



# خواص الکتریکی خاکها

## دکتر حسن قاسم زاوه

<http://wp.kntu.ac.ir/ghasemzadeh>

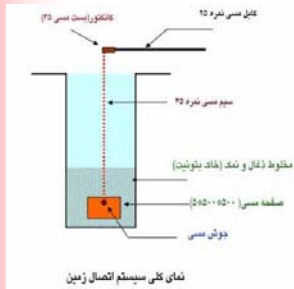
**K .N. Toosi University of Technology**

1

Dr. Hasan Ghasemzadeh



صاعقه گیر و چاه ارت



Dr. Hasan Ghasemzadeh

2



1 < مقدمه

2 < قوانین جریان

3 < هدایت الکتریکی

4 < مقاومت الکتریکی خاک

5 < اندازه گیری هدایت الکتریکی خاک

6 < رابطه بین مقاومت حرارتی خاک - مقاومت یونی

7 < فاکتورهای مؤثر بر هدایت الکتریکی خاک

8 < کاربرد هدایت الکتریکی خاک

## مقدمه

امروزه خاک به عنوان ماده هادی و عایق الکتریکی استفاده می شود

مقاومت ویژه الکتریکی : مقاومت خاک در برابر عبور جریان الکتریکی

کاربرد مقاومت الکتریکی در میدانهای نفتی ، نقشه های ژئوفیزیک ، اکتشاف و علوم خاک می باشد.

این مقاومت معمولاً تابعی از نوع و ترکیب خاک و حالت تراکم آن (همچون دانسیته و درصد رطوبت) ارائه می شود

## مقاومت الکتریکی خاک

Soil Type	مقاومت الکتریکی (اهم - متر)	نوع خاک
Swampy terrain	30	زمین های باتلاقی و اجنزار
Jurassic marl	30-40	مارل دوره ژوراسیک
Soft Clay	50	خاک های نرم رسی
Humid peat	5-100	خاک های نیم دار ذغال سنگی
Silt	20-100	زمین های گل و لای
Humus	10-150	خاک های نباتی و گیاه دار (زراعتی)
Marl and compact clay	100-200	مارل یا رس فشرده
Schist	50-300	سنگ ورقه ای
Soft limestone	100-300	سنگ های آهکی نرم
Clayey sand	50-500	خاک های متشکل از رس و ماسه
Grass covered stony soil	300-500	خاک های سنگی با پوشش گیاهی
Granite & sandstone little altered	100-600	گرانیت یا ماسه سنگ کم آئنه شده
Mica Schist	800	میکالشیست
Cracked limestone	500-1000	سنگ های آهکی شکاف دار
Siliceous sand	200-3000	ماسه سنگ سیسیلی
Bare stone soil	1500-3000	خاک های سنگی بدون پوشش گیاهی
Compact limestone	1000-5000	سنگ های آهکی فشرده
Granite & sandstone depending on alteration	1500-10000	گرانیت یا ماسه سنگ آئنه شده

Dr. Hasan Ghasemzadeh

5

## قوانین جریان در خاک

نرخ جریان و یا شارش بطور خطی به نیروهای محرک مربوطه ارتباط دارد

$$q_t = k_t \cdot i_t \quad \text{برای جریان گرما (قانون فوریه)}$$

$$I = \sigma_e \cdot i_e \quad \text{برای جریان الکتریکی (قانون اهم)}$$

$I, q_t$  جریان حرارتی و الکتریکی

$\sigma_e, k_t$  ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی

$i_e, i_t$  گرادیان جریان حرارتی و الکتریکی

Dr. Hasan Ghasemzadeh

6

	Heat	Electrical
Potential	دما (T) درجه سانتیگراد (°C)	ولتاژ (V) (ولت)
storage	انرژی حرارتی (W) (جول بر متر مکعب) (J/m³)	بار الکتریکی (Q) (کولمب)
Conductivity	هدایت حرارتی (k) (وات بر متر درجه سانتیگراد) (W/m/°C)	هدایت الکتریکی (σ) (سیمنس بر متر) (Siemens/m)
Flow	q <sub>t</sub> (J/Sec)	جریان I (آمپر)
gradient	$i_t = -\frac{\partial T}{\partial x}$ (°C/m)	$i = -\frac{\partial V}{\partial x}$ (V/m)
conduction	Fourier's Law $q_h = -k_h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \cdot A$	Ohm's Law $I = -\sigma \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \cdot A = \frac{V}{R}$
Capacitance	ظرفیت گرمایی (C) (جول بر متر مکعب درجه سانتیگراد) (J/°C/m³)	ظرفیت الکتریکی (C) (فاراد)
	$C = \frac{dQ}{dT}$	
continuity	$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot q_t = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot I = 0$
Steady state	$\nabla^2 q_t = 0$	$\nabla^2 I = 0$
Diffusion	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_t}{C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ $\frac{k}{C} = a$	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\sigma}{C} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$

## تشابه خواص الکتریکی و حرارتی

Dr. Hasan Ghasemzadeh

7

## هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی معادل است با عکس مقاومت الکتریکی

$$\sigma_e = \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{A} \quad \left( \frac{\text{Siemens}}{\text{m}} \right)$$

R مقاومت بر حسب اهم

L طول نمونه بر حسب متر

A سطح مقطع عرضی بر حسب متر مربع

محدوده هدایت الکتریکی برای خاکهای اشباع: **0.01–1 Siemens/m**

**تابعی از:** درجه اشباع، ترکیب آب حفره ای، مینرالوژی با تأثیر بر روی اندازه ذرات، شکل و رسانائی سطحی، ساختار خاک شامل بافت و چگونگی سیمانی شدن و همچنین دما

Dr. Hasan Ghasemzadeh

8

## روابط هدایت الکتریکی

معادلات تجربی و نظری:

Archie(1942): آزمایشات بر روی ماسه های تمیز کاملاً اشباع و ماسه سنگها نشان می دهد هدایت ماتریس آب-خاک به طور مستقیم با آب حفره ای متناسب است. او فرض کرد ضریب تناسب بستگی به تخلخل و بافت خاک دارد و فاکتور شکل را تعریف نمود:

**فاکتور شکل F:**

عبارت است از مقاومت الکتریکی خاک اشباع تقسیم بر مقاومت آب حفره ای:

$$F = \frac{\rho_T}{\rho_w} = \frac{\sigma_w}{\sigma_T}$$

$$F = n^{-m}$$

$$\sigma = \sigma_0 f(S_w)$$

$$f(S_w) = \left(\frac{S_w}{S_{w0}}\right)^n$$

$\sigma_w$  هدایت الکتریکی آب حفره ای

$\sigma_T$  هدایت الکتریکی خاک اشباع

$n$  تخلخل

$m = 1.3$  برای ماسه های شل

$m = 2.0$  برای ماسه سنگهای کاملاً سیمانی شده.

$\sigma_0$  - هدایت الکتریکی مرجع

$S_{w0}$  - مقدار د درجه اشباع آب مرجع

**مدل Capillary:**

نمونه خاک اشباعی با طول  $L$  و سطح مقطع  $A$  تحت جریان مستقیم DC: فاکتور شکل بعنوان تابعی از تخلخل  $n$  و انحنا  $Tortuosity$ :

$$\tau = \frac{L_e}{L}, \theta = nS_r$$

$$F = \frac{\tau^2}{\theta}$$

$L_e$  طول واقعی مسیر جریان

### مدل Cluster:

فرض می شود اندازه حفرات نامساوی است. با توجه به مسیرهای ممکن برای جریان الکتریکی:

معادلات فاکتور شکل بعنوان تابعی از پارامترهای مدل Cluster:

$$F = \tau^2 \left[ \frac{1 + e_T}{e_T - e_C} \right] \left[ \frac{1}{1 + X} \right]$$

$\tau$  tortuosity inter Cluster

$\tau_c$  tortuosity intra Cluster

$$X = Y + Z$$

$e_T$  inter Cluster porosity

$e_C$  intra Cluster porosity

$$Y = \frac{[(1 + e_T)/(e_T - e_C)]^2}{1 + \left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)^2 [(1 + e_C)^2 / e_C (e_T - e_C)]}$$

$$Z = a \left[ \frac{e_C}{e_T - e_C} \right] \left[ \frac{\tau}{\tau_c} \right]^2$$

$a$  مساحت تماسی Cluster

Dr. Hasan Ghasemzadeh

11

### مدل Two parallel resistor

در این مدل: اضافه شدن ترمی جهت رسانائی سطحی و معادل شدن سیستم با دو عنصر مقاوم الکتریکی بطور موازی مدل می شود

$$\sigma_T = X(\sigma_W + \sigma_S)$$

$\sigma_T$  هدایت الکتریکی کل

$\sigma_S$  ترم رسانائی سطحی

$X$  ثابتی متناظر با عکس فاکتور شکل

### مدل Three element network

علاوه بر مسیرهای جریان مدل فوق اضافه شدن جریان در میان سطوح ذرات و آب حفره ای

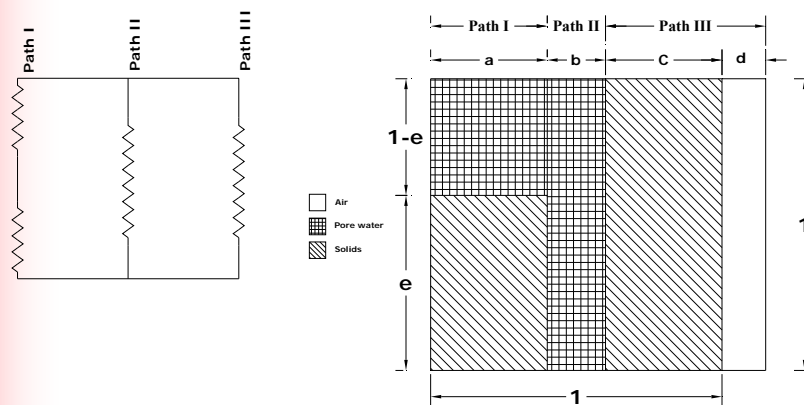
$$\sigma_T = \frac{a\sigma_W \cdot \sigma_S}{(1 - e)\sigma_W + e\sigma_S} + b\sigma_S + c\sigma_W$$

$a, b, c, e$  پارامترهای هندسی تابعی از تخلخل و درجه اشباع

Dr. Hasan Ghasemzadeh

12

مدل Three element network برای هدایت الکتریکی



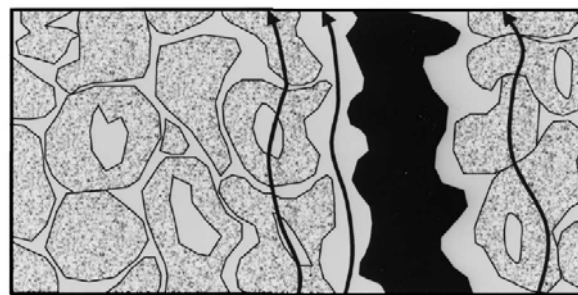
(b) مدار الکتریکی معادل

(a) مسیر جریان برق

Dr. Hasan Ghasemzadeh

هدایت الکتریکی

Soil Cross Section



Solid Liquid Air

مسیر قابلیت رسانائی الکتریکی خاک. ۱=مایع، ۲=جامد-مایع و ۳=جامد

Dr. Hasan Ghasemzadeh

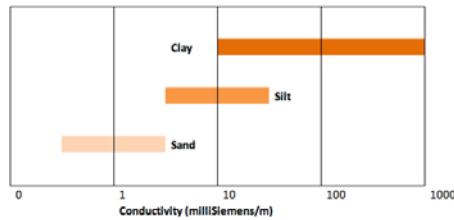
## هدایت الکتریکی

$$\sigma = \alpha \phi^m s^n \sigma_w + \sigma_c \quad \left[ \frac{S}{m} \right] \quad \text{زیمنس بر متر}$$

$\alpha, m, n =$  مقادیر ثابت  
 $S =$  درجه اشباع  
 $\sigma_w =$  هدایت مایع حفره ای  
 $\sigma_c =$  هدایت شبکه سطحی خاک

$$\sigma_w \approx \frac{1}{6000} TDS \quad \left[ \frac{S}{m} \right]$$

هدایت الکتریکی آب تحت اثر غلظت ذرات جامد TDS بر حسب ذره در میلیون



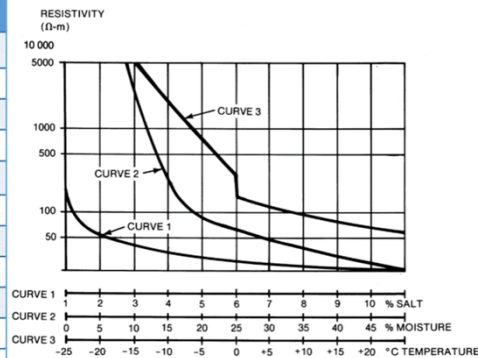
Dr. Hasan Ghasemzadeh

15

## مقاومت ویژه الکتریکی

مقاومت الکتریکی یک متر مکعب خاک که بین دو الکترود اندازه گیری می شود

مقاومت ویژه ( $\Omega.m$ )	جنس خاک
20-100	زمین گلی
10-150	خاک گیاهدار
5-100	ذغال سنگ مرطوب
50	خاک رس نرم
100-200	خاک آهک دار و خاک رس فشرده
50-500	ماسه رس دار
1500-3000	خاک دارای قطعات سنگ
100-300	سنگ آهک نرم
1000-5000	سنگ آهک فشرده
50-300	شیست
1500-10000	گرانیت و ماسه سنگ



مقاومت ویژه خاک را می توان به روش چهار نقطه که خود به دو روش ونر (Wenner) و روش اشلامبرگر (Schlumberger) اندازه گیری میشود

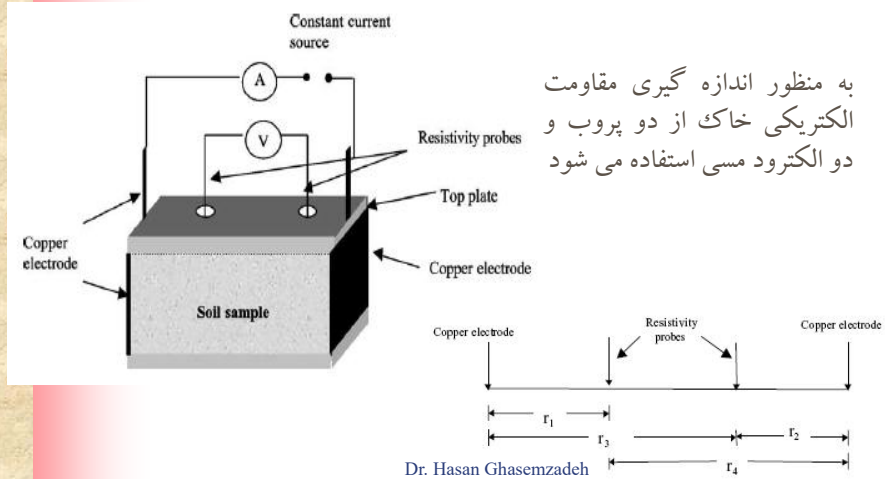
Dr. Hasan Ghasemzadeh

16



## مقاومت الکتریکی خاک

دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاکها



## مقاومت الکتریکی خاک

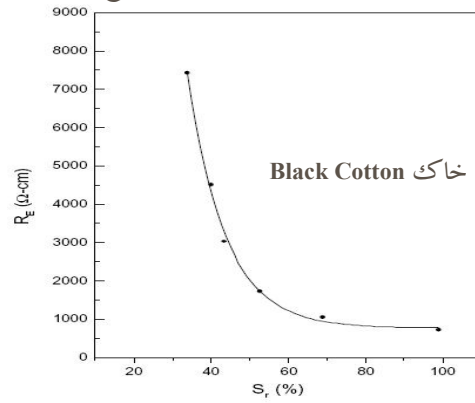
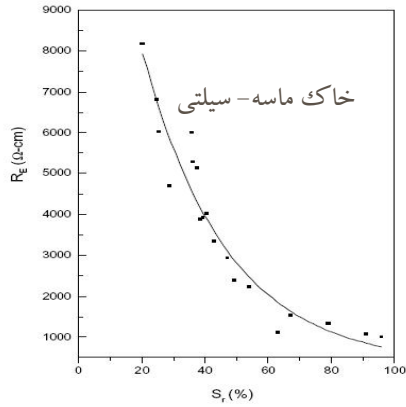
با ثبت جریان و ولتاژ از رابطه زیر مقاومت الکتریکی بدست می آید:

$$R_E = 2\pi \frac{V}{I} \left[ \frac{1}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]$$

$R_E$  مقاومت الکتریکی خاک

## مقاومت الکتریکی خاک

تغییرات مقاومت الکتریکی با درجه اشباع



## مقاومت الکتریکی خاک

رابطه کلی بین مقاومت الکتریکی و درجه اشباع:

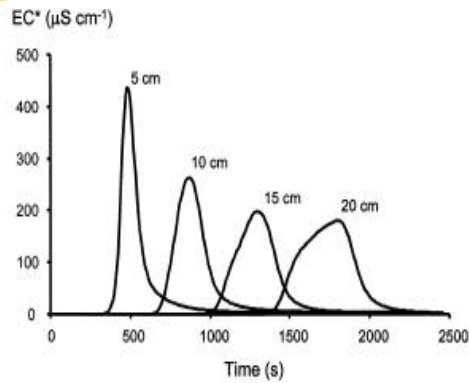
$$\text{Log}(R_E) = C_1 + C_2 \text{Log}(S_r)$$

رابطه کلی بین مقاومت الکتریکی و مقاومت حرارتی:

$$\text{Log}(R_E) = C_R \text{Log}(R_T)$$

## اندازه گیری هدایت الکتریکی خاک

هدایت الکتریکی بالک  
خاک ( $EC^* = EC - EC_i$ )  
 $EC_i$  مقدار اندازه گیری اولیه  
EC برای هر پروب

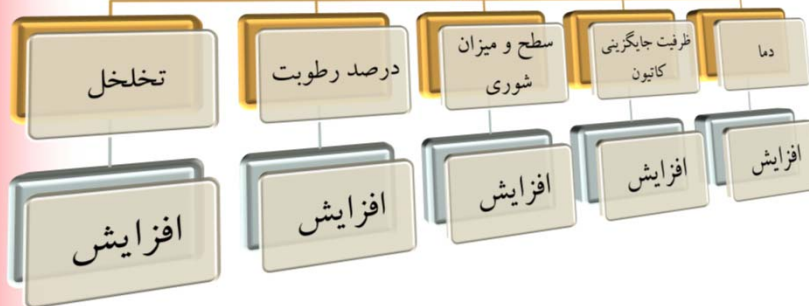


تغییر در هدایت الکتریکی بالک خاک بعنوان تابعی از زمان در اعماق مختلف از ستون خاک در مدت آزمایشات شیرابه - تاثیر زمان ناشی از انحلال مواد است اندازه گیری EC با استفاده از پروب چند سوزنه صورت گرفته است

Dr. Hasan Ghasemzadeh

21

## فاکتورهای مؤثر بر هدایت الکتریکی خاک



Dr. Hasan Ghasemzadeh

22

## بقای بار الکتریکی

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \text{div} I = 0$$

معادله بقای بار الکتریکی

$Q$ : بار الکتریکی  
 $I$ : شدت جریان