تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲ (ص ۳۷۲-۳۶۵)

بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در حضور سوخت دیزل در شرایط دوفازی

میلاد نوری[۱]، مهدی همایی[۲]*، محمد بای‌بوردی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

۲ و ۳. استاد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۶ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴)

چکیده

به‌منظور بررسی اثر حضور سوخت دیزل بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک منحنی‌های نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل و آب به‌وسیلهٔ دستگاه ستون‌آویزان به‌دست آمد. پارامترهای منحنی‌های نگه‌داشت خاک برای آب و سوخت دیزل بر اساس مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس- کوری، و کمپبل برآورد شد. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، به‌منزلهٔ تابعی از پتانسیل ماتریک خاک به‌وسیلهٔ مدل‌های معلم- ون- گنوختن، معلم- بروکس- کوری، بوردین- بروکس- کوری، و کمپبل تعیین شد. مقدار پارامترهای توزیع تخلخل تقریباً بدون تغییر و نقطهٔ ورود هوا در سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا نسبت به آب- هوا افزایش یافت. نتایج نشان داد، به‌دلیل کشش سطحی کمتر سوخت دیزل، این سیال در مقایسه با آب با نیروی کمتری در خاک نگه داشته می‌شود. فاکتور مقیاسی لورت با دقتی مناسب منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل را برآورد کرد. همچنین، به‌دلیل لزوجت بیشتر سوخت دیزل و نگه‌داشت کمتر خاک برای این سیال، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب بود.

کلیدواژگان: سوخت دیزل، فاکتور مقیاسی لورت، مدل‌های هیدرولیکی خاک، نگه‌داشت خاک، هدایت هیدرولیکی خاک.

مقدمه

آلاینده‌های هیدروکربنی به دو گروه سیالات با چگالی کمتر از آب (LNAPLs) [۱] و با چگالی بیشتر از آب (DNAPL) [۲] تقسیم می‌شوند (Weiner, 2000). تحرک و نگه‌داشت مواد هیدروکربنی در محیط متخلخل به ویژگی‌های فیزیکی آلاینده- همچون قابلیت خیس‌کنندگی[۳] سیال، گرانروی سینماتیکی، جرم ویژه، کشش سطحی- و ویژگی‌های فیزیکی محیط- همچون توزیع تخلخل و شیب هیدرولیکی- وابسته است (Mercer and Waddell, 1993). با فرض اینکه محیط متخلخل و سیالات تراکم‌ناپذیر باشند و صرف نظر از وجود منبع و مصرف[۴]، حرکت سیالات در محیط‌های متخلخل از ترکیب معادلات اندازهٔ حرکت و پیوستگی قابل توصیف است:

$$\xi(\frac{\partial S_w}{\partial t}) = \nabla.\{(K_{rw} k_w (\nabla h_w + \nabla z)\} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\xi(\frac{\partial S_o}{\partial t}) = \nabla.\{(K_{ro} k_o (\nabla h_o + \nabla z)\} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

$$\nabla = (\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}})i + (\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}})j + (\frac{\partial}{\partial \mathrm{z}})k \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

ξ تخلخل خاک، S_w و S_o درصد حجمی به‌ترتیب آب و NAPL، K_w و K_o هدایت هیدرولیکی محیط برای آب و NAPL، K_{rw} و K_{ro} نفوذپذیری نسبی محیط برای آب و NAPL، z پتانسیل ثقلی، h_w و h_o بار فشار موییننگی[۵] محیط برای آب و NAPL، i و j و k به‌ترتیب بردارهای واحد در جهت‌های کارتزینی x و y و z هستند.

رابطهٔ فشار موییننگی- حجم سیال و هدایت هیدرولیکی- حجم سیال از پیش‌نیازهای حل معادلهٔ حرکت سیالات در محیط متخلخل است. منحنی نگه‌داشت خاک[۶] بیانگر رابطهٔ پتانسیل ماتریک (بار فشار موییننگی) و مقدار حجمی فاز مایع محیط است. منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی محیط‌های متخلخل تابع ویژگی‌های خاک و مایع خاک است. بنابراین با تغییر ویژگی‌های فیزیکی مایع خاک منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی نیز تغییر می‌کند. لزوجت، کشش سطحی، و زاویهٔ تماس[۷] از ویژگی‌های مایع خاک است که تحت تأثیر حضور NAPLها در خاک قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های شناخته‌شده برای برآورد منحنی نگه‌داشت مواد هیدروکربنی در شرایط دوفازی و سه‌فازی روش مقیاس‌سازی[۸] است. در این روش

* نویسنده مسئول: mhomaee@modares.ac.ir

1. Light Non-Aqueous phase Liquids
2. Dense Non-Aqueous phase Liquids
3. Wettability
4. Source and sink
5. Capillary pressure head
6. Soil retention curve
7. Contact angle
8. Scaling method

Archive of SID

www.SID.ir

منحنی نگه‌داشت یک جفت سیال بر مبنای داده‌های منحنی نگه‌داشت سیال دیگر برآورد می‌شود. Leverett (1941) با فرض تراکم‌ناپذیری خاک و سیال فاکتور مقیاسی خود را ارائه کرد:

$$J(S_e)=\frac{h_1}{\sigma_1}\sqrt{\frac{k_1}{\xi_1}}=\frac{h_2}{\sigma_2}\sqrt{\frac{k_2}{\xi_2}}=\ldots \quad \text{(رابطه ۴)}$$

σ و k و ξ به‌ترتیب کشش سطحی سیال و نفوذپذیری ذاتی و تخلخل کل خاک است.

در رابطه ۴ $\sqrt{\frac{k}{\xi}}$ نمایندهٔ طول میکروسکوپی[1] خاک است که با ویژگی‌های هندسی خاک ارتباط دارد. بنابراین در محیط‌های متخلخل یکسان فاکتور مقیاسی لورت به شکل زیر ساده می‌شود:

$$J(S_e)=\frac{h_1}{\sigma_1}=\frac{h_2}{\sigma_2}=\ldots \quad \text{(رابطه ۵)}$$

فاکتور مقیاس‌سازی لورت را بسیاری از پژوهشگران برای برآورد منحنی نگه‌داشت جفت سیالات به‌کار برده‌اند (Fagrlund ; Høst-Madsen and Høgh Jensen, 1992*et al*, 2012; ; Parker and Lenhard, 1987; Lenhard and Parker, 1988 (Nouri *et al*, 2012 a; Nouri *et al*, 2012 b). در مقابل بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده دربارهٔ صحت و دقت روش مقیاس‌سازی نشان می‌دهد صحت فاکتور مقیاس‌سازی لورت محدود به شرایط ویژه‌ای است و در بسیاری موارد توانایی تخمین منحنی نگه‌داشت سیالات را ندارد. در این زمینه پژوهش Demond and Robert (1991) نشان داد فاکتور مقیاسی لورت به‌دلیل درنظرنگرفتن اثر چگالی و زاویهٔ تماس سیال- محیط متخلخل بر منحنی نگه‌داشت خاک در همهٔ موارد قادر به برآورد منحنی نگه‌داشت خاک نیست. مشکل اساسی دیگر فاکتور مقیاسی لورت عدم توجه به برهمکنش‌های سیال- محیط است. به عبارت دیگر، در روش مقیاسی لورت فقط ویژگی‌های سیال در نظر گرفته شده و به ویژگی‌های هندسی خاک توجه نشده است؛ در حالی که منحنی نگه‌داشت خاک به توزیع اندازهٔ ذرات و هندسهٔ خلل‌وفرج محیط و برهمکنش‌های سیال- آب بسیار وابسته است (Busby *et al*, 1995). همچنین Nouri *et al* (2014) در طی پژوهشی نتیجه گرفتند فاکتور مقیاس‌سازی لورت برای برآورد منحنی نگه‌داشت نفت خام بر مبنای سیال پایه نامناسب است. بنابراین با دورشدن سیستم از حالت ایده‌آل و واکنش‌ناپذیر، مانند وجود مقدار زیادی رس یا حضور سیالات واکنش‌پذیر با رفتارهای غیر معمول و پیچیده مثل نفت خام، اعتبار فاکتور مقیاسی لورت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

Jarsjö *et al* (1994) منحنی نگه‌داشت آب و سوخت دیزل را برای خاک‌های رسی، شنی، و آلی تعیین کردند. نتایج نشان داد در همهٔ مواد محیط متخلخل نگه‌داشت کمتری برای سوخت دیزل در مقایسه با آب دارد. همچنین با افزایش مادهٔ آلی و رس و رطوبت نگه‌داشت محیط برای سوخت دیزل افزایش می‌یابد. Liu *et al* (1998) منحنی نگه‌داشت دو خاک شنی را در سه سیستم دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا و NAPL- آب بر مبنای روش جریان خروجی چندگامی[2] تعیین کردند. نتایج نشان داد نسبت پارامتر پتانسیل نقطهٔ ورود هوای مدل ون‌گنوختن با فاکتور مقیاس‌سازی لورت رابطهٔ مستقیم دارد. Chen *et al* (1999) به برآورد پارامتریک منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی دو محیط شنی در سه سیستم دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا و NAPL- آب پرداختند. آن‌ها برای توصیف منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی از هفت مدل هیدرولیکی استفاده کردند. نتایج نشان داد پارامترهای توزیع تخلخل و نقطهٔ ورود هوای مدل‌ها در سیستم‌های دوفازی NAPL- هوا و NAPL- آب در مقایسه با سیستم آب- هوا بیشتر است. همچنین، تغییرات پارامترهای نقطهٔ ورود هوا نسبت به پارامترهای توزیع تخلخل بیشتر است. به‌علاوه، مدل‌های گاردنر- معلم، ون‌گنوختن- معلم، بروتسارت- معلم، و کوسوگی- معلم در مقایسه با سایر مدل‌ها برآورد بهتری دارند. Sharma and Mohamed (2003) در دامنهٔ محدودی از پتانسیل ماتریک منحنی‌های نگه‌داشت یک خاک شنی را در سیستم‌های دوفازی آب- هوا، LNAPL- آب، و LNAPL- هوا بررسی کردند. آن‌ها همچنین برای برآورد منحنی‌های نگه‌داشت مایع خاک در محیط‌های دوفازی از مدل ون‌گنوختن استفاده کردند. نتایج نشان داد مقدار پارامترهای توزیع تخلخل مدل (n و m) و پارامتر نقطهٔ ورود هوا به خاک مدل (α) افزایش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ کاهش نگه‌داشت محیط متخلخل شنی برای LNAPL است. Mako (2005) منحنی نگه‌داشت خاک برای NAPLها را با استفاده از ویژگی‌های زودیافت مقدار مادهٔ آلی و توزیع اندازهٔ ذرات و مقدار کلسیم خاک برآورد کرد. او استفاده از توابع انتقالی را به جای فاکتورهای مقیاس‌سازی برای برآورد منحنی نگه‌داشت مشتقات نفتی پیشنهاد داد.

تاکنون تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی منحنی نگه‌داشت خاک صورت گرفته است (Leij *et al*, 1997). Brooks and Corey (1966) با به‌کاربردن مادهٔ نفتی سالترول[3] مدلی تجربی برای برآورد منحنی نگه‌داشت خاک ارائه کردند:

1. Soil microscopic length

2. Multi-step outflow
3. Soltrol

Archive of SID

www.SID.ir

$$S_e = (\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}) = (\alpha h)^{-\lambda} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

α پارامتر نقطهٔ ورود هوا[1]، λ پارامتر چگونگی توزیع تخلخل، S_e اشباع مؤثر، θ_s مقدار حجمی فاز مایع خاک در حالت اشباع خاک، و θ_r رطوبت باقی‌مانده[2] است.

Campbell (1974) نیز معادلهٔ تجربی زیر را برای پیش‌بینی رابطهٔ پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک ارائه کرد:

$$\theta = \theta_s (\frac{h}{h_0})^{-(1/b)} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

h_0 پتانسیل ماتریک خاک در نقطهٔ ورود هوا به خاک و b پارامتر توزیع تخلخل و برابر با عکس λ (رابطه ۶) است.

van Genuchten (1980) نیز مدلی برای برآورد منحنی نگه‌داشت خاک ارائه کرد که برای دامنهٔ وسیعی از محیط‌های متخلخل کارایی مطلوبی دارد:

$$S_e = (1+(\alpha h)^n)^{-m}, \qquad m = 1-\frac{1}{n} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

m و n پارامترهای شیب منحنی نگه‌داشت خاک و α با عکس پتانسیل ماتریک نقطهٔ ورود هوا به خاک متناسب است.

پژوهش‌های بسیاری برای مدل‌سازی هیدرولیکی محیط‌های متخلخل انجام شده است (Mualem, 1992). Burdine (1953) مدل خویش را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = S_e{}^2 \left[\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)^2} \Big/ \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)^2} \right] \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$S_e{}^2$ فاکتور پیوستگی مجاری خاک[3] است.

بروکس و کوری با ترکیب رابطهٔ ۶ با معادله بوردین معادلهٔ برآورد هدایت هیدرولیکی بوردین- بروکس- کوری (رابطهٔ ۱۰) را ارائه کردند:

$$K_r = S_e{}^{(3+\frac{2}{\lambda})} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

مدل Mualem (1976) به صورت زیر است:

$$K_r = S_e{}^{0.5} \left[\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} \Big/ \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right]^2 \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

در مدل معلم پارامتر بازاتصالی منافذ خاک برابر ۰/۵ است.

ون‌گنوختن مدل منحنی نگه‌داشت ون‌گنوختن (رابطه ۸) و مدل بروکس- کوری (رابطه ۶) را با مدل معلم تلفیق و نتایج مدل‌های تلفیقی معلم- بروکس- کوری (رابطهٔ ۱۲) و معلم- ون‌گنوختن (رابطهٔ ۱۳) را مقایسه کرد:

$$K_r = S_e{}^{(2.5+\frac{2}{\lambda})} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$K_r = S_e{}^{\ell} \{1-[1-S_e{}^{\frac{1}{m}}]^m\}^2 \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

ℓ فاکتور درون‌اتصالی[4] خاک است.

همچنین Campbell (1974) با حل معادلهٔ Childs and Collis-George (1950) مدل هدایت هیدرولیکی خود را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_r = (\frac{\theta}{\theta_s})^{2b+2+p} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

فرض p=1 برای بیشتر نمونه‌های خاک نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهد (Jackson, 1972).

هدف این پژوهش بررسی رفتار هیدرولیکی و نگه‌داشت سوخت دیزل[5] به‌منزلهٔ LNAPL و آب به‌وسیلهٔ خاک و مقایسهٔ آن‌ها با یک‌دیگر بود. برآورد منحنی نگه‌داشت خاک به‌وسیلهٔ مدل‌های ون‌گنوختن و بروکس- کوری و کمپبل و منحنی هدایت هیدرولیکی خاک به‌وسیلهٔ مدل‌های معلم- بروکس- کوری و بوردین- بروکس- کوری و معلم- ون‌گنوختن و کمپبل و بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از دیگر اهداف این پژوهش بود. به‌علاوه در این پژوهش منحنی نگه‌داشت LNAPL- هوا بر مبنای منحنی نگه‌داشت آب خاک و از طریق تابع لورت مقیاس‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

برخی ویژگی‌های خاک آزمایش‌شده در جدول ۱ می‌آید. در این جدول پارامترهای فیزیکی σ_g و d_g به‌ترتیب انحراف معیار هندسی و میانگین هندسی قطر ذرات خاک است.

آلایندهٔ به‌کاررفته در این پژوهش سوخت دیزل بود. این مادهٔ هیدروکربنی اغلب برای سوخت وسایل نقلیهٔ سنگین و همچنین مادهٔ گرمابخش مراکز صنعتی و کشاورزی به‌کار می‌رود. ویژگی‌های فیزیکی سیالات در جدول ۲ می‌آید.

در این پژوهش برای رسم منحنی‌های نگه‌داشت آب و سوخت دیزل برای خاک از دستگاه ستون‌آویزان[6] استفاده شد. برای تعیین منحنی نگه‌داشت تجربی خاک، ابتدا نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و برای اعمال جرم ویژهٔ ظاهری خاک در یک استوانه فشرده شد. سپس نمونه‌های خاک روی صفحهٔ سرامیکی قیف بوخنر[7] دستگاه قرار گرفت و از زیر با مایع خیس‌کنندهٔ سیستم (سوخت دیزل یا آب) اشباع

1. Air entry value or bubbling pressure
2. Residual Saturation
3. Soil pore connectivity
4. Inter-connectivity
5. Diesel fuel
6. Hanging column
7. Buchner funnel

Archive of SID

www.SID.ir

شد. با تنظیم ارتفاع سطح مایع خیس‌کننده در شاخهٔ آزاد دستگاه از نمونهٔ خاک (h)، نمونه‌های خاک تحت مکش‌های مشخصی قرار گرفت. فرایند اعمال مکش تا ۲۷۰ سانتی‌متر آب ادامه یافت. در هر مرحله از اعمال مکش، مقدار سیال خارج‌شده از نمونهٔ خاک در یک استوانهٔ مدرج جمع‌آوری شد و با کم‌کردن حجم سیال خارج‌شده از حجم مایع خاک قبل از اعمال مکش، مقدار حجمی مایع خاک محاسبه شد. مقدار پتانسیل ماتریک مایع خاک نیز با محاسبهٔ اختلاف سطح مایع خیس‌کننده در شاخهٔ آزاد و نمونه‌های خاک (h) به‌دست آمد. بدین ترتیب رابطهٔ پتانسیل ماتریک و مقدار حجمی مایع خاک (منحنی نگه‌داشت تجربی مایع خاک) حاصل شد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی خاک استفاده‌شده در آزمایش

بافت	شن	سیلت	رس	تخلخل حجمی	ρ_b	ρ_p	d_g	σ_g
	%				$g.cm^{-3}$		mm	
sandy loam	۶۲٫۷	۲۶٫۷	۱۰٫۶	۴۸٫۸	۱٫۲۹	۲٫۵۲	۰٫۱۸	۱۱٫۰۲

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی مادهٔ هیدروکربنی به‌کاررفته در آزمایش

نام سیال	وزن مخصوص	گرانروی سینماتیکی	گرانروی دینامیکی	کشش سطحی
	$g.cm^{-3}$	cst[ب]	cp[الف]	dyne/cm
سوخت دیزل	۰٫۸۳	۲٫۲۵[۳]	۲٫۷۱	۲۵٫۲[۳]
آب	۰٫۹۷۷	۰٫۸۹۷[۴]	۰٫۸۹۴۴	۶۸٫۶[۴]

الف) سانتی‌پواز ب) سانتی‌استوکس

از روش بار پایا[1] برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک برای سوخت دیزل و آب استفاده شد. مقدار مشخصی از خاک مورد مطالعه درون استوانه‌ای شفاف با ابعادی معین ریخته شد و سپس، برای اعمال جرم ویژهٔ ظاهری، خاک فشرده شد. برای جلوگیری از حبس هوا و همچنین به‌هم‌خوردگی سطح خاک در اثر تلاطم جریان، جریان سیالات به خاک از پایین به بالا برقرار شد. همچنین با قراردادن گلوله‌های شیشه‌ای در محل ورود آب به خاک (انتهای ستون خاک) از تخریب خاک در اثر جریان جلوگیری شد. پس از اعمال جریان یکنواخت تحت بار فشار ثابت، دبی سیال عبورکرده از خاک در مدت زمانی مشخص محاسبه شد. سپس با حل معادلهٔ دارسی مقدار هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل به‌دست آمد.

منحنی نگه‌داشت آب و سوخت دیزل با تابع هیدرولیکی ون‌گنوختن (VG)، بروکس- کوری (BC)، و کمپبل تا مکش ۱۵ بار پیش‌بینی شد. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل بر مبنای مدل‌های معلم- بروکس- کوری (M-BC)، بوردین- بروکس- کوری (B-BC)، معلم- ون‌گنوختن (M-VG)، و کمپبل برآورد شد.

برای بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها از آماره‌های خطای حداکثر[2]، ریشهٔ میانگین مربعات خطا[3]، ضریب تبیین[4]، کارایی مدل[5]، و ضریب جرم باقی‌مانده[6] استفاده شد (Homaee *et al*, 2002). مقادیر RMSE بالا نشان می‌دهد چه مقدار پیش‌بینی‌ها دست پایین[7] یا دست بالا[8] بوده‌اند (Zarei *et al*, 2010). در این پژوهش برای محاسبهٔ RMSE از روش Marquardt (1963) استفاده شد. مقادیر CD نیز معرف نسبت بین پراکندگی مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. هر چه مقدار EF به ۱ نزدیک‌تر باشد مدل پیش‌بینی بهتری دارد (Khodaverdiloo *et al*, 2011). شاخص CRM میل مدل را به پیش‌بینی دست بالا یا دست پایین نشان می‌دهد. مقدار CRM منفی یعنی مدل مقادیر را بیشتر و CRM مثبت یعنی مدل داده‌ها را کمتر از داده‌های مشاهده‌شده پیش‌بینی کرده است. اگر مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شدهٔ مدل برابر باشند، ME = 0، RMSE = 0، CD = 1، EF = 1، و CRM = 0 است. بیان ریاضی آماره‌های فوق به صورت زیر است (Homaee *et al*, 2002):

$$ME = Max\ |P_i - O_i|_{(i=1)}^{n} \qquad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2 / n} \qquad \text{(رابطه ۱۶)}$$

1. Constant Head Method
2. Maximum Error
3. Root Means Square Error
4. Coefficient of Determination
5. Modeling Efficiency
6. Coefficient of Residual Mass
7. Underestimate
8. Overestimate

Archive of SID

www.SID.ir

$$CD = \sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{O})^2 \qquad \text{(رابطه ۱۷)}$$

(رابطه ۱۸)

$$EF = [\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2] \Big/ \sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2$$

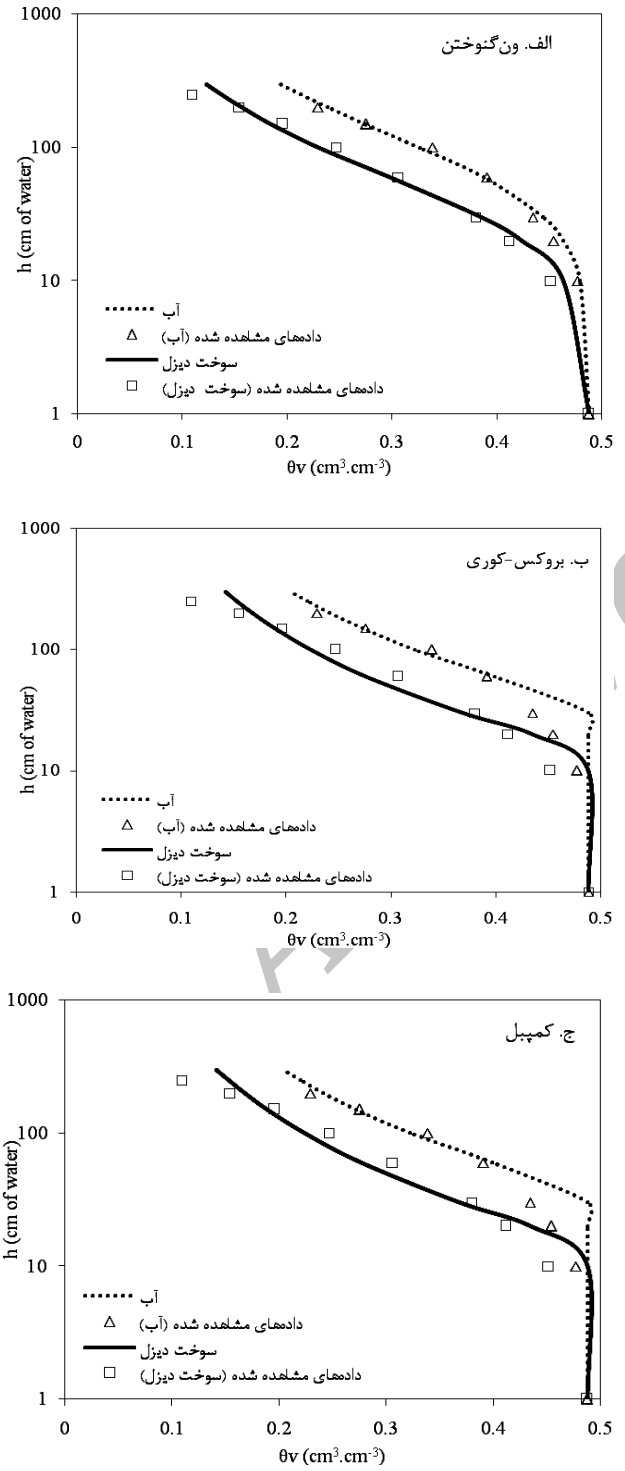
$$CRM = [\sum_{i=1}^{n}O_i - \sum_{i=1}^{n}P_i] \Big/ \sum_{i=1}^{n}O_i \qquad \text{(رابطه ۱۹)}$$

یافته‌ها و بحث

شکل ۱ داده‌های مشاهده‌شده و داده‌های برآوردشدهٔ منحنی‌های نگه‌داشت خاک را بر مبنای مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس- کوری، و کمپبل برای آب و سوخت دیزل نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در یک مقدار فاز مایع حجمی مقدار مکش کمتری برای زهکشی سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. بر اساس جدول ۲، کشش سطحی سوخت دیزل کمتر از مقادیر این ویژگی‌ها برای آب است. با توجه به معادلهٔ یانگ- لاپلاس[1] ($\psi_m = -2\sigma / r$) و با در نظر گرفتن رابطهٔ مستقیم کشش سطحی و پتانسیل ماتریک خاک انتظار می‌رود با کاهش کشش سطحی سیال مقدار نگه‌داشت خاک برای سیال مربوطه کاهش یابد. به‌عبارت دیگر، می‌توان چنین نتیجه گرفت که در یک مقدار مشخص از فاز مایع مقدار کمتری نیروی مکش برای خارج‌کردن سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. به همین دلیل منحنی نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل نسبت به آب در شکل ۱ پایین‌تر قرار گرفته است. جدول ۳ پارامترهای مدل‌های برازش‌یافته به منحنی نگه‌داشت تجربی سوخت دیزل و آب را نشان می‌دهد.

بر مبنای جدول ۳، مقدار پارامترهای توزیع خلل‌وفرج یا شیب منحنی (m، n، λ، $1/b$) در سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا نسبت به آب- هوا تغییر زیادی نداشته است. بنابراین شیب منحنی نگه‌داشت خاک در سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا و آب- هوا تقریباً بدون تغییر است. به‌علاوه، مقدار پارامترهای نمایندهٔ پتانسیل ورود هوا (α و $1/h_0$) در منحنی نگه‌داشت خاک برای سیستم دوفازی سوخت دیزل- هوا نسبت به آب- هوا افزایش داشته است. با توجه به اینکه پارامترهای نمایندهٔ پتانسیل ورود هوا با عکس نقطهٔ ورود هوا مرتبط‌اند، این افزایش نمادی از کاهش مقدار مکش ورود هواست. این بدان معناست که مقدار نیروی کمتری برای خارج‌کردن سوخت دیزل نسبت به آب لازم است. نتایج بررسی پارامتری این پژوهش با نتایج پژوهش‌های Jarsjö *et al* (1994)، Liu *et al* (1998)، Hopmans *et al* (1998)، Chen *et al* (1999)، و Sharma and Mohamed (2003) هم‌خوانی دارد. شکل ۲ برآورد هدایت هیدرولیکی خاک برای آب و سوخت دیزل با مدل‌های هدایت هیدرولیکی معلم- بروکس- کوری، بوردین- بروکس- کوری، معلم- ون‌گنوختن، و کمپبل را نشان می‌دهند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب است.



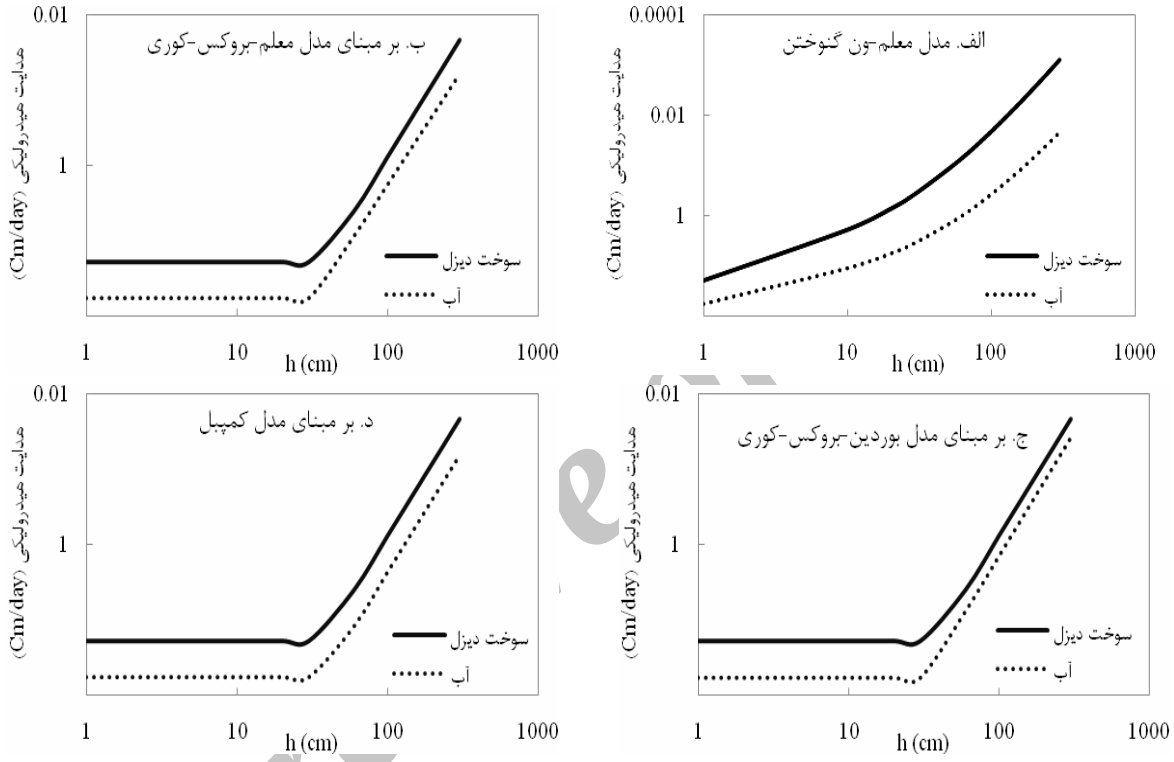
شکل ۱. داده‌های اندازه‌گیری‌شده و منحنی‌های نگه‌داشت برآوردشدهٔ خاک برای آب و سوخت دیزل

1. Young-Laplace equation

www.SID.ir

جدول ۳. پارامترهای مدل‌های منحنی نگه‌داشت و هدایت هیدرولیکی خاک

سیال	مدل										
	پارامترهای مشترک		Campbell		BC, B-BC و M-BC			VG و VG-M			
	K_s	θ_s	b	h_0	θ_r	λ	α	ℓ	θ_r	α	m	n
	cm.day^{-1}	cm^3.cm^{-3}	-	cm	cm^3.cm^{-3}	-	cm^{-1}	-	cm^3.cm^{-3}	cm^{-1}		-
آب	۵۷٫۸۴	۰٫۴۹	۲٫۴	۳۷	۰٫۰۰	۰٫۴۱	۰٫۰۲۷	۰٫۵	۰٫۰۰	۰٫۰۱۵	۰٫۳۷	۱٫۵۹
سوخت دیزل	۱۹٫۱	۰٫۴۹	۲٫۴	۱۵٫۲	۰٫۰۰	۰٫۴۱	۰٫۰۶۵	۰٫۵	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۳۸	۱٫۶۲



شکل ۲. منحنی‌های برآوردشدهٔ پتانسیل ماتریک- هدایت هیدرولیکی خاک مطالعه‌شده برای سوخت دیزل و آب

طبق تعریف، لزوجت یا گرانروی بیانگر نیروی اصطکاک بین لایه‌های سیال در جریان و در حقیقت نیروی بازدارندهٔ حرکت است (Streeter *et al*, 1998). بنابراین، گرانروی بالای سیالات بیانگر اصطکاک و مقاومت بیشتر در برابر جریان است. جدول ۲ نشان می‌دهد لزوجت مطلق سوخت دیزل حدود دو برابر بیشتر از آب است. در نتیجه هدایت هیدرولیکی اشباع محیط برای سوخت دیزل نسبت به آب کمتر است. از طرف دیگر، با توجه به رابطهٔ مستقیم بین لزوجت سینماتیکی و مقاومت هیدرولیکی خاک R_H، افزایش لزوجت سینماتیکی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع می‌شود. همچنین با توجه به نگه‌داشت کمتر خاک برای سوخت دیزل، در پتانسیل ماتریک یکسان مقدار مایع خاک در سیستم سوخت دیزل- هوا کمتر است که این پدیده باعث کاهش تخلخل مؤثر در جریان خاک می‌شود. بنابراین، مقدار هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک برای آب همواره بیشتر از سوخت دیزل بود (شکل ۲).

با تقسیم‌کردن پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگه‌داشت تجربی سوخت دیزل بر پتانسیل ماتریک خاک در منحنی نگه‌داشت تجربی آب (در حجم یکسان مایع خاک) مقدار ۰٫۴۳ به‌دست آمد. فاکتور مقیاسی لورت (رابطه ۵) با توجه به نسبت کشش سطحی سوخت دیزل و آب حدود ۰٫۳۷ تعیین گردید. بنابراین مدل مقیاسی لورت با دقت مناسبی منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل- هوا را برآورد کرده است.

نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های هیدرولیکی خاک در جدول ۴ می‌آید. این جدول نشان می‌دهد در سیستم‌های دوفازی آب- هوا و NAPL- هوا، دو مدل کمپبل و بروکس- کوری کارایی کمتری نسبت به مدل ون‌گنوختن دارند. بنابراین مدل ون‌گنوختن کارایی بیشتری برای پیش‌بینی منحنی نگه‌داشت هر دو سیال آب و سوخت دیزل دارد. همچنین کارایی و دقت

www.SID.ir

جدول ۴. آماره‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی مدل‌های ون‌گنوختن، بروکس‌ـ کوری، و کمپبل

مدل	سیال	ME (-)	RMSE (%)	CD (-)	EF (-)	CRM (-)
ون‌گنوختن	سوخت دیزل	۲/۷	۱/۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۰
	آب	۱/۲	۰/۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۰۰
بروکس‌ـ کوری	سوخت دیزل	۴/۳	۲/۵	۰/۹۸	۰/۹۶	-۰/۰۱
	آب	۵/۳	۲/۳	۰/۶۸	۰/۸۹	--۰/۰۳
کمپبل	سوخت دیزل	۴/۳	۲/۴	۰/۹۸	۰/۹۶	-۰/۰۲
	آب	۵/۳	۲/۳	۰/۸۱	۰/۹۳	-۰/۰۳

هر سه مدل ون‌گنوختن، بروکس‌ـ کوری، و کمپبل در برآورد منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل بیشتر از آب است. مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل منحنی نگه‌داشت خاک را در نمودارهای لگاریتمی به صورت دو خط متصل‌شده در نقطهٔ ورود هوا برآورد می‌کنند. این ناپیوستگی[1] در نقطهٔ ورود هوا به خاک سبب می‌شود مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل داده‌های منحنی نگه‌داشت خاک را بیش‌برآورد کنند (شکل‌های ۱ ب و ۱ ج). مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل نشان‌دهندهٔ بیش‌برآوردی مدل‌هاست. ناپیوستگی مذکور در منحنی نگه‌داشت برآوردشده بر مبنای مدل ون‌گنوختن دیده نمی‌شود. به عبارت دیگر، نگاه مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل به فرایند ورود هوا به خاک به صورت نقطه‌ای و دیدگاه مدل ون‌گنوختن به صورت فرایندی تدریجی است. بنابراین بیش‌برآوردی مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل در ناحیهٔ ورود هوا به خاک در مدل ون‌گنوختن دیده نمی‌شود (شکل ۱ الف). مقادیر CRM مثبت در مدل ون‌گنوختن نشان‌دهندهٔ کم‌برآوردی مدل ون‌گنوختن است. به‌علاوه، مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل RMSE کمتری نسبت به مدل ون‌گنوختن دارند. به‌طور کلی، مدل ون‌گنوختن بهترین پیش‌بینی را برای منحنی نگه‌داشت آب و سوخت دیزل ارائه می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی پارامتریک نگه‌داشت سوخت دیزل و آب در خاک نشان داد به‌دلیل کشش سطحی کمتر سوخت دیزل نسبت به آب نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل از آب کمتر است. همچنین تغییرات پارامترهای توزیع تخلخل یا شیب منحنی (n، λ، b/۱) ناچیز و پارامترهای نقطهٔ ورود هوا (α و h_0/۱) مدل‌های هیدرولیکی در حضور سوخت دیزل افزایش می‌یابد. به‌دلیل لزوجت سینماتیکی بیشتر سوخت دیزل نسبت به آب و نگه‌داشت کمتر سوخت دیزل در محیط، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک برای سوخت دیزل کمتر از آب است. مقدار نسبت داده‌های پتانسیل ماتریک منحنی نگه‌داشت سوخت دیزل به پتانسیل ماتریک منحنی نگه‌داشت آب در حجم یکسان از مایع خاک ۰/۴۳ بود. با توجه به مقدار فاکتور مقیاسی لورت،۰/۳۷، تابع مقیاسی لورت توانسته منحنی نگه‌داشت LNAPL را در شرایط دو فازی با دقت مناسب برآورد کند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد کارایی مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل در برآورد منحنی نگه‌داشت خاک برای سوخت دیزل و آب کمتر از مدل ون‌گنوختن است. مقدار مثبت آمارهٔ CRM مدل ون‌گنوختن نشان‌دهندهٔ کم‌برآوردی مدل و مقادیر CRM منفی در مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل نشان‌دهندهٔ بیش‌برآوردی آن‌هاست. مقدار آمارهٔ RMSE مدل‌های بروکس‌ـ کوری و کمپبل نسبت به دو مدل ون‌گنوختن بیشتر بود. به‌طور کلی، مدل ون‌گنوختن برآوردی بهتر و دقیق‌تر از نگه‌داشت خاک در سیستم‌های دو فازی سوخت دیزل‌ـ هوا ارائه می‌کنند.

REFERENCES

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1966). Properties of porous media affecting fluid flow, Journal of the irrigation and drainage division. In: Proceddings of *American Society of Civil Engineerings*, pp. 61-88.

Burdine, N.(1953). Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Trans. AIME*, 198, 71-78.

Busby, R.D. Lenhard, R.J. and Rolston, D.E. (1995). An Investigation of Saturation-Capillary Pressure Relations in Two-and Three-Fluid Systems for Several NAPLs in Different Porous Media. *Ground Water*, 33(4), 570-578.

Campbell, G.S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117(6), 311-314.

Chen, J. Hopmans, J. and Grismer, M. (1999). Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Advances in Water Resources*, 22(5), 479-493.

1. Discontinuity

Archive of SID

www.SID.ir

Childs, E.C. and Collis-George, N.(1950). The Permeability of Porous Materials. Proceedings of the Royal Society A: *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 201(1066), 392-405.

Demond, A.H. and Roberts, P.V. (1991). Effect of interfacial forces on two-phase capillary pressure-saturation relationships. *Water Resources Research*, 27(3), 423-437.

Fagerlund, F., Illangasekare, T., Phenrat, T., Kim, H.J. and Lowry, G. (2012). PCE dissolution and simultaneous dechlorination by nanoscale zero-valent iron particles in a DNAPL source zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 131, 9-28.

Homaee, M., Dirksen, C. and Feddes, R. (2002). Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57(2), 89-109.

Hopmans, J.W., Grismer, M.E., Chen, J. and Liu, Y. (1998). Parameter estimation of two-fluid capillary pressure saturation and permeability functions. *US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory*.

Høst-Madsen, J. and Høgh Jensen, K. (1992). Laboratory and numerical investigations of immiscible multiphase flow in soil. *Journal of Hydrology*, 135(1-4), 13-52.

Jackson, R.D. (1972). On the Calculation of Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 36(2), 380-382.

Jarsjö, J., Destouni, G. and Yaron, B. (1994). Retention and volatilisation of diesel fuel: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17(2), 167-185.

Khodaverdiloo, H., Homaee, M., van Genuchten, M.T. and Dashtaki, S.G. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399(1-2), 93-99.

Leij, F.J., Russell, W.B. and Lesch, S.M. (1997). Closed form expressions for water retention and conductivity data. *Ground Water*, 35(5), 848-858.

Lenhard, R. and Parker, J. (1988). Experimental validation of the theory of extending two-phase saturation-pressure relations to three-fluid phase systems for monotonic drainage paths. *Water Resources Research*, 24(3), 373-380.

Leverett, M. (1941). Capillary behavior in porous media. *Trans. AIME*, 142, 341-358.

Liu, Y., Hopmans, J., Grismer, M. and Chen, J. (1998). Direct estimation of air-oil and oil-water capillary pressure and permeability relations from multi-step outflow experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 32(3-4), 223-245.

Makó, A. (2005). Measuring the two-phase capillary pressure-saturation curves of soil samples saturated with nonpolar liquids. *Communications in soil science and plant analysis*, 36(4-6), 439-453.

Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.

Mercer, J. and Waddell, D. (1993). Contaminant transport in groundwater. In Maidmentm, D. R. (Ed), *Handbook of hydrology*. McCraw-Hill, New York, N.Y.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.

Mualem, Y. (1992). Modeling the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. In: proceeding of Indirect Methods of *Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Univ. of California, Riverside, pp.: 15-36.

Nouri, M., Homaee, M. and Bybordi, M. (2012a). Parametric assessment of soil retention curves in three phase NAPL-water-air system. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(2), 15-24. (In Farsi)

Nouri, M., Homaee, M. and Bybordi, M. (2012b). Parametric Investigation of Kerosene-Air Capillary Pressure–Saturation Functions. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(1), 35-47. (In Farsi)

Nouri, M., Homaee, M. and Bybordi, M. (2014). Comparing petroleum and water hydraulic properties in soil *JWSS - Isfahan University of Technology*, 17(66), 123-133. (In Farsi)

Parker, J. and Lenhard, R. (1987). A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow: 1. Saturation-pressure relations. *Water Resources Research*, 23(12), 2187-2196.

Sharma, R.S. and Mohamed, M.H.A. (2003). An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand. *Engineering Geology*, 70(3-4), 305-313.

Streeter, V.L., Wylie, E.B. and Bedford, K.W. (1998). *Fluid mechanics* (9th ed). McGraw-Hill.

van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.

Weiner, E.R. (2000). Applications of environmental chemistry: a practical guide for environmental professionals. CRC Press.

Zarei, G., Homaee, M., Liaghat, A.M. and Hoorfar, A.H. (2010). A model for soil surface evaporation based on Campbell's retention curve. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 356-361.

Archive of SID

www.SID.ir