در خاک لوم رسی نیز میزان مصرف آب گیاه ذرت از مکش 20 تا 80 سانتی متر کاهش و



شکل 3- تغییرات مجموع تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت در کل دوره رشد در خاک لوم شنی (الف) و لوم رسی (ب) به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک

مکش ماتریک 20 سانتی متر باشد. به عبارت دیگر در مکش های کم، توانایی تامین آب جهت تبخیر و تعرق در خاک شنی بیشتر از خاک رسی می باشد. مکش ماتریک 20 سانتی متر حالتی نزدیک به نقطه اشباع می باشد که در این مکش معمولاً حالت ماندابی در گلدان های گیاه ذرت مشاهده می شد، ولی در خاک لوم شنی به دلیل تبخیر و تعرق بالا در این مکش ماندابی کمتری نسبت به خاک لوم رسی مشاهده شد. عکس مطلب نیز در نیروهای مکشی زیاد صادق است. بنابراین در خاکهای سبک نسبت به خاکهای سنگین، آبی که به سطح خاک اضافه می شود، هنگام مرطوب بودن خاک، سریعتر به اعماق رفته و برعکس کندتر به طرف سطح خاک حرکت می کند. این یافته با نتایج مطالعات بارتیلوس و همکاران (2008) نیز مطابقت دارد که با تعریف اصطلاح F که میزان آب قابل جذب نسبی را برای گیاه به صورت عددی از صفر تا 1 بیان می کند، اظهار داشتند که خاک لوم شنی و لوم رسی

مقایسه دو شکل 3-الف و 3-ب نشان می دهد که میزان مصرف آب در تمامی مکش های ماتریک، به جز مکش 20 سانتی متر در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی می باشد. دلیل این امر ممکن است وجود منافذ و پیوستگی بیشتر آنها و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بالا در خاک لوم رسی باشد. در خاکهایی با بافت درشت، مقدار رطوبت کمتری در نیروی مکش معینی موجود است و لذا آب کمتری برای تبخیر در سطح خاک تامین می شود. بنابراین اگر تبخیر در سطح خاک پیوسته باشد، ضریب پخشیدگی رطوبت در خاکهای شنی، با کاهش رطوبت کاهش سریعتری خواهد داشت. در شرایط اشباع و بسیار نزدیک به اشباع، خاکهای درشت بافت نسبت به خاکهای با بافت ریز، دارای ضریب آبدگزی بزرگتری هستند (بایوردی، 1379). که در واقع این می تواند دلیلی نسبی برای توضیح میزان تبخیر بیشتر (در نتیجه تبخیر و تعرق بیشتر) در خاک لوم شنی نسبت به لوم رسی در

ماتریک 20 تا 60 سانتی متر، با کاهش مصرف آب میزان عملکرد افزایش پیدا می‌کند. اگر چه در مکش های پایین تر میزان جذب آب و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق بیشتر می‌باشد ولی اکثرا به دلیل ماندابی و نبودن زهکشی و تخلخل تهویه ای کم و وجود احتمالی تنش تنفسی میزان عملکرد گیاه کم می‌شود و با افزایش مکش ماتریک عملکرد بیشتر می‌شود.

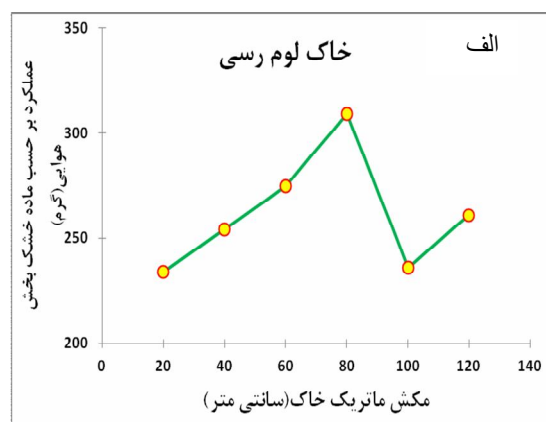
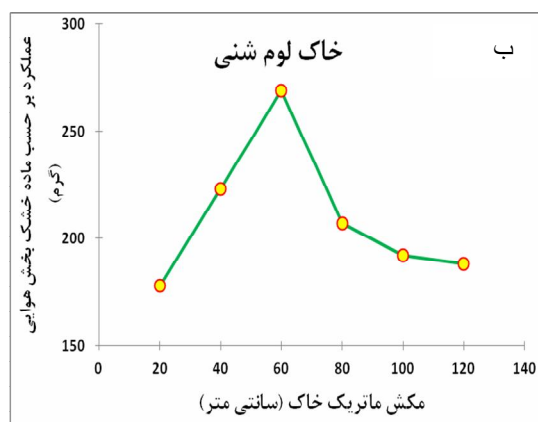
تغییرات عملکرد محصول گیاه ذرت با مکش ماتریک خاک در خاک لوم رسی (شکل 4-ب) مشابه خاک لوم شنی می‌باشد با این تفاوت که بیشترین عملکرد در خاک لوم رسی در مکش ماتریک 80 سانتی متر بوده و برابر با 309/21 گرم در هر گلدان بدست آمد. در واقع خاکهای درشت بافت نسبت به خاکهای ریز بافت در مکش های بالاتر مقدار آب کمتری را در خود حفظ می‌کنند در نتیجه بیشترین عملکرد محصول ذرت در خاک لوم شنی در مکش پایین‌تری نسبت به خاک لوم رسی دیده می‌شود. همچنین به طور کلی در خاک لوم رسی میزان عملکرد گیاه ذرت در تمامی مکش‌های ماتریک یکسان بیشتر از خاک لوم شنی می‌باشد. که بخشی از این امر می‌تواند به دلیل وجود تخلخل کل بیشتر در خاک لوم رسی باشد.

به ترتیب در مکش‌هایی حدود 60 و 85 سانتی متر بیشترین آب قابل جذب برای ریشه گیاه را دارا می‌باشند. و نیز تغییرات F در مقابل مکش ماتریک خاک برای خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم رسی بوده و در خاک لوم شنی با افزایش اندکی مکش (نسبت به مکش متناظر تخلخل تهویه‌ای بحرانی) F برابر 1 می‌شود که این به معنی وجود حداکثر آب قابل جذب برای ریشه در خاک است. یعنی با افزایش اندکی مکش، تخلخل بیشتری نسبت به خاک لوم رسی تخلیه می‌گردد و مشکل تهویه گیاه سریعتر از خاک لوم رسی برطرف می‌گردد.

عملکرد محصول گیاه ذرت در دو نوع بافت لوم

شنی و لوم رسی

شکل 4-الف نشان می‌دهد که عملکرد محصول گیاه ذرت در خاک لوم شنی از مکش ماتریک 20 سانتی متری افزایش یافته و این افزایش تا مکش ماتریک 60 سانتی متر ادامه دارد. بیشترین عملکرد محصول گیاه ذرت در مکش ماتریک 60 سانتی متر و برابر 269/66 گرم ماده خشک بخش هوایی در هر گلدان بوده و بعد از این مکش عملکرد کاهش یافته و به حالت تقریباً ثابتی می‌رسد. در واقع این نمودار تقریباً بر عکس نمودار مصرف آب برای خاک لوم شنی می‌باشد. شکل 3 نشان می‌دهد که از مکش



شکل 4- عملکرد محصول گیاه ذرت بر حسب گرم ماده خشک بخش هوایی در هر گلدان در خاک لوم شنی (الف) و لوم رسی (ب) به

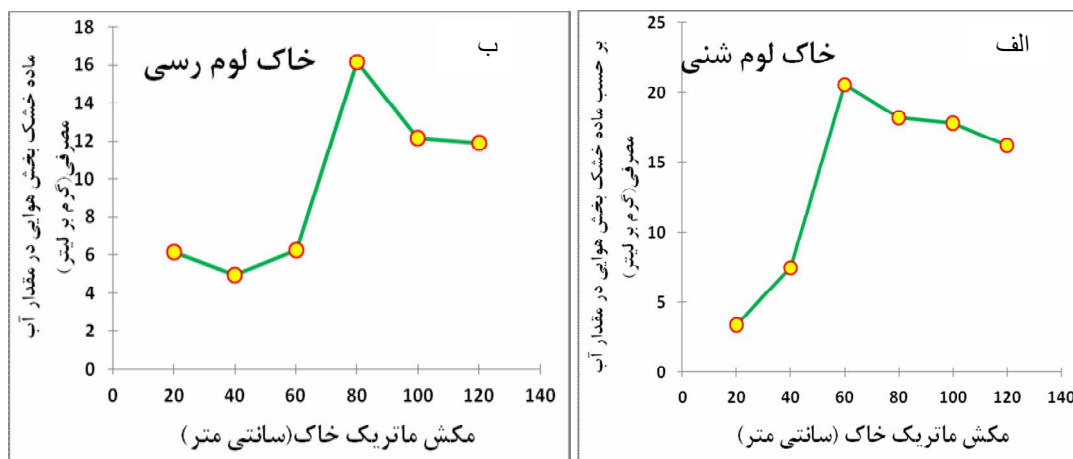
عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک

واقع از مکش ماتریک 60 سانتی متری به طرف مکش 20 سانتیمتر میزان WUE کاهش پیدا می کند. از مکش 60 تا 40 سانتی متر افت ناگهانی WUE دیده می شود و از مکش 60 به سمت مکش 120 سانتی متر کاهش WUE کمتر شده و تقریباً به یک مقدار ثابت می رسد.

مقایسه کارایی مصرف آب گیاه ذرت در دو

نوع بافت لوم شنی و لوم رسی

شکل 5-الف نشان می دهد که در خاک لوم شنی بیشترین کارایی مصرف آب (WUE) در مکش ماتریک 60 سانتی متر اتفاق افتاده است که برابر با 20/5 گرم ماده خشک در لیتر آب مصرفی می باشد. در



شکل 5- کارایی مصرف آب گیاه ذرت بر حسب ماده خشک بر هر لیتر آب مصرفی روزانه در خاک لوم شنی (الف) و لوم رسی (ب) به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک

به دلیل کمبود تخلخل تهویه ای در مکش های ماتریک پایین و نبود زهکشی مناسب و ماندآبی شدن گیاه باشد. براملی و همکاران (2007) نشان دادند که برای بسیاری از گیاهان، کاهش جذب آب به دلیل کمبود اکسیژن معمولاً در 24 ساعت اولیه غرقابی شدن گیاه دیده می شود. این کاهش همچنین در مکش های 20 سانتی متر در خاک لوم شنی (شکل 5-الف) و مکش های 40 و 20 سانتی متر در خاک لوم رسی (شکل 5-ب) دیده می شود. مکش 20 سانتی متر در شکل 5-ب کاهش کمتری نسبت به مکش 40 سانتی متر نشان می دهد که احتمالاً به دلیل تبخیر و تعرق کم و تخلخل تهویه ای بیشتر در مکش 20 سانتی متر در خاک لوم رسی می باشد. در بسیاری از گونه های گیاهان مقاوم به تهویه نیز کاهش زیست توده در شرایط اشباع رطوبتی خاک دیده شده است (پزشکی 1994، کلودز

شکل 5-ب نشان می دهد که در خاک لوم رسی، با افزایش مکش خاک از 20 تا 80 سانتی متر همواره مقدار کارایی مصرف آب (WUE) افزایش می یابد و در مکش 80 سانتی متر به حداکثر مقدار، که برابر با 16/2 گرم ماده خشک در هر لیتر آب مصرفی می باشد، می رسد. از مکش 80 به سمت مکش 120 سانتی متر میزان WUE اندکی کاهش یافته و می توان تغییرات آن را تقریباً ثابت در نظر گرفت. با توجه به شکل 5 در خاک لوم شنی مکش ماتریک 60 سانتی متر و در خاک لوم رسی مکش ماتریک 80 سانتی متر را می توان به عنوان حد بالایی LLWR در گیاه ذرت پیشنهاد نمود، چرا که در این نقاط بیشترین عملکرد گیاه ذرت به ازای واحد مصرف آب دیده می شود. در دو شکل 5-الف و ب افت ناگهانی WUE در مکش های ماتریک 40 و 60 سانتی متر می تواند

1994) به 50 سانتیمتر (وایت 1997) و حتی به 5 سانتیمتر (ژوری و همکاران 1991) تغییر کرده است. رطوبت حجمی متناظر با مکش ماتریک 330 سانتیمتر که با θ_{up-suc} نشان داده می‌شود (لیزلی و فرانزینی 1972) و همچنین برای مکش ماتریک 100 سانتیمتر و مکش ماتریک 50 سانتیمتر که با θ_{up-Nac} نشان داده می‌شود (نقی 1998) و 5 سانتیمتر در جدول 4 برای هر دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی آمده است.

و دلان 1994، کلودز و دلان 1995). رطوبت نظیر مکش های ماتریک 60 و 80 سانتی متر با استفاده از منحنی رطوبتی (شکل 2) تعیین شد. رطوبت حجمی (θ_v) مربوط به مکش ماتریک 60 سانتی متر برای خاک لوم شنی 0/47 و برای خاک لوم رسی در مکش ماتریک 80 سانتی متر 0/52 به دست آمد. بر اساس نتایج محققین مکش ماتریک متناظر با حد بالایی آب قابل دسترس گیاه (AW) در طول سالیان متمادی از مکش ماتریک 330 سانتیمتر (ویهمیر و هندریکسون 1931) به 100 سانتیمتر (داسیلوا و همکاران

جدول 4- رطوبت حجمی (θ_v) و تخلخل تهویه ای (θ_e) متناظر با آن در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک، درون یابی اعداد با استفاده از معادله ونگنوختن (رابطه 3) انجام شده است.

لوم رسی		لوم شنی		مکش ماتریک خاک (سانتی متر آب)
θ_e	θ_v	θ_e	θ_v	
0/00	0/58	0/00	0/51	0
0/00	0/58	0/02	0/49	5
0/01	0/57	0/03	0/48	20
0/03	0/55	0/03	0/48	40
0/03	0/55	0/04	0/47	50
0/04	0/54	0/04	0/47	60
0/06	0/52	0/05	0/46	80
0/07	0/51	0/05	0/46	100
0/08	0/50	0/06	0/45	120
0/16	0/42	0/10	0/41	330
0/34	0/24	0/29	0/22	15000

محمدی و همکاران (2010) که اظهار داشتند که حد بالای آب قابل جذب توسط گیاه (θ_{up-uni}) خاکهای ریز بافت بزرگتر از خاکهای درشت بافت است و نیز نتایج بارتلموس و همکاران. (2008) مطابقت دارد.

بحث

نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین عملکرد محصول گیاه ذرت در خاک لوم شنی و لوم رسی به

جدول 4 مقادیر رطوبت حجمی و تخلخل تهویه ای متناظر با آن در دو نوع خاک لوم رسی و لوم شنی به عنوان تابعی از مکش های ماتریک مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، رطوبت حجمی اشباع برای خاک لوم شنی 0/51 و برای خاک لوم رسی 0/58 می‌باشد. به طور کلی در تمام مکش های ماتریک، خاک لوم رسی θ_v بیشتری نسبت به خاک لوم شنی دارد، که این با نتایج

محتوای رطوبتی در تخلخل تهویه ای $10\%(\theta_{up-afp})$ (برابر $0/41$) و مکش 330 سانتیمتر (θ_{up-suc}) می باشد. ولی با رطوبت حجمی مکش 50 سانتیمتر (θ_{up-Nac}) تقریباً برابر می باشد، ولی بدلیل اینکه مقدار WUE مربوط به این مکش کمتر از WUE به دست آمده در مکش 60 سانتیمتر می باشد بنابراین می توان نتیجه گرفت که در مکش 50 سانتیمتر نیز هدر رفت آب وجود داشته است. این نتیجه با یافته های محمدی و همکاران (2010) مطابقت دارد که حد بالای آب قابل جذب توسط گیاه را (θ_{up-uni}) در خاک لوم شنی برای حد وسیعی از گیاهان بزرگتر از θ_{up-suc} و θ_{up-Nac} و θ_{up-afp} به دست آوردند و گزارش نمودند که این سه حد رطوبتی بیانگر مناسبی از حد بالایی LLWR نمی باشند. در خاک لوم رسی نیز رطوبت حجمی مربوط به مکش 80 سانتیمتر که برابر با $0/52$ می باشد (جدول 4) بزرگتر از محتوای رطوبتی در تخلخل تهویه ای $10\%(\theta_{up-afp})$ (مکش 160 سانتیمتر نظیر با رطوبت $0/48$) می باشد. این نتایج مغایر با نتایج به دست آمده توسط ویهمایر و هندریکسون (1931)، داسیلوا و همکاران (1994)، وایت (1997) و ژوری و همکاران (1991) است که حد بالایی آب قابل جذب توسط گیاه را به ترتیب برابر 300 (θ_{up-suc}) ، 100، 50 (θ_{up-Nac}) و 5 سانتیمتر در نظر گرفتند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که اگر θ_{up-suc} و θ_{up-Nac} و θ_{up-afp} به عنوان حد بالایی LLWR در مدل های برنامه ریزی آب خاک و آبیاری استفاده شود ممکن است منجر به برآورد نادرست آب قابل دسترس برای گیاه ذرت شود. با بسط نتایج حاصل به شرایط مزرعه ای می توان دور آبیاری را به صورت دقیق تر برای گیاه ذرت در خاکهای مشابه محاسبه نمود.

ترتیب در مکش های 60 و 80 سانتی متر (مقدار رطوبت حجمی $0/47$ و $0/52$) تولید شده است و نیز حداکثر تولید محصول به ازای واحد مقدار آب مصرف شده توسط گیاه در این مکش ها صورت گرفته است. مطابق این تحقیق هرچند می توان نتیجه گرفت که شروع جذب آب توسط گیاه از این مکش می باشد، ولی باید توجه داشت اغلب به دلیل زهکشی در مزرعه بخشی از این رطوبت از دسترس گیاه خارج می شود. تخلخل تهویه ای نظیر با مکشی ماتریکی که حداکثر عملکرد را موجب شده است، به ترتیب برابر $0/04$ و $0/06$ برای خاک لوم شنی و لوم رسی بدست آمد. در واقع این مقادیر به عنوان رطوبت بهینه و تخلخل تهویه ای بحرانی θ_e برای گیاه ذرت پیشنهاد شدند. این تخلخل تهویه ای بحرانی تقریباً برابر با تخلخلی است که توسط بارتلموس و همکاران (2008) به عنوان حدی که در آن حداکثر جذب صورت می گیرد در نظر گرفته شده است. آنها با استفاده از یک سری مدل های هیدرولیکی و فیزیولوژیکی، برای خاک رسی سبک و لوم شنی تخلخل تهویه ای حدود $0/028$ و $0/042$ به ترتیب برای خاک رسی سبک و لوم شنی برآورد نمودند. این مطالعه تایید تجربی بر تخمین و مدلسازی عددی محققین مذکور می باشد. بر اساس این یافته تخلخل تهویه ای بحرانی عبارت است از حداقل مقداری از تخلخل تهویه ای که در آن مشکل تهویه ای برای گیاه وجود ندارد. در واقع رطوبت تخلخل تهویه ای بحرانی برای تامین آب قابل جذب برای گیاهان به نوع خاک و گیاه بستگی دارد.

رطوبت حجمی خاک لوم شنی در مکش 60 سانتیمتر برابر با $0/47$ می باشد که این مقدار بزرگتر از

منابع مورد استفاده

1. Bybordi, M.2000. Principals of irrigation engineering.1. Soil and water relations. University of Tehran Press. 1672.pp 670.

2. Aust, W M., J. A. Burger, E. A. Carter., D. P. Preston., and S. C. Patterson .1998. Visually determined soil disturbance classes used as indices of forest harvesting disturbance. *South . J. Appl For* 22:245-250.
3. Bartholomeus, R. P., Witte, P. J. M., van Bodegom, P. M. van Dam J. C. and Rien Aerts. R. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360:147– 165.
4. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J*, 54: 464-465.
5. Bramley, H. Turner, D. W. Tyerman, S. D. and Turner, N. C. 2007. Water flow in the roots of crop species: the influence of root structure, aquaporin activity, and waterlogging. *Adv Agron* 96:134–196.
6. Colman, E. A. 1947. A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. *Soil Sci.* 63:277. 6.
7. da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. 1994. Factors influencing the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1775–1781.
8. Goh, T.B., Arnaud, R.J. and Mermut, A.R. 1993. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton. 177–180.
9. Hupet F, Lambot S ., Feddes R.A , Van Dam J.C. , Vanclooster M .2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resour Res* 39:1312, doi:10.1029/2003WR002046.
10. Jury, W. A., Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. *Soil physics*. 5th edn (John Wiley and Sons Inc.: New York)
11. Kirkham, M. B. 2005. *Principles of soil and plant water relations*. Elsevier, Amsterdam.
12. Kludze, H.K. and DeLaune, R.D. 1994. Methane emission and growth of *Spartina patens* in response to soil redox intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1838–1845.
13. Kludze, H.K. and DeLaune, R.D. 1995. Straw application effects on Methane and oxygen exchange and growth in rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 824–830.
14. Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2 nd Ed. Agron. Monog. 9.ASA/SSSA, Madison, WI. PP. 635-662.
15. Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical SSSA, Madison, WI*, PP. 687-732.
16. Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:277–294.
17. Linsley, R. K. and Franzini, L. B. 1972. *Water resources engineering*. McGraw-Hill, New York.
18. Miller, E. E. and Klute, A. 1967. The dynamics of soil water. I: Mechanical forces. Irrigation of agricultural lands. In Hagan RM et al (ed). *Am Soc Agron*, Madison, Wisconsin.
19. Mohammadi, H. M., Asadzadeh, F. and Vanclooster, M. 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant and soil*. 334:221–234
20. DOI 10.1007/s11104-010-0377-3
21. Nachabe, M. H. 1998. Refining the definition of field capacity in the literature. *J. Irrigation Drainage Eng.* 124: 230–232.

22. Nelson, D.W. and Sommer, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties*. ASA Monograph, 9 (2). American Society of Agronomy., Madison. 539–579.
23. Ouyang, Y. and Boersma, L. 1992. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: II. Model simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1702–1710.
24. Pezeshki, S. R. 1994a. Plant responses to flooding. In: Wilkinson, R.E. (Ed.), *Plant-Environment Interactions*. Marcel Dekker, New York, pp. 289–321.
25. Pierce, F. J., Larson, W. E., Dowdy, R. H. and Graham, W. A. P. 1983. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*. 38:39-44.
26. Ponnamperna, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* Vol. 24.
27. Siegel-Issem, C. M., Burger, J. A., Powers, R. F., Ponder, F. and Patterson, S. C. 2005. Seedling Root Growth as a Function of Soil Density and Water Content. *Soil Science Society of America Journal*. 69: 215-226.
28. Schaffer, B., Andersen, P.C. and Ploetz, R.C. 1992. Responses of fruit crops to flooding, p. 257–313. In: J. Janick (ed.). *Horticultural reviews*. vol. 13. Wiley, New York.
29. Taylor, S. A., and Ashcroft, G. L. 1972. *Physical Edaphology: The Physics of Irrigated and Nonirrigated Soils*. W.H. Freeman: San Francisco.
30. van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44: 892-898.
31. van Genuchten M Th .1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, Research Report No 121, U.S. Salinity Lab, ARS USDA, Riverside, CA.
32. van Genuchten, M. Th., Leij F. J. and Yates S. R..1991.The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
33. van Genuchten M Th , Hoffman G J .1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: *Soil salinity under irrigation. Ecological. Studies. I. Shainberg and J. Shalhevet .Eds...Springer-Verlag.* pp 258-271.
34. Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science* 32:181 -193.
35. Viets, F. G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Adv. Agron*, 14:223-264
36. Wesseling, J. and van Wijk, W. R. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: Luthin JN (ed) *Drainage of agricultural lands*. American Society of Agronomy, Madison, isconson.
37. White, R. E. 1997. *Principles and practice of soil science. The soil as a natural resource.* 3rd Edn(Black well Science: Carlton, Vic.)