مکانیک خاکهای غیر اشباع
(مکانیک خاکهای اشباع چند جزئی)
آزمایشات

Unsaturated soils Experiments

Hasan Ghasemzadeh

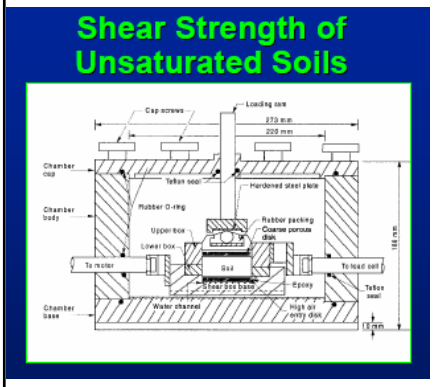
فهرست عناوین و فصول

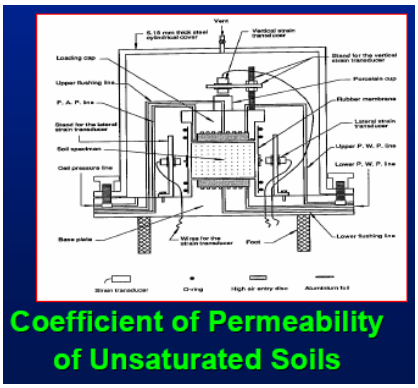
۱- مقدمه – آشنایی – مختصری از ترمودینامیک
۲-رفتار فازهای مختلف درخاک غیر اشباع
۳- اندازه گیری در خاک غیر اشباع
۴-نتایج آزمایشات خاک غیر اشباع
۵- تنش موثر و کرنش
۶- تئوری های خاک غیر اشباع
۷- جریان در خاک غیر اشباع
۸- کاربرد خاک غیر اشباع در مهندسی

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Shear Test

Permeability Test



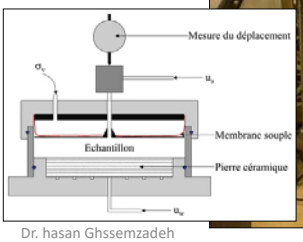


Dr. hasan Ghssemzadeh 3

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Triaxial Test

Oedometer Test



Dr. hasan Ghssemzadeh 4

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Total Suction & Matric Suction

$$Matric\ suction = P_a - P_w$$

$$Osmotic\ suction \quad P_{os} = RT(C_2 - C_1)$$

Relative Humidity
Kelvin's Equation

$$h = \exp(\frac{\psi g}{RT})$$

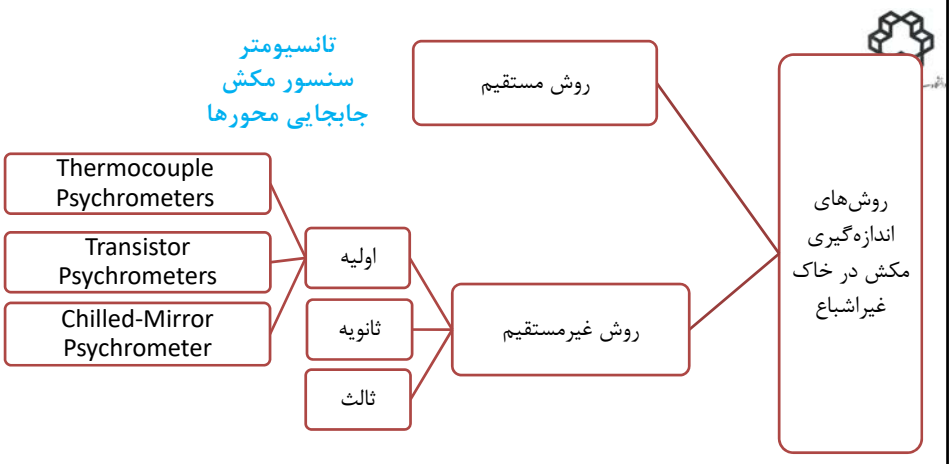
$$Total\ suction$$

$$(\psi_{os} = P_{os} / \gamma_w)$$

Total Suction
=
Matric Suction
+
Osmotic Suction

Dr. hasan Ghssemzadeh 5

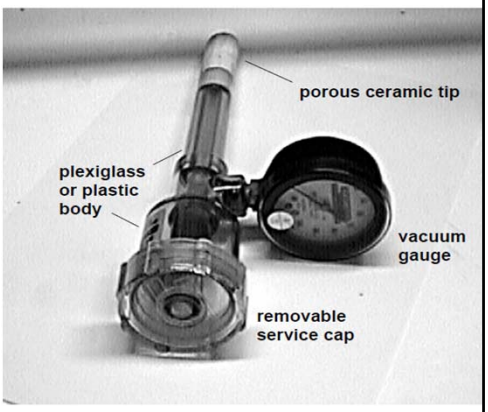
اندازه گیری مکش در خاک غیر اشباع



Dr. hasan Ghssemzadeh 6

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

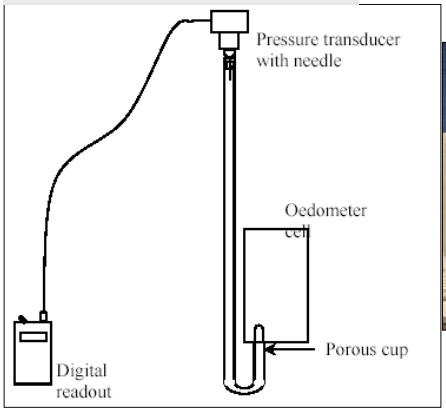
Direct Suction Measurement Technique



Dr. hasan Ghssemzadeh 7

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

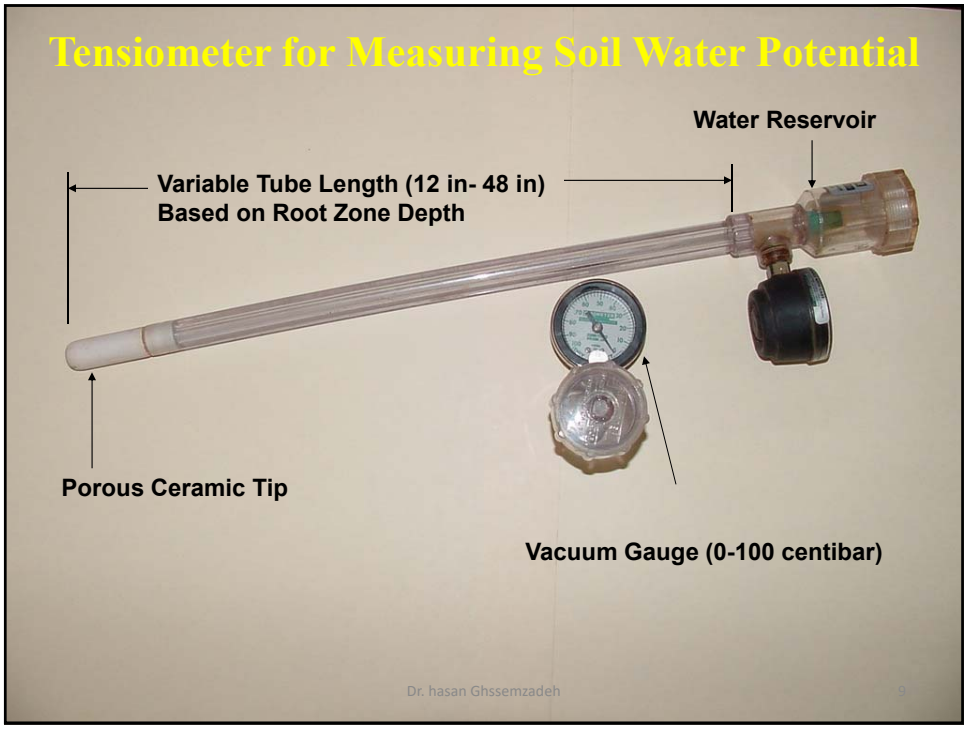
Tensiometer

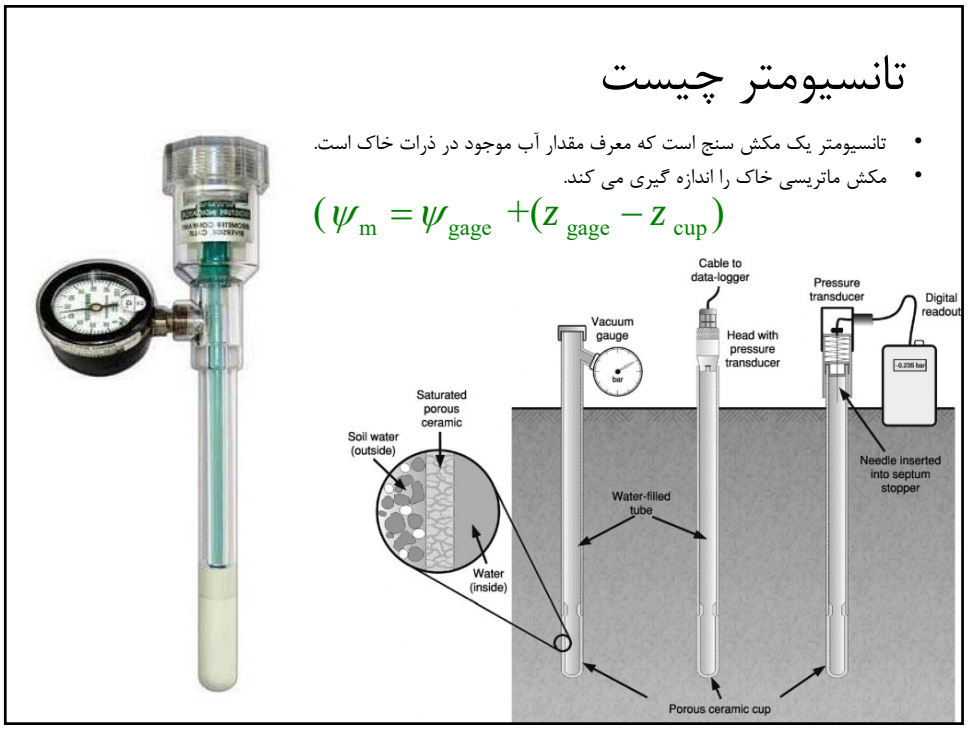


Sketch of a tensiometer-pressure transducer for measuring matric suction.

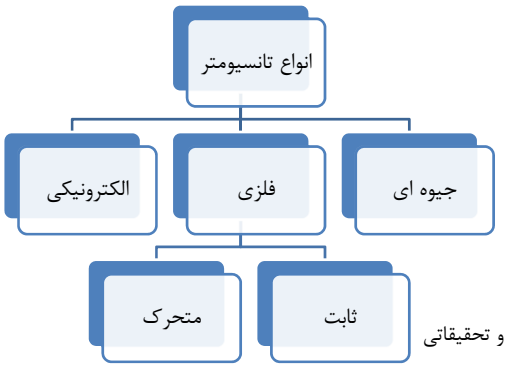
Measurement Range:
0 – 100 kPa
Equilibration Time:
Hours

Dr. hasan Ghssemzadeh 8


Tensiometer for Measuring Soil Water Potential
Water Reservoir
Variable Tube Length (12 in- 48 in)
Based on Root Zone Depth
Porous Ceramic Tip
Vacuum Gauge (0-100 centibar)
Dr. hasan Ghssemzadeh


تانسیومتر چیست
تانسیومتر یک مکش سنج است که معرف مقدار آب موجود در ذرات خاک است.
مکش ماتریسی خاک را اندازه گیری می کند.
$(\psi_m = \psi_{gage} + (z_{gage} - z_{cup})$
Cable to data-logger
Pressure transducer
Digital readout
Vacuum gauge
Head with pressure transducer
Saturated porous ceramic
Soil water (outside)
Water (inside)
Water-filled tube
Needle inserted into septum stopper
Porous ceramic cup

انواع تانسیومتر



بر اساس نوع خلا سنج

تانسیومترهای جیوه ای: بیشتر در کارهای آزمایشگاهی و تحقیقاتی

تانسیومتر فلزی : در سایت به دلیل حمل و نقل آن آسان

تانسیومتر الکترونیکی مشابه تانسیومتر فلزی ولی از خلاء سنج الکترونیکی استفاده میگردد.

تانسیومتر پلیمری(POT): استفاده از محلول پلیمری به جای آب - با حساسیت کمتر نسبت به تغییر درجه جرارت

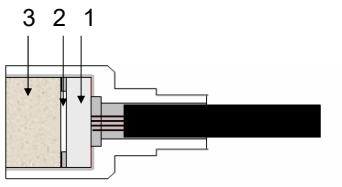
تانسیومتر دی‌هدرال : محدوده مکش قابل اندازه گیری بیشتر از تانسیومتر متداول است

Dr. hasan Ghssemzadeh 11

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Direct Suction Measurement Technique

- Tensiometer
  - – Matric suction



1 – Pressure transducer;
2 – Water reservoir;
3 – Ceramic disc with high air entry value.

- Direct measurement

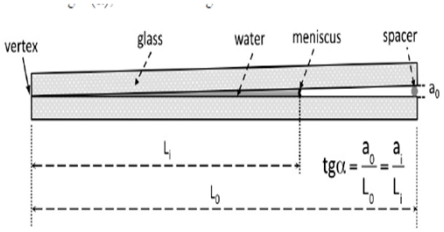
در مقادیر بیشتر از ۱۰۰کیلو پاسکال کاویتاسیون رخ میدهد . زمان تعادل در حد ساعت است

Lourenço et al., 2006

Dr. hasan Ghssemzadeh 12

تانسیومتر dihedral

- محدوده ی اندازه گیری در این دستگاه ۰ تا ۱۶۰ kPa است
- در این دستگاه ۲صفحه صاف مستطیلی شیشه ای یا یک صفحه شیشه ای و یک صفحه متخلخل با زاویه ای که زاویه dihedral نامیده میشود به هم متصل شدخ اند
- کشش آب درون خاک تابعی است از فاصله ی هلال آب تا محور دستگاه بعد از ایجاد تعادل
- $T=-2\sigma / L*\tan\alpha$
- زمان پاسخ دهی در این دستگاه ۲-۱۵ دقیقه است



Dr. hasan Ghssemzadeh 13

Suction measurement – Tensiometer

- Tensiometer
  - Direct contact

Experimental set up for the continuous drying tests
Lourenço et al., in press 2007

Dr. hasan Ghssemzadeh 14

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

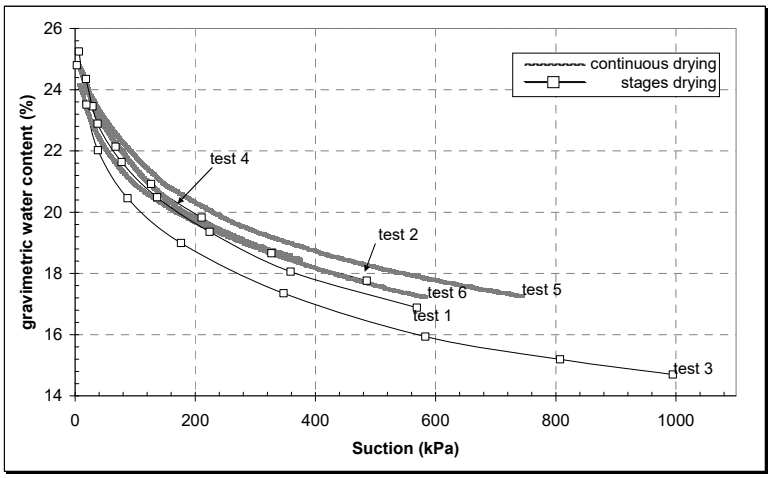
Suction measurement – Tensiometer

- Tensiometer
  - Direct contact

Test no.	Drying procedure	e_i	w_i [%]	w_f [%]	ΔM_w [g]	s_{max} [kPa]	Δt [h]
1	Stages	0.59	24.35	16.88	29.3	568.6	148.8
2		0.55	24.80	17.76	33.5	485.5	114.5
3		0.54	25.25	14.70	42.5	995.0	171.9
4	Continuous	0.52	24.70	18.37	26.0	376.0	25.1
5		0.56	24.76	17.25	30.0	745.2	32.5
6		0.55	24.17	17.23	27.9	584.6	28.44

e_i initial void ratio,
w_i initial water content,
w_f final water content,
ΔM_w mass of water evaporated,
s_{max} maximum suction of water retention curve,
Δt test duration.

Suction measurement – Tensiometer



اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Indirect Suction Measurement Techniques

Primary Methods
- **Thermocouple Psychrometers**
- **Transistor Psychrometers**
- **Chilled-Mirror Psychrometer**

Secondary Method
- **Filter Paper Method**

Tertiary Methods
- **Thermal Conductivity Sensors**
- **Electrical Conductivity Sensors**

Total Suction
=
Matric Suction
+
Osmotic Suction

Primary Methods
Total Suction
Secondary Method
Total Suction and Matric Suction
Tertiary Methods
Matric Suction

Dr. hasan Ghssemzadeh 17

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Thermocouple Psychrometers

(Peltier Type Psychrometer)
- **Seebeck Effect (جریان برق سبب جریان حرارت می شود)**
- **Peltier Effect (جریان حرارت سبب جریان برق می شود)**

Relative Humidity
Kelvin's Equation

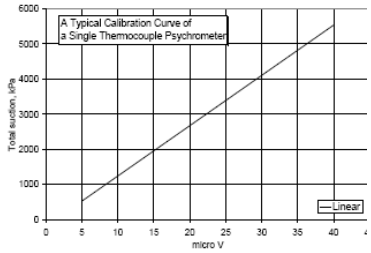
$$\psi = -\frac{RT}{V}\ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

Dr. hasan Ghssemzadeh 18

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Thermocouple Psychrometers

Calibration
- **Salt Solutions (NaCl)**
- **Constant Temperature**



Osmotic Suction

$$\pi = \nu RTm\phi$$

Measurement Range:
300 – 7000 kPa
Equilibration Time:
One Hour

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Thermocouple Psychrometers

Osmotic Suction of NaCl Solutions at 25°C

Molality (m)	Osmotic Coefficient (ϕ)	Osmotic Suction (kPa)	Molality (m)	Osmotic Coefficient (ϕ)	Osmotic Suction (kPa)
0.000	1.00000	0.00	0.300	0.92123	1370.19
0.002	0.98402	9.76	0.500	0.92224	2286.15
0.005	0.97604	24.20	0.700	0.92691	3216.82
0.010	0.96804	47.99	0.900	0.93350	4165.31
0.020	0.95832	95.02	1.200	0.94567	5626.15
0.050	0.94357	233.90	1.600	0.96487	7653.84
0.100	0.93250	462.32	2.200	0.99818	10887.35
0.200	0.92387	916.08	2.600	1.02263	13182.03

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Thermocouple Psychrometers

Dataloggers:

HR-33T

Thermocouple Psychrometers

فشار بخار محلول بیشتر از رطوبت هوا

تبخیر

خنک شدن محلول

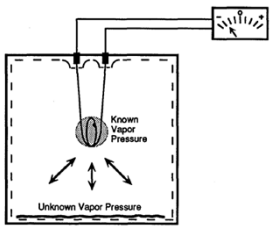
ولتاژ تولید شده کم

فشار بخار محلول کمتر از رطوبت هوا

میعان

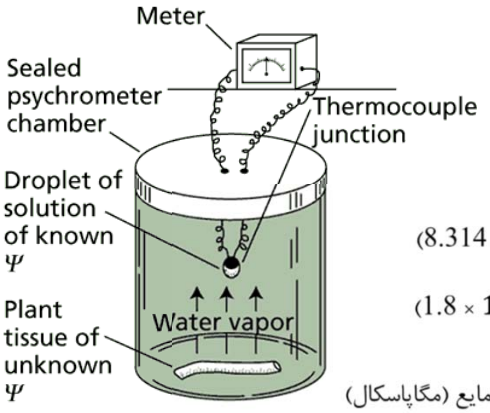
گرم شدن محلول

ولتاژ تولید شده زیاد



قرار دادن محلولی با فشار بخار معلوم ساده‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت هوا

Thermocouple Psychrometers



$$\psi = -\frac{RT}{V}\ln\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

Ψ : مکش کل (مگاپاسکال)
R : ثابت جهانی گازها ($8.314\ \mathrm{J\ mol^{-1}K^{-1}}$)
T : درجه حرارت (کلوین)
V : حجم مولی آب ($1.8 \times 10^{-5}\mathrm{m^3 mol^{-1}}$)
$\frac{P}{P_0}$: رطوبت نسبی
P : فشار بخار واقعی هوا در تعادل با فاز مایع (مگاپاسکال)
P_0 : فشار بخار اشباع در دمای T (مگاپاسکال)

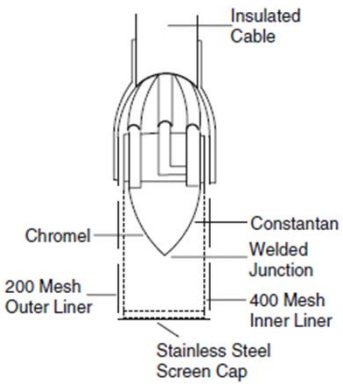
Dr. hasan Ghssemzadeh 23

Thermocouple Psychrometers

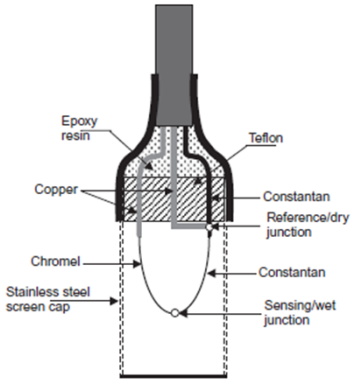
انواع سنسور

Peltier پلتیر

Wet-loop حلقه تر



(Bulut & Leong, 2009)



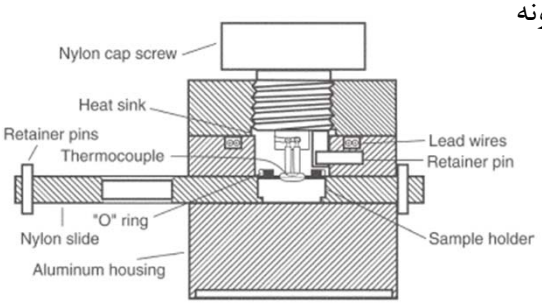
(Anon 2011)

Dr. hasan Ghssemzadeh 24

Thermocouple Psychrometers

دستگاه آزمایش

شکل شماتیک محفظه نمونه



(AndraskiScanlon)

اندازه‌گیری مکش کل
در آزمایشگاه

Thermocouple Psychrometers

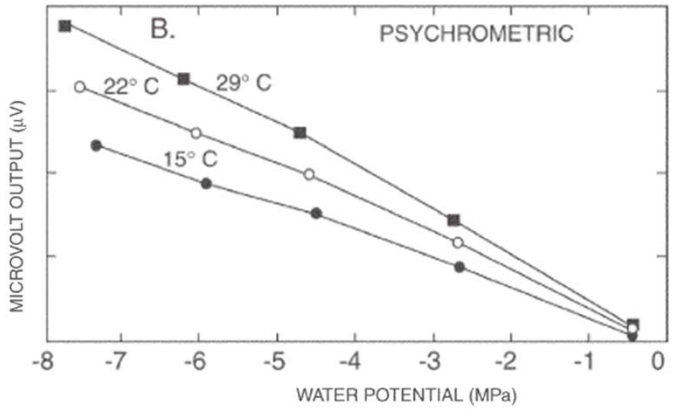
کالیبراسیون سنسورها

استفاده از محلول‌های سدیم‌کلراید (NaCl) و پتاسیم‌کلراید (KCl) با مکش اسمزی معلوم

Molality	Temperature 0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25° C	30°C	35°C	40°C
	Mpa								
0.05	−0.214	−0.218	−0.222	−0.226	−0.230	−0.234	−0.238	−0.242	−0.245
0.1	−0.423	−0.431	−0.439	−0.447	−0.454	−0.462	−0.470	−0.477	−0.485
0.2	−0.836	−0.852	−0.868	−0.884	−0.900	−0.915	−0.930	−0.946	−0.961
0.3	−1.247	−1.272	−1.297	−1.321	−1.344	−1.368	−1.391	−1.415	−1.437
0.4	−1.658	−1.693	−1.727	−1.759	−1.791	−1.823	−1.855	−1.886	−1.917
0.5	−2.070	−2.115	−2.158	−2.200	−2.241	−2.281	−2.322	−2.362	−2.402
0.6	−2.484	−2.539	−2.593	−2.644	−2.694	−2.744	−2.794	−2.843	−2.891
0.7	−2.901	−2.967	−3.030	−3.091	−3.151	−3.210	−3.270	−3.328	−3.385
0.8	−3.320	−3.398	−3.472	−3.543	−3.612	−3.682	−3.751	−3.818	−3.885
0.9	−3.743	−3.832	−3.917	−3.998	−4.079	−4.158	−4.237	−4.314	−4.390
1.0	−4.169	−4.270	−4.366	−4.459	−4.550	−4.640	−4.729	−4.815	−4.901
1.1	−4.599	−4.713	−4.820	−4.924	−5.026	−5.127	−5.226	−5.322	−5.418
1.2	−5.032	−5.160	−5.278	−5.394	−5.507	−5.620	−5.730	−5.835	−5.941
1.3	−5.470	−5.611	−5.742	−5.869	−5.994	−6.119	−6.239	−6.354	−6.471
1.4	−5.912	−6.068	−6.210	−6.350	−6.487	−6.623	−6.754	−6.880	−7.006
1.5	−6.359	−6.529	−6.684	−6.837	−6.986	−7.134	−7.276	−7.411	−7.548
1.6	−6.811	−6.996	−7.163	−7.330	−7.491	−7.652	−7.805	−7.950	−8.097
1.7	−7.260	−7.460	−7.640	−7.820	−8.000	−8.170	−8.330	−8.490	−8.650
1.8	−7.730	−7.940	−8.130	−8.330	−8.520	−8.700	−8.880	−9.040	−9.210
1.9	−8.190	−8.430	−8.630	−8.840	−9.040	−9.240	−9.430	−9.600	−9.780
2.0	−8.670	−8.920	−9.130	−9.360	−9.570	−9.780	−9.980	−10.16	−10.35

مکش اسمزی محلول NaCl
بر حسب غلظت و درجه حرارت

Thermocouple Psychrometers



(AndraskiScanlon)

Dr. hasan Ghssemzadeh 27

Thermocouple Psychrometers

محدوده‌ی کاربرد

توانایی اندازه‌گیری مکش کل بین حدود 300 تا 70,000 کیلوپاسکال

دقت بسیار بالا برای بررسی مکش کل در محدوده 300 تا 500 کیلوپاسکال

مشکلات این روش

تاثیر زیاد تغییرات اندک رطوبت نسبی فاز گاز خاک در محدوده مورد نظر

امکان ایجاد خطاهای زیاد در تعیین مکش به دلیل اختلافات درجه حرارت در سیستم سنسور- نمونه

Dr. hasan Ghssemzadeh 28

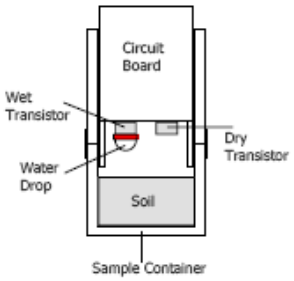
اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Transistor Psychrometer

Working principle is very similar to the Peltier psychrometer

Differences:

- **Manually applied water drop**
- **Transistors**



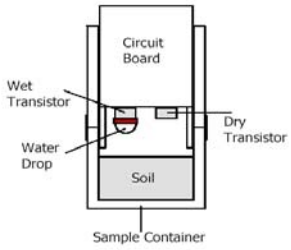
Probe

Dr. hasan Ghssemzadeh 29

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Psychrometer

– Total suction



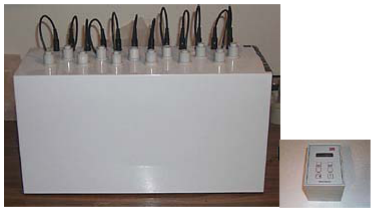
Psychrometer probe (Bulut & Leong, 2005)

Dr. hasan Ghssemzadeh 30

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Transistor Psychrometer

12-Probe Unit **8-Probe Unit**



Datalogger

Measurement Range:
100 – 10000 kPa
Equilibration Time:
One Hour

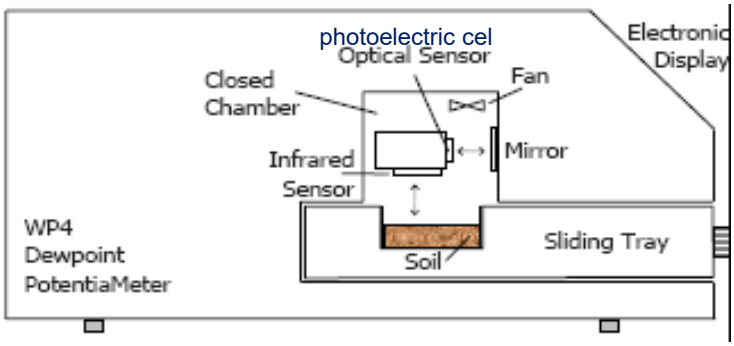
Dr. hasan Ghssemzadeh 31

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Chilled-Mirror Psychrometer

Working Principle:
Chilled Mirror
Dew Point Technique

Measurement Range 500 – 450000 **kPa**
Equilibration Time : 10 minutes



دستگاه‌های WP4 شامل:
یک محفظه برای قرارگیری نمونه درون آن،آینه، فن، سنسور نقطه‌ی شبنم، سنسور دما و یک گرماسنج مادون قرمز است

Dr. hasan Ghssemzadeh 32

Chilled-Mirror Psychrometer

Decagon Devices

- در واقع پتانسیل آب اندازه‌ای از سطح انرژی آب در سیستم است و نشان دهنده‌ی قدرت پیوند بین مولکول‌های آب است. پتانسیل آب فشاربخار هوای در تعادل با نمونه در یک محفظه‌ی بسته است.

- آینه مورد استفاده در این‌جا باید از موادی ساخته شده‌باشد که قابلیت رسانایی حرارتی خوبی داشته باشند، مانند: نقره و مس. همچنین کاملا با موادی مانند: روبیدیوم، ایریدیوم، نیکل و طلا پوشانده شود تا از تیره‌گی و اکسیداسیون آن جلوگیری شود.

Dr. hasan Ghssemzadeh 33

Chilled-Mirror Psychrometer

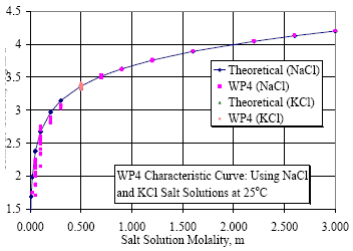
- نمونه در تعادل با فضای بالای محفظه آینه و سیستم ردیابی میعان بر روی آینه قرار می‌گیرد.
- دمای آینه به طور دقیق توسط خنک کننده‌ی ترموالکتریکی (peltier) کنترل می‌شود.
- یافتن نقطه‌ای که برای اولین بار میعان بر روی آینه ظاهر می‌شود توسط Photoelectric cell صورت می‌گیرد.
- پرتوی از نور به آینه برخورد کرده و به photoelectric cell بازتاب می‌شود، تغیرات صورت گرفته در نور بازتابی که در زمان میعان بر روی آینه رخ می‌دهد را برداشت می‌کند. ترموکوپلی که به آینه ضمیمه شده دما در زمان میعان را ضبط می‌کند . سپس دستگاه با فلاش زدن و یا بوق علامت می‌دهد و در انتها نیز پتانسیل نهایی آب و دمای نمونه بر روی نمایشگر ظاهر می‌شود.
- در وضعیت تعادل رطوبت نسبی هوای درون محفظه برابر با رطوبت نسبی نمونه خاک است.
- آینه تا زمان رسیدن به نقطه‌ی شبنم توسط thermoelectric cooler سرد می‌شود.
- گرماسنج مادون قرمز وظیفه‌ی اندازه‌گیری دمای نمونه را بر عهده دارد.

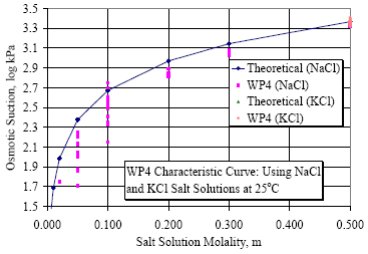
Dr. hasan Ghssemzadeh 34

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Chilled-Mirror Psychrometer

Characteristic Curve





Measurement Range:
500 – 30000 kPa
Equilibration Time:
10 Minutes

Dr. hasan Ghssemzadeh 35

Chilled-Mirror Psychrometer

مزایا

1. **بیش‌ترین دقت در اندازه‌گیری را در مقایسه با ابزار مشابه دارد.**
2. **در صورت آلودگی دستگاه، به سرعت قابل پاکسازی است.**
3. **کالیبراسیون دستگاه مدت زیادی پایدار می‌ماند.**
4. **سریع و آسان است**

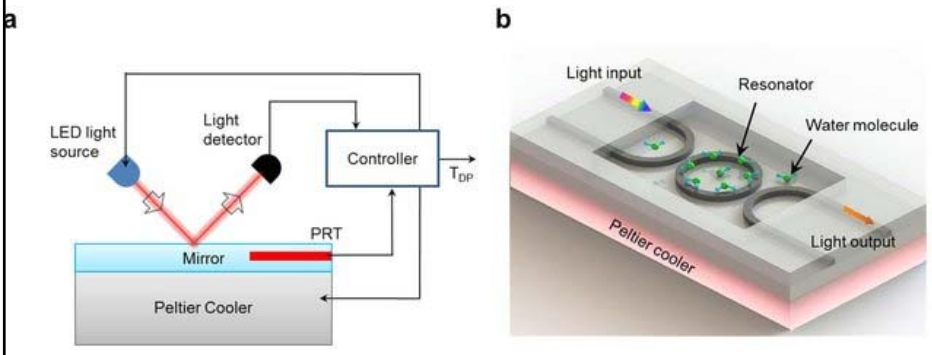
معایب

۱- در محل امکان آزمایش وجود ندارد

۲- محدودیت محدوده مکش وجود دارد

Dr. hasan Ghssemzadeh 36

Integrated photonics DPS based on photonics resonator cavity

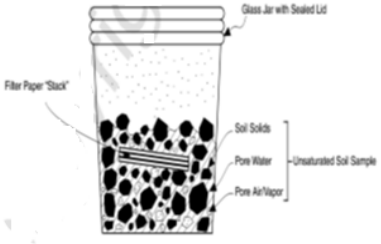


(a) Conventional " chilled-mirror " dew point hygrometer.
(b) Integrated photonics DPS based on a photonics resonator cavity. The resonator acts as a " chilled-mirror " and a thermometer simultaneously

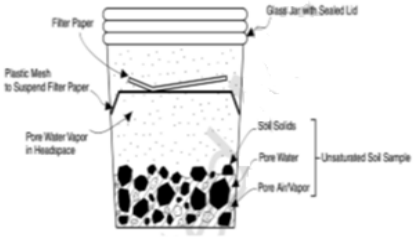
An ultrahigh-accuracy Miniature Dew Point Sensor based on an Integrated Photonics Platform (2016)

Filter Paper Method

- طبق استاندارد ASTM D5298 بسته به نحوه قرارگیری کاغذ فیلتری دو نوع اندازه گیری می توان نمود:



مکش بافتی



مکش کل

بعد از تعادل مقدار آب موجود در کاغذ را اندازه می گیرند و سپس از طریق منحنی کالیبراسیون میزان مکش موجود در خاک را اندازه می گیرند.

Filter Paper Method

نمونه‌های فیلتر کاغذی

نوع کاغذ فیلتر	قطر cm	ویژگی
Whatman #40	12.5	نسبتا ریز، حفرات ۸ میکرون، بدون خاکستر
Whatman #44	12.5	ریز، حفرات ۳ میکرون، بدون خاکستر
Whatman 541	9	درشت، حفرات۲۲ میکرون، مقاوم در برابر اسید و فشار بالا، بدون خاکستر
ممبران فیلتر سر سرنگی	1.3	ساخت انگلستان، حفرات ۰/٤٥ میکرون
فایبر گلاس	3.7	ساخت آمریکا، بسیار ریز، حفرات ۰/۳ میکرون
Schliecher & Schuell #589.3	15	ساخت آلمان، ریز، حفرات ۲ میکرون، بدون خاکستر
Schliecher & Schuell #589.1	15	ساخت آلمان، درشت، حفرات ۱۲ تا ۲۵ میکرون، بدون خاکستر
Whatman Fiber Glass (GF/A)	12.5	بسیار ریز، حفرات ۱/٦ میکرون

Dr. hasan Ghssemzadeh 11

✓ مراحل انجام آزمایش

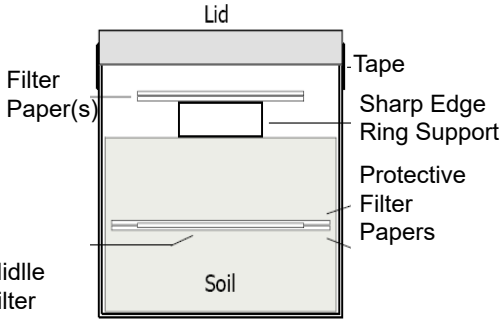
Dr. hasan Ghssemzadeh 30

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

Non-Contact Method – Total Suction

Contact Method – Matric Suction

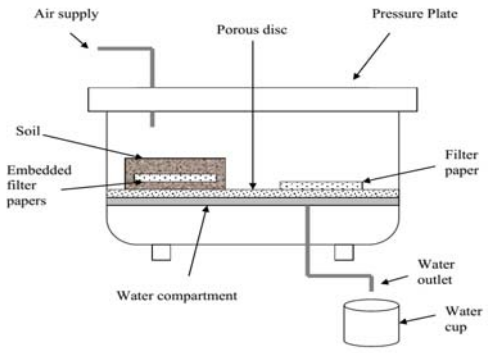


Moisture (suction) equilibrium between filter papers and soil
- **Constant Temperature**
- **In Closed Container**

Midlle Filter Papers

نحوه کالیبراسیون

1. استفاده از محلول های NaCl با غلظت صفر تا ۲/۷مولالیته. که دارای مکش های مشخص هستند
2. برای مقادیر مکش کمتر از ۲/۵ pF از صفحه های فشار یا تانسیومتر استفاده می کنند .

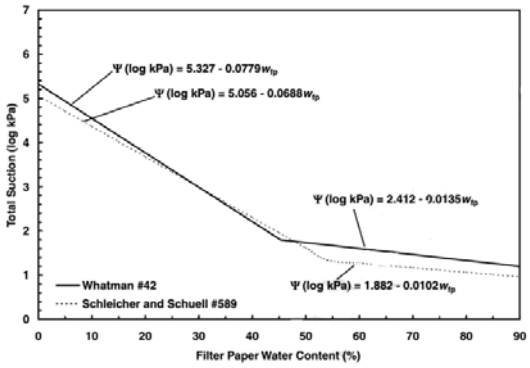


Suction in pF = Log kPa +1

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

Calibration Curves



Suction in pF = Log kPa +1

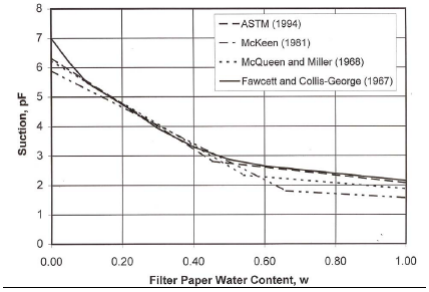
Filter paper	*log kPa* ($\log_{10}(\lvert$ *suction in kPa* $\rvert)$)	*pF* ($\log_{10}(\lvert$ *suction in cm of water* $\rvert)$)
Schneider & Schuell No. 589-WH	$\lvert h\rvert = 5.4246 - 8.247w$	$\lvert h\rvert = 6.3662 - 8.2414w$
	$R^2 = 0.9969$	$R^2 = 0.9899$
	$(1.5 < \lvert h\rvert < 4.15)$	$(h > 2.5\,pF)$

- بیشترین مقدار مکش در pF=7 رخ می دهد که مربوط به رس خشک شده در فر در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد می باشد.

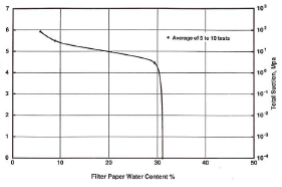
اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

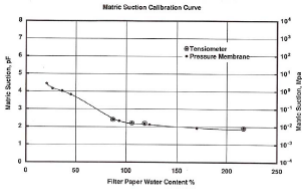
Calibration Curves
Non-Contact Method – Salt Solutions (also called Total Suction Curve)
Contact Method – Pressure Plate Type Devices (also called Matric Suction Curve)



Houston et al. 1994



Total Suction

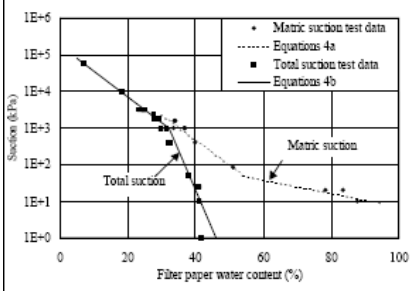


Matric Suction

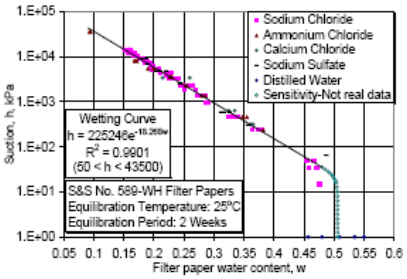
اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

Recent Calibration Curves for Schleicher & Schuell No. 589-WH



Leong et al. 2002

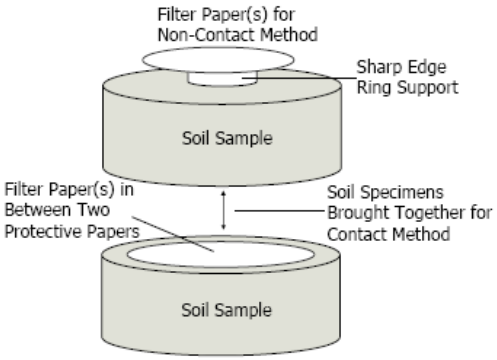


Bulut & Wray 2005

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

Soil Total and Matric Suction Measurements

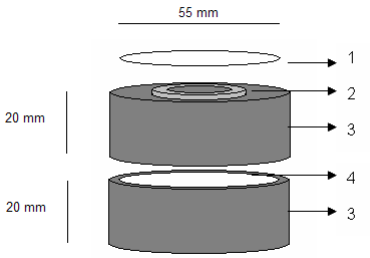


Measurement Range:
50 – 30000 kPa
Equilibration Time:
5 to 14 days

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

- Filter paper:
  - Matric suction
  - Total suction
- Bulut Filter Paper Suction Measurement Demonstration (2003)



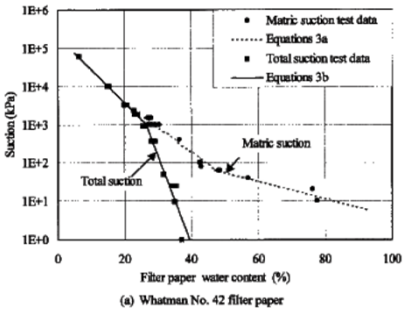
1 – non contact filter paper (total suction);
2 – ring to prevent contact;
3 – soil sample;
4 – contact filter paper (matric suction).

Dr. hasan Ghssemzadeh 47

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Filter Paper Method

- Filter paper calibration curves:



For Whatman No. 42 filter paper,

Matric suction: $\log \Psi = 2.909 - 0.0229 w_f \quad w_f \geq 47$

$\log \Psi = 4.945 - 0.0673 w_f \quad w_f < 47$

Total suction: $\log \Psi = 8.778 - 0.222 w_f \quad w_f \geq 26$

$\log \Psi = 5.31 - 0.0879 w_f \quad w_f < 26$

Leong et al., 2002

Dr. hasan Ghssemzadeh 48

اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Suction measurement – Filter paper

Matric suction values

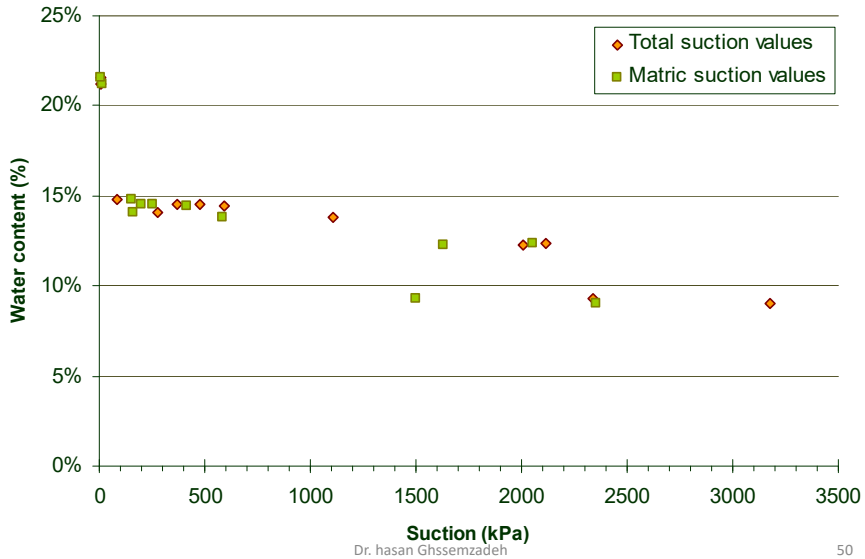
Water content of sample %	8.99	9.34	12.23	12.33	13.81	14.09	14.48	14.50	14.55	14.83	21.17	21.56
Water Content of Filter Paper %	23.38	26.27	25.75	24.26	32.34	40.71	34.58	37.72	39.31	40.98	74.86	87.57
Matric suction kPa	2353.92	1502.44	1629.17	2053.83	586.61	160.48	414.58	254.91	199.36	153.91	15.66	8.01

Total suction values

Water content of sample %	8.99	9.34	12.23	12.33	13.81	14.09	14.48	14.50	14.55	14.83	21.17	21.56
Water Content of Filter Paper %	21.43	23.42	24.41	24.07	28.25	37.17	32.29	33.73	35.35	45.13	85.73	91.43
Total suction kPa	3179.99	2337.30	2006.48	2113.40	1105.93	277.72	591.38	473.16	368.24	80.84	8.82	6.54

Dr. hasan Ghssemzadeh 49

اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Suction measurement – Filter paper



Dr. hasan Ghssemzadeh 50

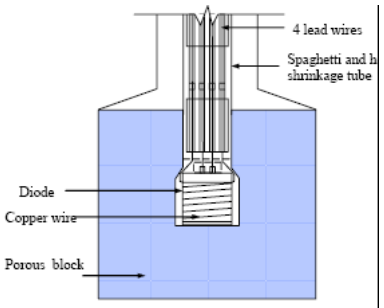
اندازه گیری در خاک غیر اشباع

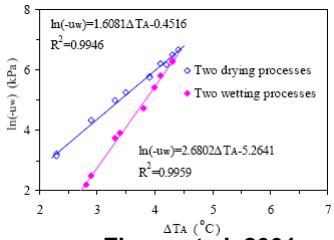
Thermal Conductivity Sensor

Heater Embedded
Porous Block
Moisture (suction) equilibrium between porous block and soil

Calibration
Temperature change is related to the thermal conductivity of the porous medium and the moisture content
- **Pressure Plates**
- **Tensiometers**

Measurement Range:
1 – 1500 kPa
Equilibration Time:
hours to days





Zhang et al. 2001

There are both laboratory and field applications of thermal conductivity sensors

Thermal Conductivity Sensor

❖هدایت حرارتی وابسته است به گرادیان دما و انتقال جریان همرفتی وابسته است به جریان مایع

❖هدایت حرارتی طبق قانون فوریه و از فرمول زیر به دست می‌آید

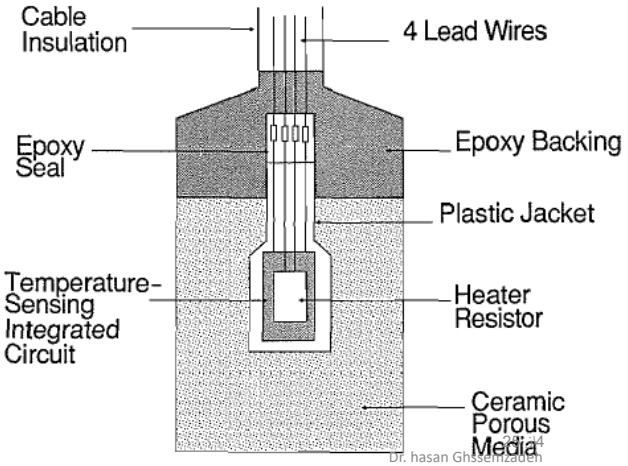
$$q_t = \boldsymbol{\lambda} \times \boldsymbol{\nabla T}$$

❖λ ضریب هدایت حرارتی است که برای یک خاک معین در یک تراکم ثابت مقداری ثابت است.

❖در خاک غیراشباع هدایت حرارتی به محتوای آب حجمی و درصد رطوبت یا درجه اشباع وابسته است.نوع خاک هم تاثیرگذار است.

Thermal Conductivity Sensor

❖ در این روش به طور غیر مستقیم میزان مکش را اندازه‌گیری می‌کند.



❖این دستگاه شامل یک بلوک سرامیک متخلخل حاوی یک دما سنج و یک بخاری مینیاتوری است که اجازه می دهد آب موجود در سنسور با آب درون خاک به تعادل برسد.

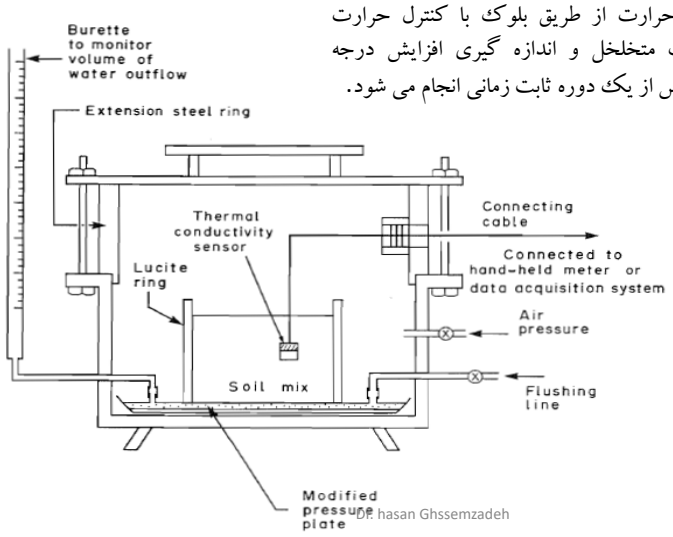
❖مقدار آب در بلوک متخلخل بر میزان دفع حرارت از طریق بلوک تاثیرگذار است و می تواند به طور غیر مستقیم اتلاف حرارت در داخل بلوک را اندازه گیری کرد.

❖رابطه ای بین محتوای آب بلوک متخلخل و مکش های بافتی وجود دارد

Dr. hasan Ghssemzadeh

Thermal Conductivity Sensor

❖ اندازه گیری دفع حرارت از طریق بلوک با کنترل حرارت ورودی به مرکز بلوک متخلخل و اندازه گیری افزایش درجه حرارت در همان نقطه پس از یک دوره ثابت زمانی انجام می شود.



Dr. hasan Ghssemzadeh

Thermal Conductivity Sensor

❖ با افزایش مقدار آب موجود در بلوک. گرمای بیشتری از طریق بلوک متخلخل تلف خواهد شد. گرمای تلف شده باعث افزایش درجه حرارت در بلوک نمیشود در نتیجه، افزایش درجه حرارت در بلوک متخلخل رابطه معکوس با مقدار آب در بلوک دارد. به عنوان یک نتیجه، با اندازه‌گیری افزایش درجه حرارت می‌توان مکش بافتی در خاک را به‌دست‌آورد.

❖ باید آب داخل خاک با آب داخل سنگ متخلخل به تعادل برسد.

❖ زمان رسیدن به تعادل بین ۱ ساعت تا ۱ روز است .

❖ رنج اندازه‌گیری مکش بین ۱-۱۵۰۰ کیلوپاسکال است.

❖ باید اعداد را با توجه به نوع سنسور ونمودار ارائه شده توسط کارخانه کالیبره کرد.

Dr. hasan Ghssemzadeh 55

Thermal Conductivity Sensor

❖ افراد زیادی معادلاتی برای λ ارائه کرده اند که می‌توان به افراد زیر اشاره کرد

- Zhang et al. 2012
- McCartney et al. 2013
- Murphy et al. 2014

که این افراد روی ذخیره گرما در اعماق خاک کار کرده‌اند.

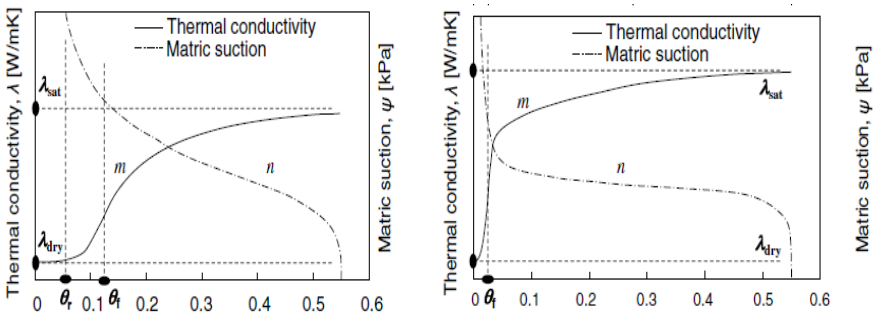
❖ یکی از پروژه‌هایی که جدیدا توسط Ning Lu andYi Dong انجام شده به ارائه معادلات برای λ پرداخته است وتاثیر نوع خاک ورطوبت روی هدایت حرارتی را مشاهده کرده است انجام شده

Dr. hasan Ghssemzadeh 14 از 25

Thermal Conductivity Sensor

روابطی برای λ

خاک رسی **خاک ماسه‌ای**



Dr. hasan Ghasemzadeh

Thermal Conductivity Sensor

❖ با استفاده از فرمول زیر می‌توان محتوای آب حجمی و درجه اشباع را به‌دست آورد

$$\frac{\lambda-\lambda_{dry}}{\lambda_{sat}-\lambda_{dry}}=1-\left[1+\left(\frac{\theta}{\theta_f}\right)^m\right]^{1/m-1}$$

$$\frac{\lambda-\lambda_{dry}}{\lambda_{sat}-\lambda_{dry}}=1-\left[1+\left(\frac{S}{S_f}\right)^m\right]^{1/m-1}$$

پارامتر mبه عنوان نحوه اتصال منافذ تعریف می‌شود

پارامتر n به عنوان اندازه منافذ تعریف می‌شود

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left[\frac{1}{1+(\alpha\psi)^n}\right]^{1-1/n}$$

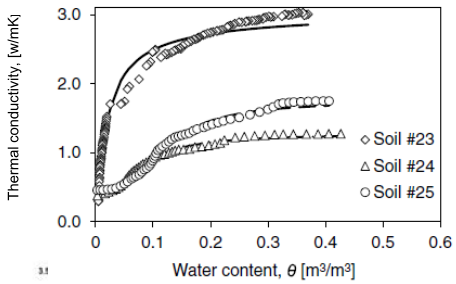
θ_r :محتوای آب ماندگار

θ_s :محتوای آب اشباع

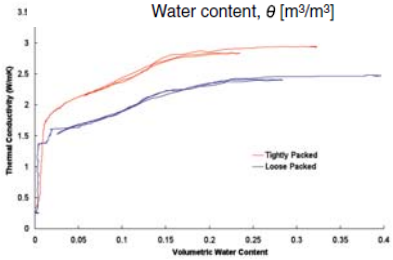
α: رابطه معکوس با فشار آب داخل خاک دارد

Dr. hasan Ghasemzadeh

Thermal Conductivity Sensor



نتایج حاصل از معادلات بالا



دو حالت خاک شل و سفت

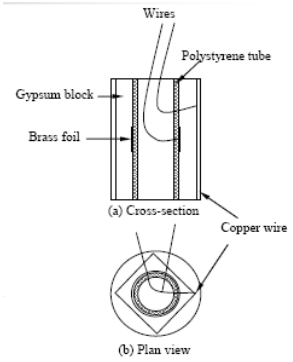
Dr. hasan Ghassemzadeh

Electrical Conductivity Sensor

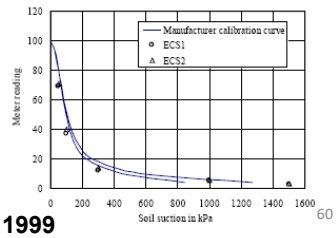
A Porous Block and Two Concentric Electrodes Embedded inside the Block

The Porous Block serves the same purpose as the porous block in the thermal conductivity sensor

Electrical conductivity is related to the moisture in the porous medium



Measurement Range:
50 – 1500 kPa
Equilibration Time:
6 to 50 hours



CalibrationFrom He 1999

Dr. hasan Ghassemzadeh

Electrical Conductivity Sensor

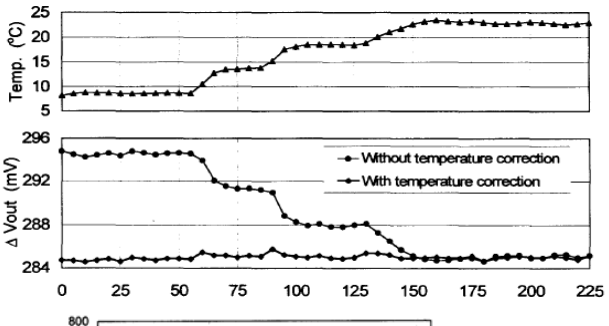
استفاده از ولتاژ برای به دست آوردن مکش

$$\psi = \left[\frac{b\cdot(\Delta V - a)}{c - \Delta V}\right]^d$$

a: متناسب با ولتاژ خروجی در شرایط اشباع
c: متناسب با ولتاژ خروجی در شرایط خشک
d: متناسب با شیب منحنی کالیبراسیون است
b: متناسب با نقطه عطف منحنی کالیبراسیون است

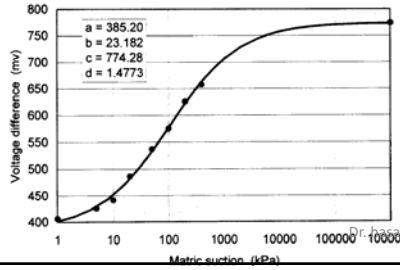
Electrical Resistance Blocks & Meters

Electrical Conductivity Sensor



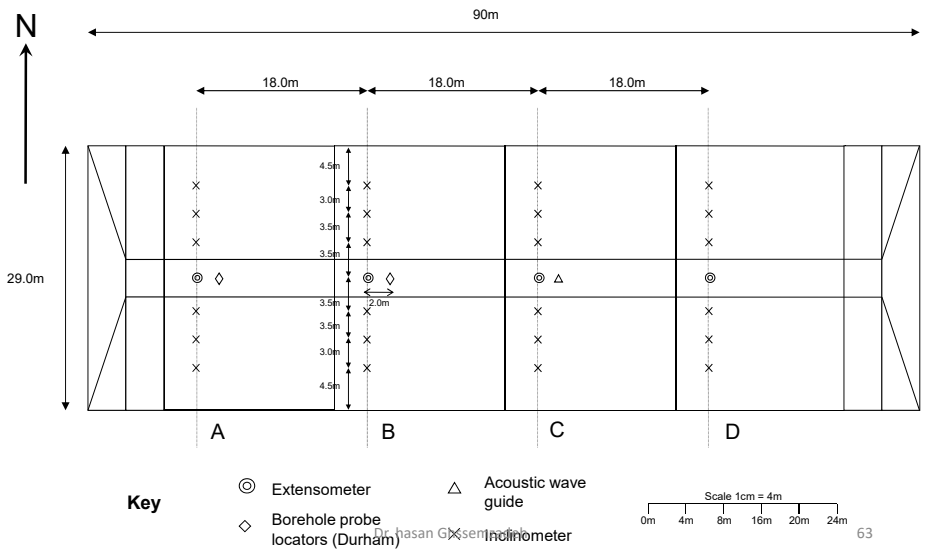
مقدار ولتاژ و دما با گذشت زمان تغییر می کند

$$\Delta V_{23\,^{\circ}C} = \frac{0.0014t + 0.561}{0.593}\Delta V_t$$



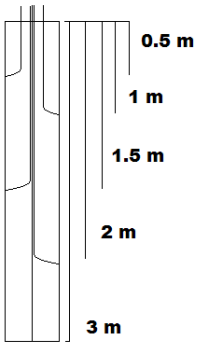
نمودار تغییرات ولتاژ نسبت مکش بافتی

Field Instrumentalization



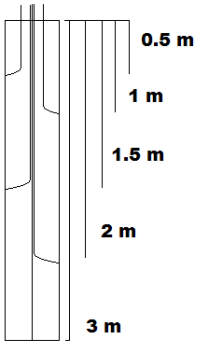
Field Instrumentalization

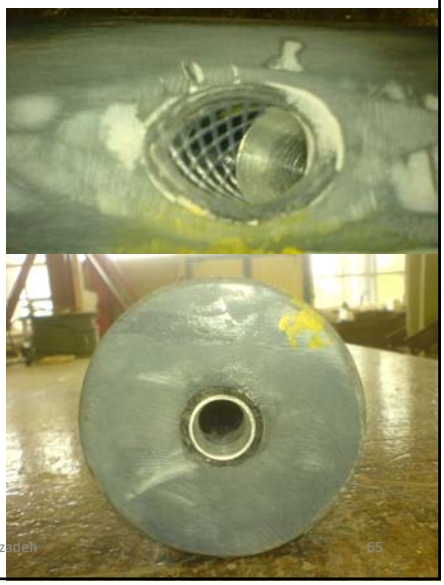
- Field equipment
  - 2 borehole probe locators with 5 probes each



اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Field Instrumentalization

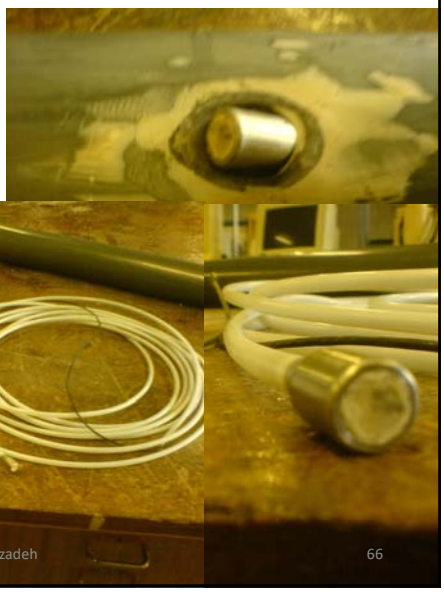
- Field equipment
  - 2 borehole probe locators with 5 probes each





اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Field Instrumentalization

- Field equipment
  - 10 tensiometers



اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Field Instrumentalization

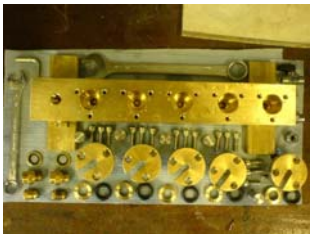
- Field equipment
  - 10 plugs

Dr. hasan Ghssemzadeh 67

اندازه گیری در خاک غیر اشباع
Field Instrumentalization

- Field equipment
  - Logger;
  - Computer;
  - Power source;
  - 100 meters cable;

Saturation vessel.



Dr. hasan Ghssemzadeh 68

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Summary

Suction Component	Method	Laboratory Field	Suction Range (kPa)	Equilibration Time	Source/ Manufacturer
Total Suction	Thermocouple Psychrometer	Laboratory & Field	100 – 8000	1 hour	Spanner 1951 Wescor: www.wescor.com Campbell Scientific: www.campbellsci.com
	Transistor Psychrometer	Laboratory & Field	100 – 10000	1 hour	
	Chilled-Mirror Psychrometer	Laboratory	500 – 450000	10 minutes	Gee et al. 1992 Wiederhold 1997 Decagon Devices: www.decagon.com
	Non contact Filter Paper Method	Laboratory & Field	1000 – 500000	5 to 14 days	Decagon Devices: www.decagon.com
	Isopiestic humidity control	Laboratory	4000 – 400000	Hours to days	Young 1967

Dr. hasan Ghssemzadeh 69

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Summary

Suction Component	Method	Laboratory Field	Suction Range (kPa)	Equilibration Time	Source/ Manufacturer
Matric Suction	Thermal Conductivity Sensor	Laboratory & Field	1 – 1500	hours to days	Campbell Scientific: www.campbellsci.com GCTS: www.gcts.com
	Electrical Conductivity Sensor	Laboratory & Field	50 – 1500	6 to 50 hours	Soil Moisture Equipment: www.soilmoisture.com
	Contact filter Paper method	Laboratory & Field	Entire range	5 to 14 days	Houston et al 1994 Decagon Devices: www.decagon.com
	Tensiometers	Laboratory & Field	0 -100	hours	Cassel &Klute 1986 Stannard 1992
	Axis translation techniques	Laboratory	0 – 1500	hours to days	Hilf 1956 Fredlund and Wong 1989

Dr. hasan Ghssemzadeh 70

اندازه گیری در خاک غیر اشباع

Reliable Measurements with
- **Thermocouple Psychrometers**
- **Transistor Psychrometers**
- **Chilled Mirror Psychrometer**
- **Non-Contact Filter Paper Method**

Depend on
- **A Good Laboratory Testing Protocol**
- **Constant Temperature Environment**

Reliable Measurements with
- **Contact Filter Paper Method**
- **Thermal Conductivity Sensors**
- **Electrical Conductivity Sensors**

Depend on
- **A Good Laboratory Testing Protocol**
- **Intimate Contact Between the Measuring Sensor and Soil**

Dr. hasan Ghssemzadeh 71

Soil Water Measurement

- Tensiometers
  - Measure soil water potential (tension)
  - Practical operating range is about 0 to 0.75 bar of tension (this can be a limitation on medium- and fine-textured soils)
- Electrical resistance blocks
  - Measure soil water potential (tension)
  - Tend to work better at higher tensions (lower water contents)
- Thermal dissipation blocks
  - Measure soil water potential (tension)
  - Require individual calibration

Dr. hasan Ghssemzadeh 72

Soil Water Measurement

- Gravimetric
  - Measures mass water content (θ_m)
  - Take field samples → weigh → oven dry → weigh
  - Advantages: accurate; Multiple locations
  - Disadvantages: labor; Time delay
- Feel and appearance
  - Take field samples and feel them by hand
  - Advantages: low cost; Multiple locations
  - Disadvantages: experience required; Not highly accurate

Dr. hasan Ghssemzadeh 73

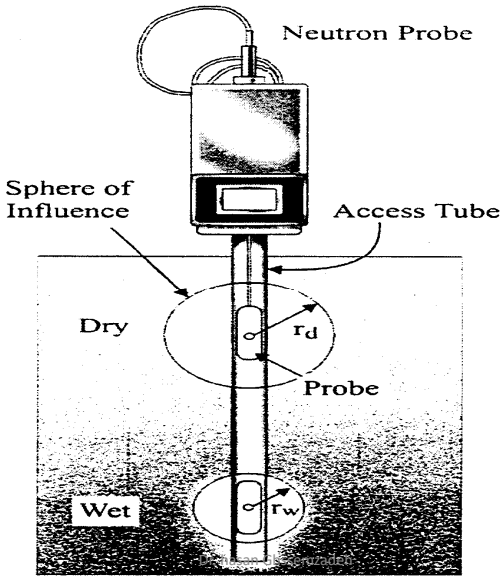
Soil Water Measurement

- Neutron scattering (attenuation)
  - Measures volumetric water content (θ_v)
  - Attenuation of high-energy neutrons by hydrogen nucleus
  - Advantages:
    - samples a relatively large soil sphere
    - repeatedly sample same site and several depths
    - accurate
  - Disadvantages:
    - high cost instrument
    - radioactive licensing and safety
    - not reliable for shallow measurements near the soil surface
- Dielectric constant
  - A soil's dielectric constant is dependent on soil moisture
  - Time domain reflectometry (TDR)
  - Frequency domain reflectometry (FDR)
  - Primarily used for research purposes at this time

Dr. hasan Ghssemzadeh 74

Soil Water Measurement

Neutron Attenuation



طوبت سنج های کمپانی تستو علاوه بر اندازه گیری دما و رطوبت نسبی ، پارامترهای نقطه شبنم ، min، maxو ... را نشان می دهند