

جدول ۱-۱: ویژگی‌های مؤثر بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک (برگرفته از راولز و همکاران، ۱۹۹۱؛ وستن و همکاران، ۲۰۰۱)

ویژگی‌های ذرات و منافذ خاک	ویژگی‌های هیدرولیکی معین	ویژگی‌های مورفولوژیکی	ویژگی‌های شیمیایی
درصد ذرات شن، سیلت و رس	مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۳۳ kPa	چگالی ظاهری	گنجایش تبادل کاتیونی
شن ریز	مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۵۰۰ kPa	کربن و ماده آلی	نسبت جذب سدیم
شن درشت	منحنی مشخصه رطوبتی مرجع ^۱	تخلخل	رسانایی الکتریکی
شن خیلی درشت		افق خاک	کربنات کلسیم
ذرات درشت ^۲		ساختمان خاک	اکسیدهای آهن و آلومینیم
توزیع اندازه ذرات		رنگ خاک	
میانه اندازه ذرات (D ₅₀)		نوع کانی‌های رسی	
میانگین هندسی		درجه خاکدانه‌ای بودن ^۳	
انحراف معیار هندسی		رده خاک	
توزیع اندازه خاکدانه‌ها			
شاخص‌های خاکدانه‌سازی			

توابع انتقالی خاک نقطه‌ای:

گوپتا و لارسون (۱۹۷۹) با استفاده از داده‌های SWCC نمونه‌های دست‌خورده خاک‌های ۱۰ منطقه جغرافیایی مرکزی و شرقی ایالات متحده، رابطه رگرسیونی نقطه‌ای زیر را برای ۴۳ نمونه خاک ارائه نمودند:

$$\theta_h = a \times \text{Sand} + b \times \text{Silt} + c \times \text{Clay} + d \times \text{OM} + e \times \text{BD} \quad (۶۶-۱)$$

این رابطه برای ۱۲ مکش ماتریک بین ۲۰ تا ۱۵۰۰ kPa بررسی شد (درصد رطوبت حجمی خاک‌ها بین ۳ تا ۸۲ متغیر بود) که ضرایب آن در جدول ۱-۲ آورده شده است. دامنه درصد‌های شن، سیلت و رس خاک‌های مورد بررسی به ترتیب ۵-۹۸، ۱-۷۲ و ۰-۶۵ بود. دامنه درصد ماده آلی و BD خاک‌ها نیز بسیار وسیع بود (به ترتیب ۰-۲۳ و ۰/۷۴-۱/۷۴ Mg m⁻³).

راولز و براکنزیک (۱۹۸۲) و راولز و همکاران (۱۹۸۲) با استفاده از مجموعه بسیار گسترده‌ای از داده‌ها (داده‌های ۲۵۴۳ افق از ۵۰۰ خاک با محدوده وسیعی از ویژگی‌های ذاتی از ۱۸ ایالت در ایالات متحده)، سه رابطه رگرسیون خطی نقطه‌ای برای برآورد مقدار رطوبت خاک در ۱۲ مکش ماتریک ارائه نمودند که ساده‌ترین آن به صورت زیر است:

$$\theta_h = a + b \times \text{Sand} + c \times \text{Silt} + d \times \text{Clay} + e \times \text{OM} + f \times \text{BD} \quad (۶۷-۱)$$

¹ Reference water retention curve

² Fragments

³ Pedality

ضرایب روابط رگرسیونی چندگانه برای مکش‌های ماتریک مختلف در جدول ۱-۳ آورده شده است. با توجه به جدول مذکور، ثابت a (عرض از مبدأ) در تمامی مکش‌های ماتریک معنی‌دار شده ولی برخی از ضرایب معنی‌دار نشده‌اند. در معادله ۱-۶۷، به دلیل وابستگی ضرایب b، c و d، تنها یک یا دو ضریب از سه ضریب به طور همزمان در روابط وارد شده است. آنها توصیه کردند که برای برآورد مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک بینابینی از روش درون‌یابی غیرخطی استفاده شود. ضرایب همبستگی چندگانه بدست آمده در دامنه ۰/۸۷-۰/۸۰ متغیر بود. تعدادی از ضرایب معادله صفر می‌باشند که نشان‌دهنده تأثیر بسیار جزئی این ویژگی‌ها بر نگهداری آب در خاک است. برای مثال، در مکش‌های ماتریک ۱۰ kPa و بالاتر، BD بر نگهداری آب خاک اثر ندارد (جدول ۱-۳). ضرایب جدول ۱-۳ نشان می‌دهد که روابط بدست آمده حساسیت کمی به مقدار ماده آلی خاک دارند، به طوری که یک درصد افزایش ماده آلی سبب افزایش رطوبت حجمی خاک به میزان ۱/۵ و ۳/۲ درصد در مکش‌های ماتریک ۱۰ و ۱۵۰۰ kPa می‌شود. از طرفی چون بسیاری از خاک‌های کشاورزی دامنه مقدار ماده آلی محدودی دارند (۳-۰ درصد)، اثر ماده آلی در این رابطه اندک می‌باشد. این تأییدی بر اثر عمده بافت بر نگهداری آب در خاک است. مؤثرترین عامل در این رابطه، درصد رس خاک است (جدول ۱-۳). کوسبی و همکاران (۱۹۸۴) نیز با بکارگیری روش‌های رگرسیونی و تحلیل‌های دیگر بر روی داده‌های مختلف آشکارا نشان دادند که بافت خاک بر مشخصه‌های هیدرولیکی خاک مؤثر است.

جدول ۱-۲: ضرایب معادله رگرسیون چندگانه خطی (۱-۶۶) برای برآورد مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های ماتریک مختلف (برگرفته از گوپتا و لارسون، ۱۹۷۹)

مکش ماتریک (kPa)	$a \times 10^3$	$b \times 10^3$	$c \times 10^3$	$d \times 10^3$	$e \times 10^2$	ضریب همبستگی (R)
۴	۷/۰۵۳	۱۰/۲۴۲	۱۰/۰۷۰	۶/۳۳۳	-۳۲/۱۲۰	۰/۹۵۰
۷	۵/۶۷۸	۹/۲۲۸	۹/۱۳۵	۶/۱۰۳	-۲۶/۹۶۰	۰/۹۵۹
۱۰	۵/۰۱۸	۸/۵۴۸	۸/۸۳۳	۴/۹۶۶	-۲۴/۲۳۰	۰/۹۶۱
۲۰	۳/۸۹۰	۷/۰۶۶	۸/۴۰۸	۲/۸۱۷	-۱۸/۷۸۰	۰/۹۶۲
۳۳	۳/۰۷۵	۵/۸۸۶	۸/۰۳۹	۲/۲۰۸	-۱۴/۳۴۰	۰/۹۶۲
۶۰	۲/۱۸۱	۴/۵۵۷	۷/۵۵۷	۲/۱۹۱	-۹/۲۷۶	۰/۹۶۴
۱۰۰	۱/۵۶۳	۳/۶۲۰	۷/۱۵۴	۲/۳۸۸	-۵/۷۵۹	۰/۹۶۶
۲۰۰	۰/۹۳۲	۲/۶۴۳	۶/۶۳۶	۲/۷۱۷	-۲/۲۱۴	۰/۹۶۷
۴۰۰	۰/۴۸۳	۱/۹۴۳	۶/۱۲۸	۲/۹۲۵	-۰/۲۰۴	۰/۹۶۲
۷۰۰	۰/۲۱۴	۱/۵۳۸	۵/۹۰۸	۲/۸۵۵	۱/۵۳۰	۰/۹۵۴
۱۰۰۰	۰/۰۷۶	۱/۳۳۴	۵/۸۰۲	۲/۶۵۳	۲/۱۴۵	۰/۹۵۱
۱۵۰۰	-۰/۰۵۹	۱/۱۴۲	۵/۷۶۶	۲/۲۲۸	۲/۶۷۱	۰/۹۴۷

جدول ۱-۳: ضرایب معادله رگرسیون چندگانه خطی (۱-۶۷) برای برآورد مقدار رطوبت حجمی در مکش های ماتریک مختلف (برگرفته از راولز و همکاران، ۱۹۸۲)

مکش ماتریک (kPa)	عرض از مبدأ (a)	شن (b)	سیلت (c)	رس (d)	ماده آلی (e)	ضریب همبستگی (R)
۱۰	۰/۴۱۱۸	-۰/۰۰۳	۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۳۱۷	۰/۸۱
۲۰	۰/۳۱۲۱	-۰/۰۰۲۴	۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۳۱۴	۰/۸۳
۳۳	۰/۲۵۷۶	-۰/۰۰۲۰	۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۹۹	۰/۸۷
۶۰	۰/۲۰۶۵	-۰/۰۰۱۶	۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۲۷۵	۰/۸۷
۱۰۰	۰/۰۳۴۹	۰	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵۵	۰/۰۲۵۱	۰/۸۷
۲۰۰	۰/۰۲۸۱	۰	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۲۲۰	۰/۸۶
۴۰۰	۰/۰۲۳۸	۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱۹۰	۰/۸۴
۷۰۰	۰/۰۲۱۶	۰	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵۰	۰/۰۱۶۷	۰/۸۱
۱۰۰۰	۰/۰۲۰۵	۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۵۴	۰/۸۱
۱۵۰۰	۰/۰۲۶۰	۰	۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۱۵۸	۰/۸۰

جدول ۱-۴: مقادیر متوسط برخی از پارامترهای مدل های SWCC و هدایت هیدرولیکی برای ۱۱ گروه اصلی بافت خاک (برگرفته از راولز و همکاران، ۱۹۸۲)

بافت خاک	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm d ⁻¹)
شن	۰/۰۲۰	۰/۴۱۷	۰/۱۳۸	۱/۵۹۲	۵۰۴/۰
شن لومی	۰/۰۳۵	۰/۴۰۱	۰/۱۱۵	۱/۴۷۴	۱۴۶/۶
لوم شنی	۰/۰۴۱	۰/۴۱۲	۰/۰۶۸	۱/۳۲۲	۶۲/۱۶
لوم	۰/۰۲۷	۰/۴۳۴	۰/۰۹۰	۱/۲۲۰	۱۶/۳۲
لوم سیلت	۰/۰۱۵	۰/۴۸۶	۰/۰۴۸	۱/۲۱۱	۳۱/۶۸
لوم رسی شنی	۰/۰۶۸	۰/۳۳۰	۰/۰۳۶	۱/۲۵۰	۱۰/۳۲
لوم رسی	۰/۰۷۵	۰/۳۹۰	۰/۰۳۹	۱/۱۹۴	۵/۵۲
لوم رسی سیلتی	۰/۰۴۰	۰/۴۳۲	۰/۰۳۱	۱/۱۵۱	۳/۶۰
رس شنی	۰/۱۰۹	۰/۳۲۱	۰/۰۳۴	۱/۱۶۸	۲/۸۸
رس سیلتی	۰/۰۵۶	۰/۴۲۳	۰/۰۲۹	۱/۱۲۷	۲/۱۶
رس	۰/۰۹۰	۰/۳۸۵	۰/۰۲۷	۱/۱۳۱	۱/۴۴

جدول ۵-۱: مقادیر متوسط برخی از پارامترهای مدل‌های SWCC و هدایت هیدرولیکی برای ۱۲ گروه اصلی بافت خاک (برگرفته از کارسل و پاریش، ۱۹۸۸)

بافت خاک	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm d ⁻¹)
شن	۰/۰۴۵	۰/۴۳	۰/۱۴۵	۲/۶۸	۷۱۲/۸
شن لومی	۰/۰۵۷	۰/۴۱	۰/۱۲۴	۲/۲۸	۳۵۰/۲
لوم شنی	۰/۰۶۵	۰/۴۱	۰/۰۷۵	۱/۸۹	۱۰۶/۱
لوم	۰/۰۷۸	۰/۴۳	۰/۰۳۶	۱/۵۶	۲۴/۹۶
سیلت	۰/۰۳۴	۰/۴۶	۰/۰۱۶	۱/۳۷	۶/۰۰
لوم سیلت	۰/۰۶۷	۰/۴۵	۰/۰۲۰	۱/۴۱	۱۰/۸۰
لوم رسی شنی	۰/۱۰۰	۰/۳۹	۰/۰۵۹	۱/۴۸	۳۱/۴۴
لوم رسی	۰/۰۹۵	۰/۴۱	۰/۰۱۹	۱/۳۱	۶/۲۴
لوم رسی سیلتی	۰/۰۸۹	۰/۴۳	۰/۰۱۰	۱/۲۳	۱/۶۸
رس شنی	۰/۱۰۰	۰/۳۸	۰/۰۲۷	۱/۲۳	۲/۸۸
رس سیلتی	۰/۰۷۰	۰/۳۶	۰/۰۰۵	۱/۰۹	۰/۴۸
رس	۰/۰۶۸	۰/۳۸	۰/۰۰۸	۱/۰۹	۴/۸۰

جدول ۶-۱: توابع انتقالی خاک پیوسته برای برآورد پارامترهای مدل بروکس و کوری در خاک‌های ایالات متحده (راولز و براکنزیک، ۱۹۸۵) و ونگنختن-معلم در خاک‌های بلژیک (وریکن، ۱۹۸۸؛ وریکن و همکاران، ۱۹۸۹)[†]

مدل بروکس و کوری برای خاک‌های ایالات متحده
$a = \exp(5.340 + 0.185C - 2.484\phi - 0.002C^2 - 0.044S.\phi - 0.617C.\phi + 0.001S^2.\phi^2 - 0.009C^2.\phi^2 - 0.00001S^2.C + 0.009C^2.\phi - 0.0007S^2.\phi + 0.000001C^2.S + 0.500\phi^2.C)$
$n = \exp(-0.784 + 0.018S - 1.062\phi - 0.00005S^2 - 0.003C^2 + 1.111\phi^2 - 0.031S.\phi + 0.0003S^2.\phi^2 - 0.006C^2.\phi^2 - 0.000002S^2.C + 0.008C^2.\phi - 0.007\phi^2.C)$
$\theta_r = -0.018 + 0.0009S + 0.005C + 0.029\phi - 0.0002C^2 - 0.001S.\phi - 0.0002C^2.\phi^2 + 0.0003C^2.\phi - 0.002\phi^2.C$
مدل ونگنختن-معلم برای خاک‌های بلژیک
$\theta_r = 0.015 + 0.005C + 0.014Ca$
$\alpha = 10^{(-2.486 + 0.025S - 0.351Ca - 2.617BD - 0.023C)}$
$n = 10^{(0.053 - 0.009S - 0.013C + 0.00015S^2)}$
$m = 1 - 1/n$

[†] در این روابط، θ_r مقدار رطوبت باقی‌مانده بر حسب $m^3 m^{-3}$ ، a برابر مکش ورود هوا و بر حسب cm ، α برابر عکس مکش ماتریک در نقطه عطف بر حسب cm^{-1} ، و n و m بی‌بعدند؛ C درصد رس، S درصد شن، Ca درصد کربن آلی و ϕ تخلخل خاک بر حسب $m^3 m^{-3}$ و m و BD چگالی ظاهری بر حسب $Mg m^{-3}$ می‌باشند.

توابع انتقالی خاک پارامتری (پیوسته):

وستن و همکاران (۱۹۹۵ و ۱۹۹۷) برای بدست آوردن PTFs پیوسته برای خاک‌های هلند (۶۲۰ SWCC از ۳۶ واحد خاک) از مدل‌های ونگنختن (معادله ۱-۲۴) و معلم (معادله ۱-۵۸) استفاده کردند. این مدل‌ها به طور همزمان بر داده‌های SWCC و هدایت هیدرولیکی خاک برازش شدند. سپس روابط رگرسیونی بین پارامترهای مدل‌ها و ویژگی‌های زودپافت خاک بررسی شد. برای پیروی از یک سری شرایط مرزی فیزیکی، پارامترهای تبدیل شده به جای پارامترهای اولیه مدل‌ها استفاده شد. برای خاک‌های شنی، شرایط مرزی اعمال شده عبارت بودند از: $\alpha > 0$ ، $K_s > 0$ ، $n > 1$ و $-2 < l < +2$. برای خاک‌های لومی و رسی، شرط مرزی آخر به صورت $-10 < l < +10$ بود. در نتیجه، پارامترهای مذکور به این صورت تبدیل شدند: $K_s^* = \ln(K_s)$ ، $\alpha^* = \ln(\alpha)$ و $n^* = \ln(n-1)$. همچنین برای خاک‌های شنی تبدیل متغیر $l^* = \ln((l+2)/(2-l))$ و برای خاک‌های لومی و رسی، تبدیل متغیر $l^* = \ln((l+10)/(10-l))$ استفاده شد.

برای خاک‌های شنی، ویژگی‌های پایه زیر برای متغیرهای برازش استفاده شد: درصد رس+سیلت، درصد ماده آلی، چگالی ظاهری، اندازه میانه ذرات شن^۴، و متغیر کیفی خاک رویین یا زیرین. برای خاک‌های لومی و رسی به جای درصد رس+سیلت از درصد رس استفاده شد. روابط خطی، معکوس و توانی این ویژگی‌های پایه و اثرات متقابل احتمالی در برازش‌های رگرسیونی بررسی شد. در جدول ۱-۷، PTFs پیوسته حاصله ارائه شده‌اند. در واقع پس از برآورد پارامترهای تبدیل شده به کمک PTFs، آنها به پارامترهای اصلی مدل‌ها تبدیل می‌شوند. در جدول ۱-۷، دو PTF برای عکس چگالی ظاهری (حجم ویژه^۵) نیز آورده شده است (وستن و همکاران، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷).

وستن و همکاران (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) در پروژه‌ای که توسط اتحادیه اروپا حمایت مالی شد، داده‌های هیدرولیکی خاک‌های اروپا را از موسسه‌های مختلف جمع‌آوری نموده و در قالب یک بانک اطلاعاتی ارزشمند خاک‌های اروپا^۶ (HYPRES) ارائه نمودند. سپس این مجموعه داده برای بدست آوردن PTFs کلاسی و پیوسته پارامترهای مدل‌های هیدرولیکی مشهور به کار گرفته شد. مجموعاً ۲۰ موسسه از ۱۲ کشور اروپایی در ایجاد این بانک اطلاعاتی همکاری کردند. مجموعه داده حاصله انعطاف‌پذیری زیادی در پذیرش داده‌های مختلف هیدرولیکی و پدولوژیکی خاک دارد. چون داده‌های جمع‌آوری شده از مراکز پژوهشی مختلف تهیه شده بود، لازم آمد که داده‌های توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌ها استاندارد گردند. یک روش جدید درون‌یابی

⁴ Median sand particle size

⁵ Specific volume

⁶ HYdraulic PROPERTIES of European Soils

بر اساس تشابه^۷ برای استاندارد نمودن توزیع اندازه ذرات بر اساس دامنه ذرات سیستم FAO به کار گرفته شد. برای استاندارد نمودن داده‌های هیدرولیکی خاک از برازش مدل‌های ونگنختن و معلم استفاده شد.

جدول ۱-۷: توابع انتقالی خاک پیوسته برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی و چگالی ظاهری خاک‌های هلند (برگرفته از وستن و همکاران، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷)[†]

خاک‌های شنی	
$\theta_s = -13.6 - 0.01533CS + 0.0000836CS^2 - 0.0973CS^{-1} + 0.708D^{-1} - 0.00703M_{50} + 225.3M_{50}^{-1} + 2.614\ln(M_{50}) + 0.0084OM^{-1} + 0.02256\ln(OM) + 0.00718D.CS$	$R^2=71\%$
$K_s^* = 9.5 - 1.471D^2 - 0.668OM + 0.0369OM^2 - 0.332\ln(CS)$	$R^2=32\%$
$\alpha^* = 146.9 - 0.0832OM - 0.395\text{topsoil} - 102.1D + 22.61D^2 - 70.6D^{-1} - 1.872CS^{-1} - 0.3931\ln(CS)$	$R^2=53\%$
$l^* = 0.797 - 0.591OM + 0.0677OM^2 + 0.573\text{topsoil}$	$R^2=42\%$
$n^* = 1092 + 0.0957CS + 1.336M_{50} - 13229M_{50}^{-1} - 0.001203M_{50}^2 - 234.6\ln(M_{50}) - 2.67D^{-1} - 0.115OM^{-1} - 0.4129\ln(OM) - 0.0721D.CS$	$R^2=63\%$
$\frac{1}{BD} = -1.984 + 0.01841OM + 0.032\text{topsoil} + 0.00003576CS^2 + 67.5M_{50}^{-1} + 0.424\ln(M_{50})$	$R^2=72\%$
خاک‌های لومی و رسی	
$\theta_s = 0.8085 - 0.2617D - 0.038\text{topsoil} + 0.00001046C^2 + 0.01287\ln(OM) + 0.000789C.\text{topsoil}$	$R^2=86\%$
$K_s^* = -43.1 + 64.8D - 22.21D^2 + 7.02OM - 0.1562OM^2 + 0.985\ln(OM) - 0.01332C.OM - 4.71D.OM$	$R^2=30\%$
$\alpha^* = 11 - 2.298D^2 - 12.41D^{-1} + 0.838OM + 0.343OM^{-1} + 2.03\ln(OM) - 1.263D.OM$	$R^2=51\%$
$l^* = 0.451 + 2.678D^{-1} - 1.093\ln(C)$	$R^2=44\%$

⁷ Novel similarity interpolation procedure

$$n^* = -0.34 + 1.224D^{-1} - 0.7952\ln(C) - 0.320\ln(OM) + 0.065ID.OM \quad R^2=74\%$$

$$\frac{1}{D} = 0.603 + 0.003975C + 0.00207OM^2 + 0.01781\ln(OM) \quad R^2=77\%$$

† در این روابط، θ_s ، K_s^* ، α^* ، n^* و I^* پارامترهای تبدیل شده مدل‌های ونگنختن و معلم هستند، θ_s بر حسب $m^3 m^{-3}$ ، K_s بر حسب $cm day^{-1}$ ، α بر حسب cm^{-1} و n و I بی‌بعدند؛ C بیانگر درصد رس (ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون)؛ CS نشان‌دهنده درصد رس + سیلت (ذرات کوچک‌تر از ۵۰ میکرون)؛ OM درصد ماده آلی؛ D چگالی ظاهری بر حسب $Mg m^{-3}$ ؛ M_{50} اندازه میانه ذرات شن؛ بوده و خاک روئین (topsoil) و زیرین (subsoil) متغیرهای کیفی بودند که به ترتیب با مقادیر ۱ و ۰ بیان شدند.

بانک اطلاعاتی HYPRES دارای اطلاعات ۵۵۲۱ افق خاک (با در نظر گرفتن تکرار) می‌باشد که از این مجموعه، ۴۰۳۰ افق آن دارای داده‌های کافی برای استخراج PTFs بودند. برای ۱۱۳۶ افق، داده‌های SWCC و هدایت هیدرولیکی خاک و برای ۲۸۹۴ افق، تنها داده‌های SWCC در دسترس بود. افق‌های خاک در ۱۱ کلاس بافتی/پدولوژیکی FAO قرار گرفتند (شش کلاس بافتی که پنج عدد آنها معدنی و یکی آلی است و دو کلاس پدولوژیکی خاک روئین و زیرین). مقیاس مجموعه داده جغرافیایی خاک اروپا^۸ (۱:۱۰۰۰۰۰۰) استفاده شد. آنها به کمک PTFs کلاسی و مقیاس ذکر شده، توزیع مکانی AWC برای خاک‌های اروپا را ارائه نمودند (وستن و همکاران، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹).

وستن و همکاران (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) برای بدست آوردن PTFs پیوسته برای خاک‌های اروپا از مدل‌های ونگنختن و معلم استفاده کردند. این مدل‌ها به طور همزمان بر داده‌های SWCC و هدایت هیدرولیکی خاک برازش شدند. سپس روابط رگرسیونی بین پارامترهای مدل‌ها و ویژگی‌های زود یافت خاک بررسی شد. برای پیروی از یک سری شرایط مرزی فیزیکی، پارامترهای تبدیل شده به جای پارامترهای اولیه مدل‌ها استفاده شد. شرایط مرزی اعمال شده عبارت بودند از: $\alpha > 0$ ، $K_s > 0$ ، $n > 1$ و $-10 < I < +10$. در نتیجه، پارامترهای مذکور به صورت زیر تبدیل شدند: $K_s^* = \ln(K_s)$ ، $n^* = \ln(n-1)$ ، $\alpha^* = \ln(\alpha)$ و $I^* = \ln((I+10)/(I-10))$. ویژگی‌های پایه زیر به عنوان متغیرهای برازش استفاده شد: درصد رس، درصد سیلت، درصد ماده آلی، چگالی ظاهری، و متغیر کیفی خاک روئین یا زیرین. روابط خطی، معکوس و توانی این ویژگی‌های پایه و اثرات متقابل احتمالی در برازش‌های رگرسیونی بررسی شد. در جدول ۱-۸، PTFs پیوسته بدست آمده ارائه شده‌اند. در واقع پس از برآورد پارامترهای تبدیل شده به کمک این PTFs، آنها به پارامترهای اصلی مدل‌ها تبدیل می‌شوند. ضرایب تبیین PTFs نشان می‌دهد که برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی به کمک

⁸ Soil Geographical Data Base of Europe

PTFs پیوسته دقت خیلی زیادی ندارد. آنها پیشنهاد کردند که بخش‌بندی این مجموعه داده به زیرمجموعه‌های با کلاس بافت خاک یکسان می‌تواند دقت این مدل‌ها را افزایش دهد. همچنین وارد نمودن ویژگی‌های دیگر به عنوان ورودی یا کاربرد ANNs به جای روش‌های رگرسیونی رایج می‌تواند در این زمینه مفید باشند.

جدول ۸-۱: توابع انتقالی خاک پیوسته برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های اروپا (برگرفته از وستن و همکاران، ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹)[†]

$\theta_s = 0.7919 + 0.001691C - 0.29619D - 0.000001491S^2 + 0.0000821OM^2$ $+ 0.02427C^{-1} + 0.01113S^{-1} + 0.01472\ln(S) - 0.0000733OM.C$ $- 0.000619D.C - 0.001183D.OM - 0.0001664\text{topsoil}.S$	R ² =76%
$\alpha^* = -14.96 + 0.03135C + 0.0351S + 0.646OM + 15.29D - 0.192\text{topsoil}$ $- 4.671D^2 - 0.000781C^2 - 0.00687OM^2 + 0.0449OM^{-1} + 0.0663\ln(S)$ $+ 0.1482\ln(OM) - 0.04546D.S - 0.4852D.OM + 0.00673\text{topsoil}.C$	R ² =20%
$n^* = -25.23 - 0.02195C + 0.0074S - 0.1940OM + 45.5D - 7.24D^2$ $+ 0.0003658C^2 + 0.002885OM^2 - 12.81D^{-1} - 0.1524S^{-1}$ $- 0.01958OM^{-1} - 0.2876\ln(S) - 0.0709\ln(OM) - 44.6\ln(D)$ $- 0.02264D.C + 0.0896D.OM + 0.00718\text{topsoil}.C$	R ² =54%
$l^* = 0.0202 + 0.0006193C^2 - 0.001136OM^2 - 0.2316\ln(OM) - 0.03544D.C$ $+ 0.00283D.S + 0.0488D.OM$	R ² =12%
$K_s^* = 7.755 + 0.0352S + 0.93\text{topsoil} - 0.967D^2 - 0.000484C^2 - 0.000322S^2$ $+ 0.001S^{-1} - 0.0748OM^{-1} - 0.643\ln(S) - 0.01398D.C - 0.1673D.OM$ $+ 0.02986\text{topsoil}.C - 0.03305\text{topsoil}.S$	R ² =19%

[†] در این روابط، θ_s ، K_s^* ، α^* ، n^* و l^* پارامترهای تبدیل شده مدل‌های ونگنختن و معلم هستند، θ_s بر حسب $m^3 m^{-3}$ ، K_s بر حسب $cm day^{-1}$ ، α بر حسب cm^{-1} ، و n و l بی‌بعدند؛ C بیانگر درصد رس (ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون)؛ S نشان‌دهنده درصد سیلت (ذرات بین ۲ تا ۵۰ میکرون)؛ OM درصد ماده آلی؛ D چگالی ظاهری بر حسب $Mg m^{-3}$ ؛ M_{50} اندازه میانه ذرات شن؛ بوده و خاک روئین (topsoil) و زیرین (subsoil) متغیرهای کیفی بودند که به ترتیب با مقادیر ۱ و ۰ بیان شدند.