فروســـایی خاک؛ یک چالش جهانی

جلد اول: تراکم و شرایط ماندابی

نویسنده: فواد تاجیک

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

فروســـایی خاک؛ یک چالش جهانی

جلد اول: تراکم و شرایط ماندابی

بهار ۱۳۹۵

فروسایی خاک؛ یک چالش جهانی

جلد اول: تراکم و شرایط ماندابی

فروسایی خاک؛ یک چالش جهانی

جلد اول: تراکم و شرایط ماندابی

نویسنده: فواد تاجیک

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

سال انتشار : ۱۳۹۵

شماره ثبت: ۶۱-۹۴ک

صفحه‌آرا و طراح جلد: سمیه وطن‌دوست

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰ – ۰۲۶

سامانه الکترونیک: www.aeri.ir

پست الکترونیک: info@aeri.ir

سپاسگزاری

تدوین این کتاب، بدون یاری استادان گرامی: آقایان دکتر حمید سیادت، ابراهیم پذیرا، مجتبی اکرم، حسن رحیمی و محمدعلی حاج‌عباسی امکان‌پذیر نمی‌شد. قدردانی از همه این عزیزان و آرزوی شادکامی و تندرستی برای آنان، کمترین سپاس نویسنده است.

فهرست **شماره صفحه**

		پیشگفتار	
۱		**فصل اول – فروسایی خاک: یک تهدید جهانی**	
	۱ – ۱	مقدمه	۱
	۱ – ۲	گستره جغرافیایی فروسایی خاک	۲
	۱ – ۳	فرایندها، عوامل و علل فروسایی خاک	۷
	۱ – ۴	اثرات فروسایی خاک	۹
	۱ – ۵	درباره این کتاب	۱۰
	۱ – ۶	مراجع	۱۱
۲		**فصل دوم – تراکم خاک در کشاورزی**	
	۲ – ۱	مقدمه	۱۳
	۲ – ۱	پیشینه	۱۳
	۲ – ۱ – ۲	اثرات اقتصادی	۱۴
	۲ – ۱ – ۳	اهداف	۱۵
	۲ – ۲	سیستم ماشین – خاک – گیاه	۱۵
	۲ – ۲ – ۱	تبیین مفاهیم	۱۵
	۲ – ۲ – ۲	فرایند تراکم خاک	۱۷
	۲ – ۲ – ۳	واکنش گیاهان به تراکم	۱۸
	۲ – ۲ – ۴	واکنش گیاه به خاک‌ورزی	۲۸
	۲ – ۲ – ۵	واکنش خاک به تردد ماشین‌های کشاورزی	۳۰
	۲ – ۲ – ۶	مدل‌سازی تراکم	۳۱
	۲ – ۲ – ۷	خلاصه	۴۱
	۲ – ۳	به‌کارگیری یک چارچوب تصمیم‌گیری	۴۱
	۲ – ۳ – ۱	نکته‌های بنیادین	۴۱
	۲ – ۳ – ۲	اجرا	۴۴
	۲ – ۳ – ۳	نکته‌های اقتصادی	۴۸
	۲ – ۴	خلاصه و نتیجه‌گیری	۵۳
	۲ – ۵	مراجع	۵۴
۳		**فصل سوم – زهکشی، شرایط ماندابی و بی‌هوازیستی در خاک**	
	۳ – ۱	مقدمه	۶۱

فهرست		شماره صفحه
۳ – ۲	علت‌های ایجاد شرایط ماندابی	۶۲
۳ – ۲ – ۱	شرایط ماندابی کوتاه‌مدت در اثر بارندگی زیاد یا سیل	۶۲
۳ – ۲ – ۲	بالا آمدن سطح ایستابی در اثر آبیاری یا نشت از کانال	۶۳
۳ – ۲ – ۳	سطح ایستابی کم‌عمق آویزان ناشی از تراکم	۶۳
۳ – ۲ – ۴	بالا آمدن سطح ایستابی در اثر مدیریت‌های متفاوت خاک سطحی	۶۴
۳ – ۲ – ۵	کند شدن زهکشی سطحی به علت احداث سازه‌ها	۶۵
۳ – ۳	اثرات ماندابی شدن خاک	۶۵
۳ – ۳ – ۱	اثرات فیزیکی	۶۶
۳ – ۳ – ۲	اثرات شیمیایی و زیستی	۶۹
۳ – ۴	اصلاح خاک‌های ماندابی	۷۱
۳ – ۵	نتیجه‌گیری	۷۲
۳ – ۶	نگاهی نو به زهکشی	۷۲
۳ – ۶ – ۱	نگرش جامع به زهکشی	۷۴
۳ – ۶ – ۱ – ۱	بازنگری یک تجربه	۷۵
۳ – ۶ – ۱ – ۲	نگرش جامع و توسعه پایدار	۷۶
۳ – ۶ – ۱ – ۳	آموزه‌ها و گام‌های پیش‌رو	۷۷
۳ – ۶ – ۱ – ۴	نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۷۸
۳ – ۶ – ۲	زهکشی و تغییرات اقلیمی	۷۹
۳ – ۶ – ۲ – ۱	گذشته، حال و آینده: افق ۲۰۲۵	۸۰
۳ – ۶ – ۲ – ۲	تغییرات اقلیمی‌در مناطق مختلف جهان	۸۱
۳ – ۶ – ۲ – ۳	نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۸۳
۳ – ۶ – ۳	زهکشی کنترل شده	۸۵
۳ – ۶ – ۳ – ۱	مقدمه	۸۵
۳ – ۶ – ۳ – ۲	اهداف و ضرورت‌ها	۸۷
۳ – ۶ – ۳ – ۳	اهمیت و سودمندی	۸۷
۳ – ۶ – ۳ – ۴	پیشینه	۹۰
۳ – ۶ – ۳ – ۵	امکان پذیری	۹۴
۳ – ۶ – ۳ – ۶	طراحی و اجرا	۹۵
۳ – ۶ – ۳ – ۷	مدیریت و پایش	۹۷
۳ – ۷	مراجع	۱۰۱

فهرست		شماره صفحه
۴	**فصل چهارم – ضـرورت اقـدام: اولویـت‌هـای تحقیق و توسعه**	
۴ – ۱	شناسایی و ارزیابی منابع	۱۰۶
۴ – ۲	تفکیک گمان‌ها از حقایق	۱۰۷
۴ – ۳	بازیابی حاصلخیزی اراضی تخریب شده	۱۰۸
۴ – ۴	راه‌های همیاری	۱۰۹
۴ – ۵	نتیجه‌گیری	۱۱۱
۴ – ۶	مراجع	۱۱۱
	واژه نامه	۱۱۲

فهرست شکل‌ها

فهرست		شماره صفحه
۱	نمایش مفهومی سیستم ماشین – خاک – گیاه	۱۶
۲	توزیع مقدار ریشه به ازای واحد وزن خاک	۱۹
۳	نمودار عمق نفوذ و مقدار ریشه در برابر تعداد عبور چرخ	۲۰
۴	نمودار شاخص آلودگی به *Root rot*	۲۱
۵	برآورد مقدار محصول خشک در مقابل *DBD* برای سطوح مختلف آلودگی	۲۲
۶	نمایش روابط تراکم – محصول – آب و هوا	۲۳
۷	شبیه سازی شرایط تراکم – آب و هوا بر روی مقدار محصول دانه جو	۲۴
۸	مقدار محصول ذرت در مقابل مقدار تجمعی فشار سطح تماس	۲۵
۹	مثلث بافت خاک همراه با منحنی‌های هم جرم مخصوص	۲۷
۱۰	مقدار محصول ذرت در مقابل جرم مخصوص ظاهری خشک	۲۹
۱۱	جرم مخصوص ظاهری خشک در یک خاک لوم شنی باغی	۳۱
۱۲	منحنی پراکتور به دست آمده از خاک‌های لوم رسی و رسی	۳۲
۱۳	اثر مواد آلی بر ویژگی‌های تراکمی سه خاک با بافت متفاوت	۳۵
۱۴	تراکم اضافی ناشی از برش ایجاد شده توسط لغزش چرخ در سه بافت خاک	۳۶
۱۵	چارچوب راهبرد مدیریت برای پایداری ساختمان خاک	۴۳
۱۶	مقدار تراکم بحرانی با استفاده از منحنی‌های بهینه	۴۶
۱۷	نیمرخ میانگین جرم مخصوص ظاهری خشک در خاک لوم شنی و رسی	۴۷
۱۸	هزینه تولید نخود در ایالت کبک به صورت تابعی از وزن و تعداد عبور تراکتور	۴۹
۱۹	هزینه تولید ذرت به صورت تابعی از وزن و تعداد عبور تراکتور	۵۰
۲۰	هزینه‌های اقتصادی کل برای تولید ذرت بعنوان تابعی از تعداد عبور	۵۱
۲۱	تردد کنترل شده با استفاده از دو موتور بخار در مسیر مشخص	۵۲
۲۲	ماشین عریض مورد استفاده در تحقیقات مربوط به تردد کنترل شده	۵۲
۲۳	مقایسه جریان آب در سیستم‌های زهکشی زیرزمینی	۸۶
۲۴	نمایی از زهکشی آزاد، زهکشی کنترل شده و آبیاری زیرزمینی	۹۱
۲۵	روش کنترل سطح ایستابی و نمونه‌ای از دستگاه پیش ساخته آن	۹۹
۲۶	وابستگی‌های متقابل فروسایی خاک به عوامل زیستی و اجتماعی – اقتصادی	۱۱۰

فهرست جدول‌ها

فهرست		شماره صفحه
۱	میزان فروسایی خاک در اثر فعالیت‌های انسان در جهان	۳
۲	وسعت و شدت انواع فروسایی خاک در جهان به تفکیک قاره‌ها	۳
۳	شدت فروسایی خاک در جهان به تفکیک عوامل	۵
۴	شدت فروسایی خاک در آسیا به تفکیک عوامل	۶
۵	انواع، فرایندها، مفهوم و علل فروسایی خاک	۸
۶	وسعت و شدت تراکم خاک در جهان	۱۵
۷	مقادیر کلی جرم مخصوص ظاهری در رابطه با رشد گیاه	۲۷
۸	وسعت و شدت شرایط ماندابی در خاک‌های جهان	۶۲
۹	مقایسه ویژگی‌های فیزیکی خاک در شرایط مختلف زهکشی	۶۷
۱۰	اثرات زهکشی بر دمای خاک	۶۹

پیشگفتار

خاک زنده که همچون پوست تن برای پیکر زمین است، در معرض فروسایی فزاینده قرار گرفته است. چه کسی می‌داند که با تخریب این پوسته، بر سر پیکر بی دفاع زمین چه خواهد آمد؟

اهمیت و اولویت توجه به فروسایی شتابنده خاک همتراز با ضرورت توجه به معضلاتی مانند گرم شدن کره زمین و نابودی تنوع زیستی است، اما متاسفانه آگاهی و هشیاری کافی در مورد این پدیده وجود ندارد. فروسایی خاک با محورهای توسعه پایدار (نظیر فقر، رشد جمعیت، امنیت غذایی و تخریب منابع) پیوندهایی تنگاتنگ دارد اما متناسب با اهمیت آنها پیگیری نشده است. شاید آموخته‌ایم تا نسبت به بحران‌های جاری و فوری واکنش نشان دهیم (هرچند که اغلب دیرهنگام و کم اثر است) اما باید توجه داشت که اثرات دراز مدت فروسایی خاک اغلب شدیدتر و بیشتر از هزینه‌ها و آثار مستقیم آن و از دست رفتن درآمد مورد انتظار فعلی است. فروسایی خاک مانند یک بمب ساعتی عمل می‌کند. هنگامی که شرایط خاک به حد بحرانی می‌رسد، اصلاح آن به آسانی امکان‌پذیر نخواهد بود.

به گزارش برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (*UNEP, 2001*) تقریبا دو میلیارد هکتار از اراضی جهان (معادل مساحت آمریکا و کانادا) به نحوی در معرض فروسایی خاک ناشی از فعالیت‌های انسان قرار دارد که زندگی نزدیک به یک میلیارد نفر را در خطر قرار داده است. افزون بر این، در هر سال ۲۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی غیر قابل بهره برداری شده یا فدای توسعه فضای شهری می‌گردد. در جنوب آسیا، هزینه سالانه فروسایی خاک در حدود ۱۰ میلیارد دلار برآورده شده که معادل ۷ درصد تولید ناخالص داخلی (*GDP*) این کشورها است. در آفریقا، مقدار متوسط کاهش تولید کشاورزی در اثر فروسایی خاک در حدود ۸ درصد است که تا سال ۲۰۲۰ ممکن است به ۱۶ درصد برسد. به گزارش بانک جهانی (ایسنا- اردیبهشت ۱۳۸۵) خسارت سالیانه تخریب اراضی در ایران معادل ۱/۷ درصد *GDP* آن (۱/۸۴ میلیارد دلار) است که به‌اندازه کافی هشدار دهنده است لیکن ما همچنان نظاره‌گر مانده‌ایم: "چند تن خواب آلود، چند تن ناهشیار، ...".

این کتاب تلاشی است برای ایجاد هشیاری و آغاز عمل برای مقابله با چالشی که حیات انسانی به آن وابسته است و در صورت تاخیر در اقدام شاید هیچگاه جبران پذیر نباشد. بنای اولیه این کتاب، نشریه‌ای بوده است تحت عنوان فروسایی خاک "*Soil Degradation*" از مجموعه *Advances in Soil Science* که در سال ۱۹۹۰ منتشر شده است. طی چند سال پس از تهیه برگردان اولیه، مطالب آن ویرایش و اصلاح شده و نهایتا با افزودن مطالب جدیدتر، در چند مرحله بازنویسی و

تدوین شده است. کتاب شامل حداقل سه جلد خواهد بود که اکنون جلد اول آن شامل تراکم خاک و خاک‌های ماندابی تقدیم می‌گردد. موضوعات این کتاب ممکن است نمونه‌های مشابهی در دنیای نشر داشته باشند اما آنچه بر ارزش کتاب می‌افزاید نگرش سیستمی حاکم بر محتوا و تاکید بر نگاه جامع به معضل فروسایی خاک است. مجلدات بعدی شامل جنبه‌های مختلف فروسایی شیمیایی (مانند شرایط شور و سدیمی)، فرسایش آبی و بادی، آلودگی خاک و فروسایی زیستی خواهد گردید.

نویسنده امیدوار است که این کتاب مخاطبان خود را یافته و هدف از نگارش آن، در آینده نزدیک حاصل گردد. دریافت دیدگاه کارشناسان و صاحب‌نظران در مورد محتوای جلد اول کتاب و پیشنهادات در مورد جلدهای بعدی آن، آرزوی مشتاقانه نویسنده است.

فصل اول

فروسایی خاک: یک تهدید جهانی

۱-۱- مقدمه

فروسایی یا تخریب خاک[1] یکی از بزرگترین چالش‌های رویاروی بشر کنونی است. گر چه قدمت این مسئله به‌اندازه آغاز کشاورزی است، اما گسترش و تاثیر آن بر رفاه انسانی و محیط زیست جهانی در حال حاضر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. فروسایی خاک دست کم به دو علت موجب نگرانی عمده‌ای گشته است. اول آنکه فروسایی خاک ظرفیت تولید زیست بوم را تحلیل می‌برد، دوم آنکه به واسطه تغییر موازنه آب و انرژی و اختلال در چرخه کربن، نیتروژن، گوگرد و عناصر دیگر، بر اقلیم جهانی اثر می‌گذارد. فروسایی خاک با اثرگذاری بر تولید کشاورزی و محیط زیست منجر به ناپایداری سیاسی و اجتماعی، افزایش شدت جنگل‌زدایی، استفاده فشرده از اراضی حساس و حاشیه‌ای، افزایش رواناب و فرسایش تشدیدی خاک، آلودگی منابع آب طبیعی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر می‌گردد. در حقیقت، فروسایی خاک بر ساختار وجودی نوع بشر اثر می‌گذارد.

فروسایی خاک به صورت «زوال کیفیت خاک به سبب کاربرد نادرست آن به وسیله انسان» تعریف شده است. فروسایی یا تخریب به معنای تغییر زیان آور صفاتی است که منجر به کاهش ظرفیت عمل پدیده می‌گردد. لذا تخریب خاک به صورت تغییرات زیان آور ویژگی‌ها و فرایندهای خاک در طول زمان تعریف شده است (لعل و استوارت، ۱۹۹۰). این تغییرات زیان آور ممکن است با ایجاد آشفتگی در تعادل پویای خاک با محیط پیرامون آن توسط عوامل طبیعی یا انسانی آغاز گردد. آشفتگی‌های طبیعی (مانند تغییرات پوشش گیاهی، یخبندان، تغییرات اقلیمی) معمولاً کند هستند (به جز پدیده‌هایی مانند

1- Soil degradation

فعالیت‌های تکتونیک و آتشفشانی) و خاک معمولاً می‌تواند آنها را تعدیل کند یا با شرایط جدید سازگار شود. اما اثر فعالیت‌های انسان معمولاً سریع بوده و تعادل ظریف میان خاک و محیط اطراف آن را بر هم می‌زند و منجر به تغییرات شدید در ویژگی‌ها و فرایندهای خاک می‌گردد.

۱-۲- گستره جغرافیایی فروسایی خاک

هزاران سال است که فروسایی خاک بشر را دچار مشکل کرده است. بسیاری از تمدن‌های باستانی در اراضی حاصلخیز رشد و گسترش یافته‌اند؛ اما با کاهش حاصلخیزی خاک، فرهنگ‌ها و تمدن‌های وابسته به آن نیز رو به زوال نهادند. شواهد باستان شناختی نشان داده‌اند که فروسایی خاک باعث نابودی تمدن‌هاراپان در غرب هند، بین النهرین در غرب آسیا و فرهنگ مایایی در آمریکای مرکزی شده است. طی هزاره‌های گذشته حدود دو میلیارد هکتار از اراضی حاصلخیز جهان در اثر فرایندهای فروسایی خاک از حیّز انتفاع خارج شده‌اند (برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد، ۱۹۸۶). افزون بر این، سرعت فعلی فروسایی خاک در حدود ۵ تا ۷ میلیون هکتار در سال تخمین زده شده که ممکن است تا پایان قرن بیستم به حدود ۱۰ میلیون هکتار در سال برسد (فائو، ۱۹۸۳).

مروری بر اثرات فروسایی خاک نشان می‌دهد که در نیمه دوم قرن بیستم، ۱/۹ میلیارد هکتار (حدود ۱۵ درصد) از اراضی قابل کشت جهان به واسطه فعالیت انسان در معرض فروسایی متوسط تا شدید قرار گرفته است (لی و همکاران، ۱۹۹۸). در آفریقا، ۳۲۱ میلیون هکتار (۱۴/۴ درصد) از کل اراضی قابل کشت در معرض فروسایی متوسط تا شدید قرار داشته و ۱۷۴ میلیون هکتار باقی مانده در معرض فروسایی خفیف قرار دارند (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱). طی دهه ۱۹۳۰، مقدار فروسایی خاک در آمریکا ۳۰ میلیون هکتار برآورد گردیده است. همچنین، ۳۰ میلیون هکتار از اراضی آسیب دیده از فرسایش آبی شناسایی شد که در حال حاضر با استفاده از فناوری‌های جدید احیا شده‌اند (جدول‌های ۱ و ۲).

جدول ۱- میزان فروسایی خاک در اثر فعالیت‌های انسان در سطح جهان (۷۲ درجه شمالی تا ۵۷ درجه جنوبی) (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

نام قاره	تخریب خاک در اثر فعالیت‌های انسان (میلیون هکتار)	درصد از کل اراضی
آفریقا	۴۹۴	۱۶/۷
آسیا	۷۴۸	۱۷/۶
آمریکای جنوبی	۲۴۳	۱۳/۷
آمریکای مرکزی	۶۳	۲۰/۶
آمریکای شمالی	۹۵	۵/۰
اروپا	۲۱۹	۳۳/۷
استرالیا	۱۰۳	۱۱/۷
جهان	۱۹۶۴	۱۵/۱

جدول ۲- وسعت و شدت انواع فروسایی خاک در جهان (میلیون هکتار) به تفکیک قاره‌ها (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

فروسایی خاک	خفیف	متوسط	شدید	بسیار شدید	درصد از کل اراضی تخریب شده جهان	کل	درصد قاره ای تخریب شده	درصد از کل اراضی جهان قاره	
فرسایش آبی	۱۲۴/۵	۲۴۱/۷	۷۳/۴	–	۲۲/۴	۴۴۰/۶	۱۰/۴	۳/۴	آسیا
	۵۷/۵	۶۷/۴	۹۸/۳	۴/۲	۱۱/۶	۲۲۷/۴	۷/۷	۱/۷	آفریقا
	۶۰/۲	۱۳۳/۵	۳۵/۵	–	۱۱/۷	۲۲۹/۳	۵/۸	۱/۸	آمریکا
	۲۱/۴	۸۱/۰	۹/۸	۲/۴	۵/۸	۱۱۴/۵	۱۲/۱	۰/۸۸	اروپا
	۷۹/۴	۳/۲	۰/۲	–	۴/۲	۸۲/۸	۹/۴	۰/۶۴	استرالیا
فرسایش بادی	۱۳۲/۴	۷۵/۱	۱۴/۵	۰/۲	۱۱/۳	۲۲۲/۲	۵/۲	۱/۷	آسیا
	۸۸/۳	۸۹/۳	۷/۹	۱/۰	۴/۴	۱۸۶/۵	۶/۳	۱/۴	آفریقا
	۲۸/۴	۵۰/۹	۰/۵	–	۴/۱	۷۹/۸	۲/۰	۰/۶۱	آمریکا
	۳/۲	۳۸/۲	–	۰/۷	۲/۲	۴۲/۲	۴/۴	۰/۳۲	اروپا
	۱۶/۳	–	۰/۱	–	۰/۸۴	۱۶/۴	۱/۹	۰/۱۳	استرالیا

ادامه جدول ۲- وسعت و شدت انواع فروسایی خاک در جهان (میلیون هکتـار) بـه تفکیـک قـاره‌هـا (اولـدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

فروسایی خاک	خفیف	متوسط	شدید	بسیار شدید	درصد از کل اراضی تخریب شده جهان	کل	درصد قاره ای تخریب شده	درصد از کل اراضی جهان قاره	
فروسایی شیمیایی	۳۱/۸	۲۱/۵	۱۹/۵	۰/۴	۳/۷	۷۳/۲	۱/۷	۰/۵۶	آسیا
	۲۶/۰	۲۷/۰	۸/۶	–	۳/۱	۶۱/۵	۲/ ۱	۰/۴۷	آفریقا
	۲۶/۸	۳۷/۱	۱۳/۴	–	۳/۹	۷۷/۳	۱/۹	۰/۵۹	آمریکا
	۸/۱	۱۷/۱	۰/۶	–	۱/۳	۲۵/۸	۲/۷	۰/۲۰	اروپا
	۰/۲	۰/۷	–	۰/۴	۰/۰۷	۱/۳	۰/۱۵	۰/۰۰۹	استرالیا
فروسایی فیزیکی	۵/۷	۶/۰	۰/۴	–	۰/۶۲	۱۲/۱	۰/۲۸	۰/۰۹	آسیا
	۱/۸	۸/۱	۸/۸	–	۰/۹۵	۱۸/۷	۰/۶۳	۰/۱۴	آفریقا
	۸/۱	۴/۶	۱/۱	–	۰/۷۰	۱۳/۸	۰/۳۵	۰/۱۱	آمریکا
	۲۷/۹	۸/۱	۰/۴	–	۱/۸	۳۶/۴	۳/۸	۰/۲۸	اروپا
	۰/۷	–	۱/۶	–	۰/۱۲	۲/۳	۰/۲۶	۰/۰۲	استرالیا

با توجه به این آمار، اقدام فوری جامعه جهانی برای مقابله با فروسایی خاک ضرورت مـی‌یابـد. برنامه‌ریزان باید با ارائه سیاست‌های مناسب برای بازسازی زیست بوم دستکاری شده بکوشند و اطمینـان یابند که روش‌های حفاظتی موثر برای نگهداشت و افزایش حاصلخیزی اراضی موجود فراهم گشته است.

آمارهای متفاوتی در مورد گسترش و شدت فروسایی خاک وجود دارد. برخـی آمارهـا حـاکی از آن است که جهان به راستی در حال از دست دادن خاک‌های با کیفیت می‌باشد. اگـر چنـین اسـت، چـرا برخی برنامه‌ریزان، فوریتی برای اقدام قایل نیستند. پاسخ به ایـن سـئوال مسـتلزم تفکیـک گمـان‌هـا از حقایق، دستیابی به آمارهای معتبر در مورد گسترش و شدت تخریب خاک و فرایندهای گوناگون و روابط علت و معلولی آن، و شناسایی اثر اصلاحی کاربری اراضی و راهبردهای مختلف مدیریت خاک- پوشـش گیاهی- آب می‌باشد.

در حال حاضر اطلاعات ذهنی و کیفی جمع‌آوری شده با روش‌های غیـر اسـتاندارد بایسـتی بـا اطلاعات عینی و کمی‌به دست آمده از روش‌های استاندارد جایگزین شده و باانـدازه‌گیـری‌هـای میـدانی اصلاح گردد. نمونه قابل ذکر، روش *GLASOD*[1] است که توسط *ISRIC* [1] و با همکاری فـائو در آغـاز

1- Global Assessment of Soil Degradation

دهه نود برای ارزیابی و برآورد تخریب خاک در سطح جهان ارائه و نتایج آن بر مبنای نظرات کارشناسی ۲۵۰ نفر از صاحب نظران برای ۲۱ منطقه جهان در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰۰ ارائه گردید (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱). جدول‌های ۳ و ۴ نمونه‌ای از داده‌های این روش می‌باشد.

جدول ۳- شدت فروسایی خاک در اثر فعالیت‌های انسان (میلیون هکتار) در جهان به تفکیک عوامل (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

فروسایی خاک		خفیف	متوسط	شدید	بسیار شدید	کل
فرسایش آبی	تلفات خاک سطحی	۳۰۱/۲	۴۵۴/۵	۱۶۱/۲	۳/۸	۹۲۰/۳
	تغییر شکل اراضی	۴۲/۰	۷۲/۲	۵۶/۰	۲/۸	۱۷۳/۳
	کل	۳۴۳/۲	۵۲۶/۷	۲۱۷/۲	۶/۶	۱۰۹۳/۷ (٪ ۵۵/۶)
فرسایش بادی	تلفات خاک سطحی	۲۳۰/۵	۲۱۳/۵	۹/۴	۰/۹	۴۵۴/۲
	تغییر شکل اراضی	۳۸/۱	۳۰/۰	۱۴/۴	–	۸۲/۵
	کندن خاک	–	۱۰/۱	۰/۵	۱/۰	۱۱/۶
	کل	۲۶۸/۶	۲۵۳/۶	۲۴/۳	۱/۹	۵۴۸/۳ (٪ ۲۷/۹)
فروسایی شیمیایی	تلفات عناصر غذایی و یا مواد آلی	۵۲/۴	۶۳/۱	۱۹/۸	–	۱۳۵/۳
	شور شدن	۳۴/۸	۲۰/۴	۲۰/۳	۰/۸	۷۶/۳
	آلودگی	۴/ ۱	۱۷/۱	۰/۵	–	۲۱/۸
	اسیدی شدن	۱/۷	۲/۷	۱/۳	–	۵/۷
	کل	۹۳/۰	۱۰۳/۳	۴۱/۹	۰/۸	۲۳۹/۱ (٪ ۱۲/۲)
فروسایی فیزیکی(بدون فرسایش)	تراکم	۳۴/۸	۲۲/۱	۱۱/۳	–	۶۸/۲
	شرایط ماندابی	۶/۰	۳/۷	۰/۸	–	۱۰/۵
	نشست خاک‌های آلی	۳/۴	۱/۰	۰/۲	–	۴/۶
	کل	۴۴/۲	۲۶/۸	۱۲/۳	–	۸۳/۳ (٪ ۴/۲)
کل		۷۴۹/۰ (٪ ۳۸/۱)	۹۱۰/۵ (٪ ۴۶/۴)	۲۹۵/۷ (٪ ۱۵/۱)	۹/۳ (٪ ۰/۵)	۱۹۶۴/۴ (٪ ۱۰۰)

2- International Soil Reference and Information Center

جدول ٤- شدت فروسایی خاک در اثر فعالیت‌های انسان (میلیون هکتار) در آسیا به تفکیک عوامل (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

	فروسایی خاک	خفیف	متوسط	شدید	بسیار شدید	کل
فرسایش آبی	تلفات خاک سطحی (فرسایش ورقه‌ای)	۹۹/۸	۲۱۵/۰	۵۰/۵	–	۳۶۵/۲
	تغییر شکل‌اراضی (فرسایش شیاری و آبکندی)	۲۴/۷	۲۶/۷	۲۲/۹	–	۷۴/۴
	کل	۱۲۴/۵	۲۴۱/۷	۷۳/۴	–	۴۴۰/۶ (٪ ۵۹)
فرسایش بادی	تلفات خاک سطحی (عمدتاً در مناطق خشک و نیمه خشک)	۱۱۶/۷	۴۸/۹	–	۰/۲	۱۶۵/۸
	تغییر شکل اراضی (تپه‌های شنی)	۱۵/۷	۱۷/۳	۱۴/۵	–	۴۷/۵
	کندن خاک از جایی و انباشتن آن در جای دیگر	–	۸/۹	–	–	۸/۹
	کل	۱۳۲/۴	۷۵/۱	۱۴/۵	۰/۲	۲۲۲/۲ (٪ ۳۰)
فروسایی شیمیایی	تلفات عناصر غذایی و یا مواد آلی	۴/۶	۹/۰	۱/۰	–	۱۴/۶
	شور شدن	۲۶/۸	۸/۵	۱۷/۰	۰/۴	۵۲/۷
	آلودگی	–	۱/۵	۰/۳	–	۱/۸
	اسیدی شدن	۰/۴	۲/۵	۱/۲	–	۴ /۱
	کل	۳۱/۸	۲۱/۵	۱۹/۵	۰/۴	۷۳/۲ (٪ ۱۰)
فروسایی فیزیکی (بدون فرسایش)	تراکم	۴/۶	۵/۰	۰/۲	–	۹/۸
	شرایط ماندابی	۰/۴	–	–	–	۰/۴
	نشست خاک‌های آلی	۰/۷	۱/۰	۰/۲	–	۱/۹
	کل	۵/۷	۶/۰	۰/۴	–	۱۲/۱ (٪ ۲)
	کل	۲۹۴/۵ (٪ ۳۹)	۳۴۴/۳ (٪ ۴۶)	۱۰۷/۷ (٪ ۱۴)	۰/۵ (٪ ۱)	۷۴۷/۰ (٪ ۱۰۰)

این روش، همچنان روشی کیفی و کوچک مقیاس است و با میزان بهره‌وری کاربری‌های مختلف اراضی یا گزینه‌های مدیریت خاک نیز مرتبط نشده است. ایراد ذاتی این روش تنها با پایه‌گذاری روشی بر مبنای مطالعه واحد پدون[1] و یا نمای خاک[2] و سپس بزرگ کردن مقیاس مطالعه با استفاده از

1- Pedon
2- Soil scape

GIS[1] قابل رفع می‌باشد (لعل و همکاران، ۲۰۰۴). یکی دیگر از مشکلات این آمار، ابهام در مفهوم فروسایی خاک است. چنین ابهامی در صورت ارائه تعریف دقیقی از مقادیر بحرانی ویژگی‌های اصلی خاک که فراتر از آنها رشد محصولات زراعی امکان پذیر نیست، قابل رفع می‌باشد. این مقادیر بحرانی بسته به نوع خاک، نوع استفاده از اراضی، سیستم‌های زراعی، شرایط اقلیمی و محیط‌های آگرواکولوژیک، تغییر می‌کند. برای مثال، دقیقاً مشخص نیست که حد بحرانی مقدار موادآلی هوموسی شده که در مقادیر کمتر از آن، ساختمان خاک فرو می پاشد در گروه‌های بزرگ خاک‌های جهان چقدر است.

۱-۳- فرایندها، عوامل و علل فروسایی خاک

فروسایی خاک نتیجه‌ای از فعالیت‌های تهی ساز و زیان‌بار انسان‌ها و اثر متقابل آن با محیط طبیعی است. فرایندهای فروسایی خاک، ساز و کارهای مسئول تنزل کیفیت خاک می باشند. به عبارت دیگر، تخریب خاک عبارت است از افت کیفیت خاک که منجر به کاهش بارآوری توده زنده و کاهش ظرفیت سازگاری و اعتدال محیط پیرامونی آن (آب و هوا) می‌گردد. سه نوع اصلی از فروسایی خاک وجود دارد که عبارتند از: فروسایی فیزیکی، فروسایی شیمیایی و فروسایی زیستی. انواع، فرایندها، مفهوم و علل فروسایی خاک در جدول ۵ ارائه شده است.

از جمله علل فروسایی خاک، آشفتگی‌های ناشی از دخالت انسان می‌باشد که به فشارهای اقتصادی – اجتماعی و رشد جمعیت ارتباط دارد و آغازگر برخی فرایندهای فروسایی می‌گردد. برخی عوامل مهم تخریب خاک عبارتند از: جنگل‌زدایی، کشت در اراضی حاشیه‌ای، زراعت فشرده، استفاده مفرط و نسنجیده از مواد شیمیایی، چرای مفرط یا پرورش دام بیش از ظرفیت مرتع، مهاجرت جمعیت، و ساخت و ساز در مناطق با زیست بوم حساس. این علت‌ها و عوامل، به ویژه در برخی کشورهای آسیا، آفریقا و مناطق حاره آمریکا شایان توجه بیشتر است.

1- Geographic Information System

جدول ۵- انواع، فرایندها، مفهوم و علت‌های فروسایی خاک (لعل و همکاران، ۲۰۰٤)

نوع فروسایی	فرایند فروسایی	مفهوم	علت‌ها
فیزیکی	- فروریختن ساختمان خاک - فروپاشی خاکدانه‌ها - تشکیل سله و درزگیری خاک سطحی - فشرده شدن خاک سطحی و عمقی - سیل، شرایط ماندابی و بی هوازی - فرسایش آبی و بادی - بیابان زایی	- کاهش نسبی خاکدانه‌ها و کاهش مقاومت/پایداری آنها - پراکنش خاکدانه‌ها در اثر فرو بردن سریع در آب - تشکیل سله در سطح خاک دارای مقاومت زیاد و نفوذپذیری اندک آب و هوا - افزایش جرم مخصوص ظاهری که منجر به کاهش تخلخل کل و تخلخل درشت در خاک و همچنین کاهش ظرفیت نفوذ آب و افزایش مقدار و سرعت رواناب می‌گردد - کاهش تخلخل تهویه‌ای تا کمتر از ده درصد حجمی‌که منجر به کاهش اکسیژن در محیط ریشه گیاه می‌گردد. - جداسازی، خرد شدن، انتقال و پخش مجدد ذرات خاک که توسط نیروی آب (باران، جریان متمرکز، طوفان، یخچال)، باد یا جاذبه صورت می‌گیرد. - تخریب خاک (توسط فرسایش تشدیدی با آب، باد، یا سایر فرایندها) در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک که منجر به ایجاد و پیشروی شرایط شبه بیابانی می‌گردد.	جنگل زدایی؛ سوزاندن بقایای گیاهی؛ برهنه ماندن زمین؛ شخم در جهت شیب؛ تردد زیاد حیوان، انسان یا ادوات؛ چرای مفرط؛ نظام تک کشتی
شیمیایی	- شستشوی عناصر بازی و تهی شدن از عناصر غذایی - اسیدی شدن - ایجاد سمیت و عدم تعادل عناصر - شور شدن، سدیمی‌شدن - آلودگی	- حذف عناصر ضروری برای گیاه (ازت، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، روی) توسط گیاهان برداشت شده یا آبشویی شدید بدون جایگزینی مواد توسط افزودنی‌های آلی و معدنی - کاهش pH خاک در اثر شستشوی بازها یا افزودن کودهای اسیدزا - آزاد شدن بیش از حد برخی عناصر (مانند آلومینیم، منگنز و آهن) تا حدی که برای گیاه سمی‌باشد - وجود زیاده از حد نمک‌های محلول در ناحیه ریشه به گونه ای که هدایت الکتریکی اشباع (EC) به ۴ dS/m برسد. غالب شدن یون سدیم در ناحیه ریشه تا حدی که مقدار نسبت جذبی سدیم (SAR) به ۱۵ برسد و pH بزرگتر از ۸/۵ باشد. - وارد کردن آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی، معدنی و شهری به خاک	آبیاری بیش از نیاز با آب‌های با کیفیت نامناسب؛ فقدان زهکشی کافی؛ کاربرد کم یا زیاد کودهای معدنی؛ کاربرد اراضی برای دفن ضایعات صنعتی و شهری

جدول ۵- انواع، فرایندها، مفهوم و علت‌های فروسایی خاک (لعل و همکاران، ۲۰۰٤)

نوع فروسایی	فرایند فروسایی	مفهوم	علت‌ها
زیستی	- تهی سازی منبع کربن آلی خاک - زوال تنوع زیستی در خاک - افزایش عوامل بیماری‌زا	- کاهش کربن در توده زنده کل و توده میکروبی و ایجاد تغییر در سرعت بازیافت منبع کربن آلی خاک - کاهش فعالیت و تنوع گونه‌های زنده مفید (مانند کرم‌های خاکی) و تغییر در ترکیب جمعیتی گونه‌های زنده - افزایش نسبی جمعیت عوامل بیماری زای خاک زی	برداشت کامل یا سوزاندن بقایای گیاهی؛ کاربرداندک کودهای حیوانی و مالچ؛ نظام تک کشتی بدون در نظر گرفتن گیاهان پوششی در تناوب؛ خاک ورزی مفرط

۱-٤- اثرات فروسایی خاک

یکی از اثرهای اقتصادی آشکار فروسایی خاک مربوط به اثر آن بر بهره وری کشاورزی است. خاک، تامین کننده عناصر غذایی و آب برای گیاه است و تغییر عوامل موثر در ظرفیت و شدت فراهمی آب و عناصر غذایی، بر رشد گیاه تاثیر می‌گذارد. این در حالی است که تا کنون بر پی‌آمدهای زیست محیطی فروسایی خاک به‌اندازه کافی تاکید نشده است. اگر چه دانشمندان به خطر جهانی گرم شدن زمین که در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شود واقف گشته‌اند، اما تا کنون به انتشار دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه ای ناشی از فروسایی خاک کم توجهی شده است.

مواد آلی خاک یکی از بزرگترین مخازن فعال در چرخه جهانی کربن به شمار می روند، اما اطلاع‌اندکی درباره مقدار و چرخه آن در سیستم‌های گوناگون زراعی وجود دارد. یک نتیجه فوری جنگل‌زدایی، کشت فشرده و چرای مفرط – به ویژه در مناطق حاره – معدنی شدن سریع مواد آلی در خاک است. پی‌آمد این فرایند، تخریب ساختمان خاک و تشدید فرسایش است که منجر به خارج شدن کربن و عناصر غذایی از یک زیست بوم می‌شود. هنگامی که این عناصر غذایی به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و نهرها برسند، سبب آلودگی و افزایش عناصر غذایی همراه با کمبود اکسیژن[1] در تالاب‌ها می‌گردند. کربن موجود در رسوبات به آسانی به صورت CO_2 وارد اتمسفر می‌شود. همچنین، ارزیابی دقیق مقدار

1- Eutrophication

انتقال رسوب و اثر آن بـر محـیط زیسـت جهـانی یکـی از چـالش‌هـای بـزرگ بـرای خـاک شناسـان، هیدرولوژیست‌ها و جغرافی‌دانان باقی خواهد ماند.

ارائه سیاست ملی مقابله با فروسایی خاک ابتدا مستلزم تعیین دقیق اثر عوامل مختلف بر هزینه فروسایی خاک می‌باشد. پس از آن، سود حاصل از کاهش این هزینه‌ها را می‌تـوان بـه درسـتی محاسـبه نمود. تحلیل هزینه – فایده، شکل استاندارد تحلیل پروژه توسط سیاست‌گذاران می‌باشد.

کراسون (۱۹۸۵) هزینه فرسایش خاک در آمریکا را بین ۵۲۵ میلیون تـا یـک میلیـارد دلار در سال برآورد نموده‌است. هزینه‌های فرسایش در خارج از مزرعـه (رسـوب در کانـال‌هـا و سـدها، تغییـرات زیست محیطی دریاچه‌ها و مرداب‌ها) دو برابر این مقدار بوده است (لی و همکـاران، ۱۹۹۷). کلاکیکـو و همکاران (۱۹۸۹) اظهار داشته‌اند که در ۳۲ میلیون ایکر از اراضی کشاورزی آمریکا، هزینه فرسایش خاک بیش از ده دلار در هر ایکر در سال بوده است. در هشت کشور در حال توسعه، هزینه فروسـایی خـاک و سایر خسارات زیست محیطی تا ده درصد تولید ناخالص ملی *(GNP)* را تشکیل داده است که در مناطق حاره شدت خسارات بیشتر از نواحی معتدله بوده اسـت (بـاربیر و بیشـاپ، ۱۹۹۵). اریکسـون و همکـاران (۱۹۷۴) هزینه تراکم خاک در سوئد را ۱۲ میلیون دلار در سال برآورد کـرده‌انـد. ارزش مقـدار محصـول کاهش یافته در اثر تراکم خاک در منطقه کبک کانادا از ۳۰ میلیون دلار (فاکس و کات، ۱۹۸۵) تـا ۱۰۰ میلیون دلار (شورای علم کانادا، ۱۹۸۶) برآورد شده است. گیل (۱۹۷۱) هزینه تراکم خـاک در کشـاورزی جنوب آمریکا را یک میلیارد دلار برآورد کرده است. هاکانسـون و همکـاران (۱۹۸۸) هزینـه تـراکم را در شمال آمریکا و جنوب کانادا برابر ۱۰۳ دلار در هکتار برآورد نموده‌اند.

۱-۵- درباره این کتاب

نگارش این مجموعه، کوششی برای گردآوری و تطبیـق اطلاعـات و مـروری جـامع در مـورد فرایندهای اساسی فروسایی خاک است که شامل تراکم خـاک، خـاک‌هـای سـخت شـونده، پلینتایـت و لاتریتی شدن، فرسایش خاک، و شرایط ماندابی و بی‌هـوازی (فروسـایی فیزیکـی)، عـدم تـوازن عناصـر غذایی و تجمع املاح (فروسایی شیمیایی) و همچنین مروری جامع بر فرایند فروسایی زیستی خواهد بود. جلد اول از این مجموعه که شامل تراکم خاک و شرایط ماندابی است در اینجـا تقـدیم مـی‌گـردد. سـایر بخش‌های مربوط به فروسایی خاک به یاری حق و مساعدت دوستان آگاه در مجلدات بعدی ارائه خواهـد گردید.

مجموعه حاضر، گامی کوچک در جهت ایجاد هشیاری در مورد خطر فروسایی خاک است. اما افزون بر آن، ضرورت دارد که توسعه روش‌های بازیابی حاصلخیزی زمین‌هایی که در اثر مدیریت نادرست گذشته دچار تخریب شده‌اند، مورد تاکید قرار گیرد. حتی اگر تنها نیمی از اراضی که تخریب می‌شوند (حدود یک میلیارد هکتار) زیر کشت قرار گیرند، پایه تولید کشاورزی را می‌توان بسیار گسترش داد. همچنین، بازیابی حاصلخیزی و اصلاح اراضی تخریب شده، فشار برای دست یافتن به اراضی جدید زراعی را کاهش خواهد داد.

۱-٦ مراجع

Barbier, E.B. and J.T. Bishop. 1995. Economic values and incentives affecting soil and water conservation in developing countries. J. Soil and Water Cons. 50:133-137.

Colacicco, D., T. Osborn, and K. Alt. 1989. Economic damage from soil erosion. J. Soil and Water Cons.44:35-39.

Crosson, P. 1985. National costs of erosion effects on productivity. In: Erosion and soil productivity. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.

Eriksson, J., I. Hakansson, and B. Danfors. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Engr. Rept. 354. Institute of Agriculture Engineers, Uppsala, Sweden.

FAO/UNEP. 1983. Guidelines for the control of soil degradation. FAO, Rome, Italy.

Fox, M.G. and D.R. Coote. 1985. A preliminary economic assessment of agricultural land degradation in Atlantic and central Canada and southern British Colombia. Regional development branch, Contribution 85-70. Agriculture Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

Gill, W.R. 1971. Economic assessment of soil compaction. In: K.K. Barnes and W.M. Carlton (eds.), Compaction of agricultural soils. American Society of Agriculture Engineers, St. Joseph, MI.

Hakansson, I., W.B. Voochees, and H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil Tillage Res. 11:239-282.

Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). 1990. Soil degradation. Advances in soil science, Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Lal, R. et al. 2004. Soil degradation in the United States: extent, severity, and trends. CRC Press, Boca Raton.

Lee, G. et al. 1998. Methods of economic assessment of on-site and off-site costs of soil degradation. In: Lal et al. (eds.), Methods for assessment of soil degradation, Advances in soil science. CRC Press, Boca Raton.

Oldeman, L.R. et al. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation, An explanatory note. ISRIC, Wageningen.

Science Council of Canada. 1986. A growing concern: Soil degradation in Canada. Supply and services Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

UNEP. 1982. World soil policy. UNEP, Nairobi, Kenya.

UNEP. 1986. Farming systems principles for improved forest production and the control of soil degradation in the arid, semi-arid and humid tropics. Expert meeting, sponsored by the UNEP, 20-30 June 1983. ICRISAT, Hyderabad, India.

USDA-NRCS. 2003. Soil compaction: Detection, prevention, and alleviation. Soil quality- Agronomy technical note, No.17. Soil Quality Institute, USDA-NRCS.

فصل دوم

تراکم خاک در کشاورزی

۲-۱- مقدمه

۲-۱-۱- پیشینه

انسان به طور طبیعی آموخته است که در نواحی اقلیمی معینی زندگی کند که بهترین شرایط را برای کشاورزی دارا باشد. در کانادا، ۶۰ درصد از بهترین اراضی کشاورزی در محدوده ۸۰ کیلومتری شهرهای بزرگ قرار گرفته است (دومانسکی، ۱۹۸۰). توسعه شهرها و صنایع بر تقاضا از کل منابع ارضی می افزاید به طوری که اراضی کشاورزی به طور مستقیم با تغییر کاربری و به طور غیر مستقیم به عنوان محل تخلیه ضایعات خطرناک صنایع از این روند آسیب می‌بیند (کوت، ۱۹۸۰). وضعیت در حال تغییر فعالیت‌های بشر، نیروی کار مزرعه‌ای را به سوی شهرنشینی سوق داده است. کاهش زمین و نیروی کار، توام با تقاضای فزاینده برای غذا و قیمت بالاتر نهاده‌ها، علم و فن آوری را به تلاش برای افزایش بهره‌وری اراضی زراعی موجود و بهبود کارآیی تولید کشاورزی واداشته است.

از یک سو، با انجام عملیات بهسازی مانند زهکشی زیرزمینی، آبیاری، کنترل آفات و علف‌ها و پرورش گونه‌های مقاوم گیاهان، مقدار محصول افزایش یافته و از سوی دیگر، افزایش مکانیزاسیون و گرایش به کاربرد وسیع تر و موثرتر ماشین‌های کشاورزی به متراکم شدن تدریجی خاک‌ها و در نتیجه کاهش حاصل‌خیزی در برخی مناطق منجر شده است. همچنین، در اثر استفاده مفرط از کودهای غیرآلی و شخم زیاد از حد و عملیاتی که منجر به کاهش مواد آلی خاک می‌گردد، حساسیت خاک‌ها به تراکم افزایش یافته است (رقاوان و همکاران، ۱۹۹۰).

۲-۱-۲- اثرات اقتصادی

برآورد اثر اقتصادی تراکم خاک به دلیل عوامل متعدد دخیل در آن، دشوار است. در منطقه کبک، تا حد ۵۰ درصد از کاهش محصول ذرت به تراکم خاک‌های رسی نسبت داده می‌شود (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۸). نتایج به دست آمده از آزمایش‌های متعدد بر روی غلات و دانه‌های روغنی در سوئد، ۲۵ درصد کاهش محصول (اریکسون و همکاران، ۱۹۷۴) و ۳۵ درصد افزایش هزینه مصرف سوخت برای شخم خاک‌های متراکم (وورهیس،۱۹۸۰) را نشان داده است. در مزارع کشت و صنعت خوزستان سال‌های استفاده بعد از هر بار قلمکاری (راتن) به نیم و بعضا یک چهارم رسیده که علت عمده آنرا متراکم شدن خاک می‌دانند. لیندزتروم و همکاران (۱۹۸۱) نیز افزایش رواناب و شدت فرسایش را به تراکم خاک سطحی نسبت داده‌اند. چانسلور (۱۹۷۶) به افزایش هزینه‌های اجرایی آبیاری به علت نفوذپذیری‌اندک و احتمالاً تبخیر شدیدتر در خاک‌های متراکم اشاره کرده است. کاهش کارایی مصرف کود، هزینه‌های اصلاح ساختمان خاک در آینده و برخی عوامل دیگر نیز در منابع علمی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

تنها در ایالات متحده آمریکا، خسارات ناشی از کاهش محصول در مزرعه بالغ بر ۱/۸ میلیارد دلار برآورد می‌شود (۱۹۷۱) که بر مبنای فرض ده درصد کاهش محصول در زمین‌هایی که یخ زدن زمستانه به عمق خاک هم می رسد، محاسبه گردیده؛ اگر چه در مناطق شمالی مقدار کاهش محصول کمتر از حد واقعی برآورد شده است. مطالعات مختلفی این نظریه قدیمی را که دوره‌های طبیعی یخ زدن – ذوب شدن و خشک و تر شدن را برای کاهش تراکم خاک ناشی از تردد ماشین‌ها در فاصله دو فصل کاشت کافی می‌داند، رد می‌کنند (وورهیس و همکاران، ۱۹۸۵). به‌ویژه ابقا و تداوم تراکم خاک زیر سطحی توسط نویسندگان مختلف گزارش شده است (بلیک و همکاران، ۱۹۷۶؛ گامدا و همکاران، ۱۹۷۸؛هاکانسون، ۱۹۸۲). در کانادا، اثرات فروسایی خاک در مزرعه به طور کلی در محدوده ۶۹۸ تا ۹۱۵ میلیون دلار تخمین زده شد (گیرت، ۱۹۸۶). مهویس (۱۹۸۴) ۸۵ درصد از اثر اقتصادی فروسایی خاک در منطقه کبک را به تراکم نسبت داده است. وی میانگین کاهش محصول مرتبط با تراکم را در حدود ۱۵ درصد از محصول بالقوه برآورد کرده است که معادل ۱۰۰ میلیون دلار کاهش درآمد در کل منطقه می‌باشد. جدول ۶ برآورد وسعت و شدت تراکم خاک در جهان را نشان می‌دهد.

جدول ٦- وسعت و شدت تراکم خاک (میلیون هکتار) در جهان (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

خفیف		متوسط	شدید	خیلی شدید	کل	درصد از کل اراضی
آسیا	۴/۶	۵/۰	۰/۲	–	۹/۸	۰/۲۳
آفریقا	۱/۴	۸/۰	۸/۸	–	۱۸/۲	۰/۶۱
آمریکای جنوبی	۲/۹	۰/۸	۰/۳	–	۴/۰	۰/۲۳
آمریکای مرکزی	–	۰/۱	–	–	۰/۱	۰/۰۳
آمریکای شمالی	۰/۵	۰/۴	–	–	۰/۹	۰/۰۵
اروپا	۲۴/۸	۷/۸	۰/۴	–	۳۳/۰	۳/۴۷
استرالیا	۰/۷	–	۱/۶	–	۲/۳	۰/۲۶
کل جهان	۳۴/۸	۲۲/۱	۱۱/۳	–	۶۸/۲	۰/۵۲

۲-۱-۳- اهداف

افزایش تعداد مقالات مربوط به تراکم از نیمه دوم قرن بیستم تاکنون با روشن تر شدن اثرات اقتصادی آن که با کاهش محصول توام بوده است، قابل توجیه می‌باشد. در حال حاضر، تراکم خاک از برخی جهات به خوبی شناخته شده است به طوری که می‌توان چارچوبی برای مدیریت شرایط فیزیکی خاک‌ها در سطح مزرعه ارائه نمود. اما هدف این فصل ارائه یک طرح مفهومی از روابط ماشین – خاک – گیاه بر اساس آخرین تحقیقات انجام شده و همچنین، ارائه برخی دیدگاه‌های کاربردی برای مدیریت خاک در ارتباط با تراکم می‌باشد. برخی جنبه‌های تحقیقات خاک ورزی ناچار با تفصیل بیشتری بیان خواهد شد.

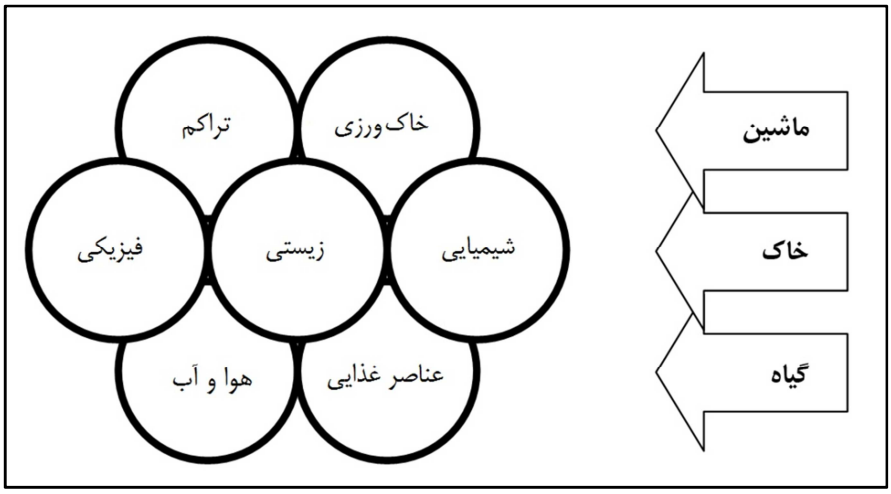
۲-۲- سیستم ماشین – خاک – گیاه

۲-۲-۱- تبیین مفاهیم

در کشاورزی مکانیزه مدرن، اهمیت تغییر شرایط خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی کمتر از واکنش گیاه به تغییرات ایجاد شده در محیط ریشه نیست. نمایی از طبقه بندی مفاهیم مربوطه در شکل ۱ آمده است. ترتیب عناصر اصلی سیستم (ماشین، خاک و گیاه) نمایانگر یک مفهوم

کنش – واکنش – خروجی می‌باشد. عنصر اول به دو بخش تراکم و ماشین‌های خاک ورزی و عنصر دوم به ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی تقسیم می‌گردد. سومین عنصر نمایانگر نیازهای گیاهان به آب، هوا و عناصر غذایی است. خطهای پیوند دهنده به مفهوم اثرات متقابل میان عناصر فرعی می‌باشد. اغلب منابع علمی موجود در مورد تراکم خاک به چنین تاثیرات متقابلی به ویژه از جنبه‌های فیزیکی توجه نموده‌اند.

پیچیدگی موضوع در همین جا پایان نمی‌یابد و تقسیم‌بندی جزئی‌ترین عناصر فوق‌الذکر در سلسله‌های جدیدی از روابط متقابل ادامه می‌یابد. اثرات وابسته به زمان شامل آب و هوا و کاهش طبیعی تراکم (مانند اثر فعالیت ریشه در ساختمان خاک)، توالی دست‌خوردگی خاک، رشد گیاهان و محدودیت‌های زمانی و اقتصادی تولید نیز وابستگی‌های متقابلی را ایجاد می کنند. در این رابطه تعدادی از سیستم‌های کشت و خاک ورزی مانند تک کشتی، تناوب کشت، کشت مخلوط، کشت بدون شخم و شخم حداقل نیز شایان توجه است. منابع علمی در مورد روابط ماشین – خاک – گیاه پراکنده و سرشار از مسایل نظری و عملی حل نشده هستند، اما امکان توسعه و ارائه راهبردهایی برای کشاورزی پایدار در آینده نزدیک وجود دارد.



شکل ۱- نمایش مفهومی سیستم ماشین – خاک – گیاه با عناصر فرعی و روابط متقابل آنها

در این فصل، به منظور مطرح کردن دورنمایی از اجزاء، فرایند تراکم به طور خلاصه تشریح شده و سپس واکنش گیاه به شرایط فیزیکی خاک و عکس العمل فیزیکی به تردد ماشین‌های کشاورزی مورد بحث قرار گرفته است. روابط اخیر به طور کلی به عنوان شاخص‌های تغییرات محیط خاک به کار رفته‌اند. واکنش گیاه به عنوان برایند تغییرات شرایط خاک و فرایندهایی مانند اثر تغییرات محیط خاک بر تراز آب، زیست بوم میکروارگانیسم‌ها، آزاد شدن عناصر غذایی و غیره در نظر گرفته شده است. تغییرات ساختمان فیزیکی خاک معیاری از اثرات توام به هم زدن مکانیکی مکرر و نیروهای طبیعی وارد بر خاک در طی یک دوره زمانی معین می‌باشد.

۲-۲-۲- فرایند تراکم خاک

تراکم خاک را می‌توان به عنوان فشردگی توده‌ای از خاک در حجمی کوچک‌تر تعریف نمود. تغییر در ویژگی‌های حجمی با تغییرات ویژگی‌های ساختمانی، هدایت گرمایی و آبی و انتقال گازها همراه است. این تغییرات به نوبه خود بر تعادل‌های زیستی و شیمیایی تاثیر می‌گذارند. به عبارتی، محیط خاک بسته به مقدار تراکم، چنان تغییر می‌کند که کل فرایندهای موجود در خاک را کم و بیش تحت تاثیر قرار می‌دهد.

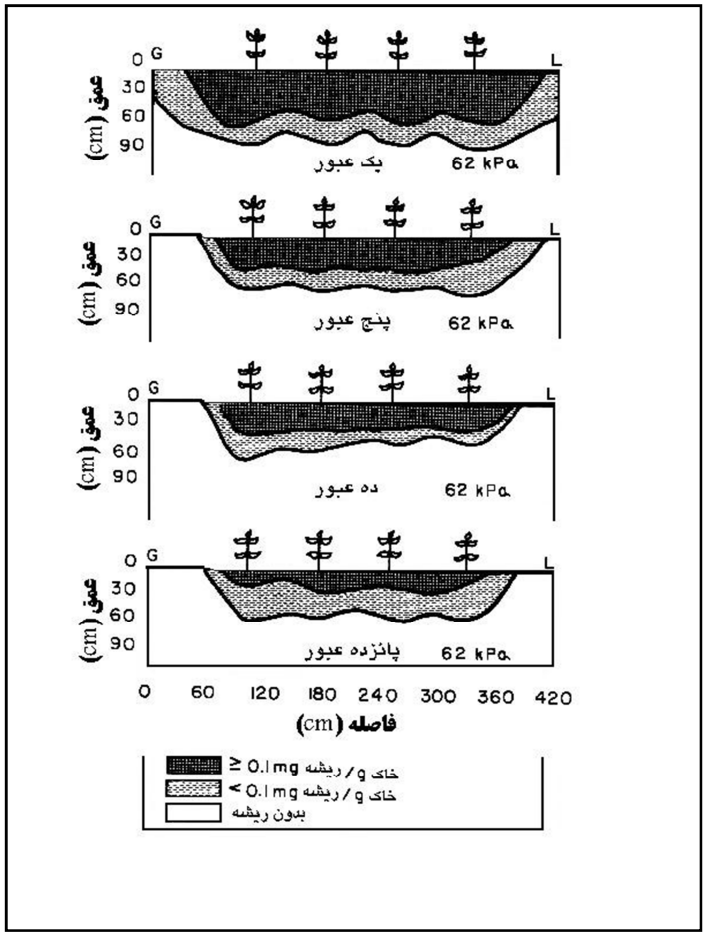
درجه تراکم خاک معمولاً با جرم مخصوص ظاهری خشک، تخلخل یا مقاومت به فروروی بیان می‌شود؛ اما تعیین ویژگی‌های تراکم جنبه‌های متناقض دارد. پارامترهایی را که تراکم ناشی از عبور چرخ‌ها را به خوبی توضیح می‌دهند نمی‌توان مستقیماً برای ارزیابی عکس العمل‌های گیاه به کاربرد و نیز نمی‌توان تغییرات ناشی از فرایندهای اصلاح کننده تراکم (مانند خاک ورزی و کاهش طبیعی تراکم) را به خوبی بر حسب پارامترهای مربوط به تراکم تعبیر نمود. سون (۱۹۸۵) و سون و بون (۱۹۸۶) پیشنهاد کرده‌اند که شاخص‌های ساختمانی جدیدی ابداع شود که مبین رابطه قوی تری میان اثرات متقابل تردد – خاک – گیاه باشد. در این جهت کوشش‌هایی توسط بون (۱۹۸۶) صورت گرفته و به صورت نظریه جرم مخصوص بحرانی خاک در رابطه با حد بهینه برای فرایندهای گوناگون مربوط به گیاه ارائه شده است. محور این نظریه، شناخت عوامل محدود کننده برای گیاهان، خاک‌ها و شرایط اقلیمی معین و اثبات روابط میان تراکم‌پذیری خاک و عوامل محدودکننده اصلی مربوط به خاک می‌باشد. در برخی شرایط، عامل محدودکننده ممکن است رطوبت و در شرایط دیگر، تهویه یا مقدار عناصر غذایی باشد.

صرف نظر از تعریف کمّی، تخریب ساختمان خاک را می‌توان بـه طـور عینـی در انـواع شـدید تراکم مشاهده نمود. چنانچه کانالی در یک خاک متراکم احداث شود، سطح دیواره‌ها (برخلاف خاک‌های غیر متراکم) صاف است و خلل و فرج آن چندان مشهود نیست. خاک‌های بسیار متراکم، تهویه ضـعیف و هدایت هیدرولیکی‌اندک دارند. اثر تراکم شدید خاک بر رشد گیاهان به صورت تفاوت آشکار رشد در ابتدا و انتهای فصل و در قطعات خاک متراکم و غیر متراکم دیده می‌شود. در عین حال، نتـایج آزمـایش‌هـای بلند مدت واکنش گیاهان به تراکم (اریکسون و همکاران، ۱۹۷۴؛ رقاوان و مک کیز،۱۹۸۳) نشان داده‌اند که جز در شرایط تراکم شدید، تراکم لزوماً برای رشد گیاه زیان‌آور نمی‌باشد.

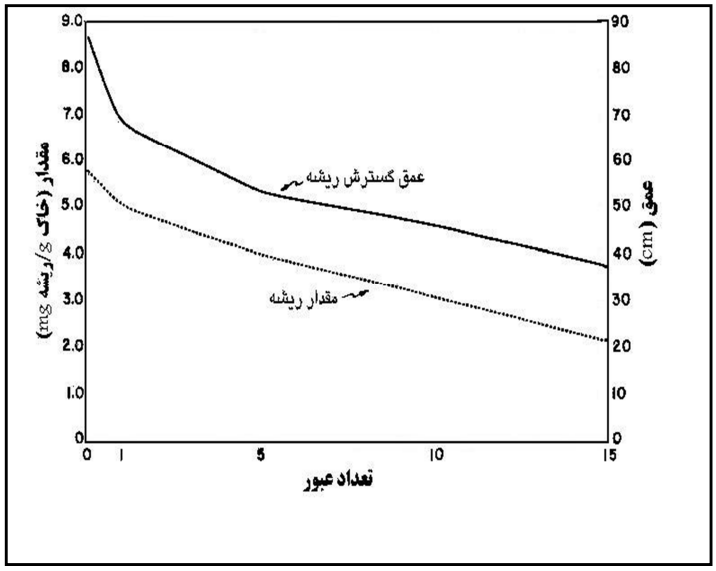
۲-۲-۳- واکنش گیاهان به تراکم

در تولید زراعی باید توجه شود که فرایندهای مربوط به خاک و اتمسفر وابستگی متقابل دارنـد. مقدار جذب از سیستم ریشه در هر زمان با «پتانسیل فتوسنتز» مرتبط است که آن هم متاثر از مقدار نـور و CO_2 قابل دسترس و توانایی گیاه برای جـذب آنهـا توسـط بخـش‌هـای هـوایی مـی‌باشـد. پتانسـیل فتوسنتزی که در هر زمان به دست می‌آید به توانایی سیستم ریشـه بـرای جـذب آب، عناصـر غـذایی و اکسیژن از خاک و تخلیه CO_2 تنفسی بستگی دارد. حداکثر رشد وقتی حاصل می‌شود که سیستم ریشـه بتواند جوابگوی نیازهای پتانسیل فتوسنتزی در شرایطی باشد که خـاک، لااقـل مقـدار کـافی از عناصـر غذایی و آب را داشته و از مکانیسم کارایی برای تبادل گازی برخوردار باشد. حـداکثر عملکـرد وقتـی بـه دست می‌آید که شرایط بهینه در سراسر دوره رشد فراهم گردد؛ماننـد هنگـامی کـه یـک ارتبـاط مـادی منسجم میان رشد گیاه، اقلیم و شرایط نیمرخ خاک مشابه آنچه که در محیط کنترل شده مصنوعی تامین می‌شود، برقرار باشد.

توازن فوق الذکر ممکن است در خاک‌های متراکم بر هم بخورد. وجود موانع مکانیکی شدیدتر در خاک‌ها یا لایه‌های متراکم، باعث محدود شدن عمق گسترش ریشه (شکل ۲) و مقدار کلی ریشه بـه ازای واحد وزن خاک (شکل ۳) می‌گردد.

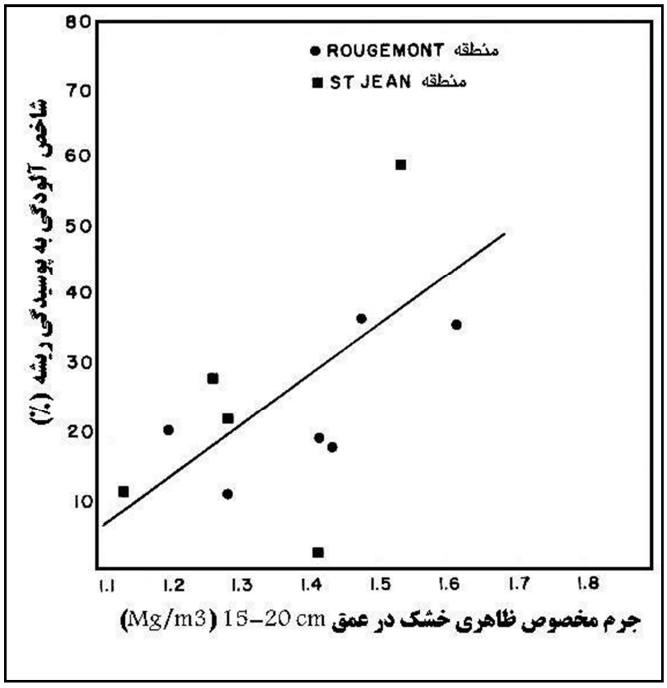


شکل ۲- توزیع مقدار ریشه به ازای واحد وزن خاک در یک خاک رسی که در معرض ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ عبور چرخ در فشار تماس *kPa* ۶۲ قرار گرفته است (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹)



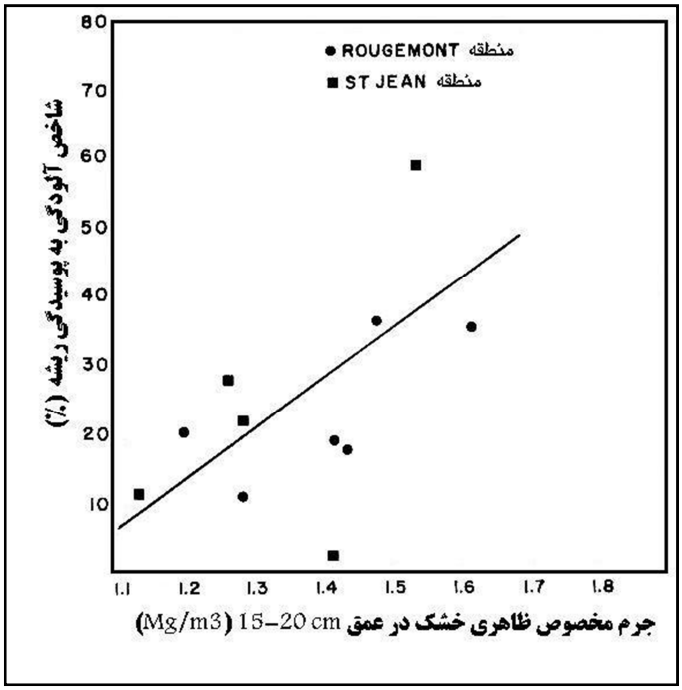
شکل ۳- نمودار عمق گسترش ریشه و مقدار ریشه ذرت به ازای واحد وزن خاک در برابر تعداد عبور چرخ بر یک خاک رسی (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹)

آشکارترین اثر محدودیت گسترش ریشه بر گیاه، کاهش دسترسی به آب و عناصر غذایی است. کاهش نفوذ آب به خاک عمقی نیز می‌تواند در حین دوره‌های خشک، شرایط را بحرانی کند. همچنین، اظهار شده است که محدودیت در فراوانی ریشه می‌تواند منجر به کاهش توانایی سیستم ریشه در غالب شدن بر اثرات زیان بار عوامل بیماری‌زا در خاک سطحی گردد (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹). طی مطالعه مزارع نخود در جنوب غربی کبک، ویجیه و رقاوان (۱۹۸۰) رابطه‌ای میان جرم مخصوص ظاهری خشک خاک و شاخص ابتلا به بیماری پوسیدگی ریشه به دست آورده‌اند (شکل ۴).



شکل ٤- نمودار شاخص آلودگی به پوسیدگی ریشه (*Root rot*) در مقابل جرم مخصوص ظاهری خشک *(DBD)* در مزارع نخود دو منطقه از کبک که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند. عمق نمونه برداری *cm* ۲۰-۱۵ بوده است (ویجیه و رقاوان، ۱۹۸۰)

یک مدل رگرسیون که بر مبنای نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای به دست آمده (رقاوان و همکاران، ۱۹۸۲) نشان داده است که در سطوح معین بیماری پوسیدگی ریشه، مقدار محصول متناسب با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش می‌یابد (شکل ۵).

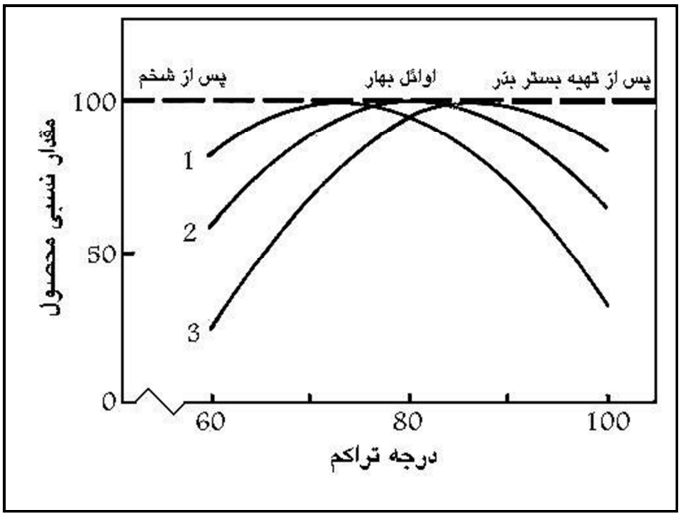


شکل ۵- برآورد مقدار محصول خشک نخود در مقابل *DBD* برای سطوح مختلف آلودگی و بر مبنای مدل به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای (رقاوان و همکاران، ۱۹۸۲)

تغییرات رژیم تهویه ای – رطوبتی ناشی از تراکم خاک بر فعالیت‌های میکروبی مانند موازنه نیتروژن، تاثیر می‌گذارد به گونه‌ای که با افزایش تراکم، نیترات به آمونیوم تبدیل می‌شود (شپتوخوف و همکاران، ۱۹۸۲؛ ورونین، ۱۹۸۲) که تاثیر نامطلوبی بر مقدار محصول بر جای می‌گذارد. داده‌های حاصل از مطالعه گیاه چغندرقند که در قطعات آزمایشی با تراکم متفاوت کشت شده و به مدت ۶ سال به صورت آیش باقی مانده است، نشانگر کاهش محصول به علت اثر دیرپای[1] تراکم پس ماند[2] برموازنه نیتروژن در خاک بوده است (محمد، ۱۹۸۷).

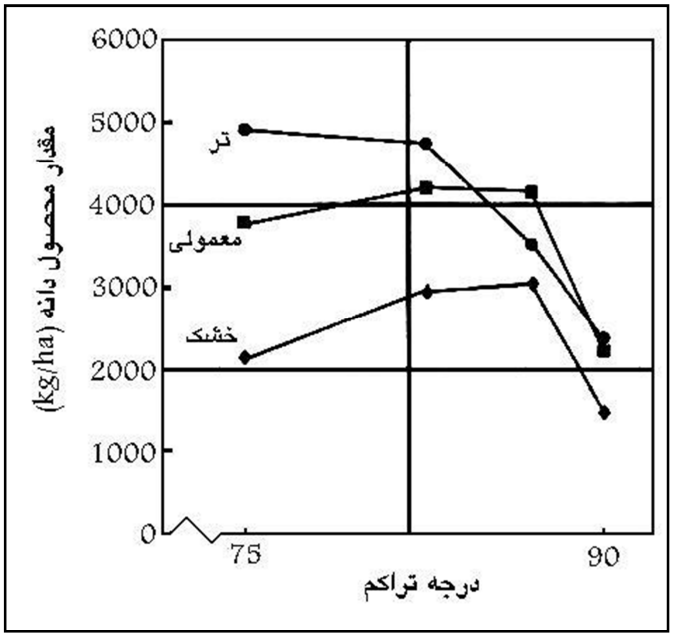
مطالعات مربوط به تراکم منجر به شناسایی اهمیت روابط کلی میان تراکم خاک با مقدار محصول گردیده است. شکل ۶ نشانگر رابطه میان مقدار محصول – تراکم خاک – آب و هوا می‌باشد.

1- Persistent
2- Residual



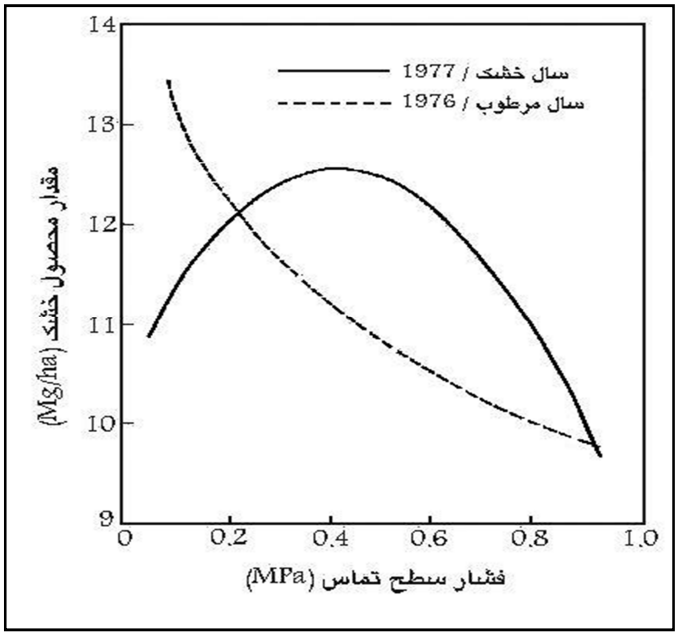
شکل ٦- نمایش روابط تراکم – محصول – آب و هوا. منحنی‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب، نشان‌دهنده سال‌های مرطوب، معمولی وخشک می‌باشند (اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤)

نکته قابل توجه در این نمودار، آن است که درجه تراکمی که (به عنوان نسبتی از سطح تـراکم استاندارد) حداکثر محصول در آن به دست می‌آید به رژیم آب و هوایی بستگی دارد. داده‌های بـه دسـت آمده از آزمایش‌های شبیه سازی شرایط تراکم – آب و هوا روی گیاه جو (اریکسـون و همکـاران، ۱۹۷۴) موید این مطلب است (شکل ۷).



شکل ۷- نتایج به دست آمده توسط ادلینگ و فرجدال از آزمون‌های شبیه سازی اثر تراکم – آب و هوا بر مقدار محصول دانه جو (اریکسون و همکاران، ۱۹۷٤)

رقاوان و همکاران (۱۹۷۹) نیز نتایج مشابهی را در یک مطالعه مزرعه‌ای دو ساله روی ذرت به دست آورده‌اند (شکل ۸). نکته قابل توجه آن است که در سال‌های خشک، مقدار محصول در خاک کمی متراکم، بیشتر از خاک سست بوده است. رقاوان و مک کی (۱۹۸۳) چنین وضعیتی را به تفاوت رطوبت قابل جذب نسبت داده‌اند زیرا قطعات غیر متراکم به علت تلفات تبخیر، حاوی رطوبت بسیار کم بوده‌اند؛ در حالی که قطعات بسیار متراکم، آب را به سختی در خلل و فرج کوچک خود نگهداری کرده‌اند. موازنه آب در سطوح متوسط تراکم، مطلوب‌تر بوده است.



شکل ۸- مقدار محصول ذرت در مقابل مقدار تجمعی فشار سطح تماس در سال‌های مرطوب و خشک (رقاوان و همکاران، ۱۹۷۹)

مطلب فوق مثالی از این واقعیت است که تراکم به تنهایی اثرات مشاهده شده را بدون توجه به عوامل موثر دیگر توجیه نمی‌کند. جذب آب توسط ریشه، بیش از تخلخل کل، متاثر از توزیع‌اندازه خلل و فرج و پیوستگی آنهاست. تغییر در توزیع‌اندازه خلل و فرج در اثر تراکم، عمدتاً در خلل و فرج درشتی روی می‌دهد که تهویه و مقدار آب قابل جذب وابسته به آنهاست. علاوه بر این، رابطه میان آب قابل جذب و درجه تراکم تابع مقدار نفوذ آب باران می‌باشد.

اگر چه منحنی‌های تراکم بهینه، لزوماً طبیعتی آماری دارند و برای هر محصول، نوع خاک و بافت خاک متفاوت می‌باشند (بون، ۱۹۸۶) اما با استفاده از آنها نگرش اجمالی از روابط خاک – گیاه و به طور غیر مستقیم اثر اقلیم به دست می‌آید. نقطه حداکثر در منحنی‌های تراکم بهینه نشانگر حساسیت محصول به تراکم است و بستگی به گونه مورد نظر دارد. گونه‌های با ریشه عمیق، حساسیت کمتری به تراکم دارند زیرا با شرایط نفوذ در لایه معمولاً متراکم زیر سطحی سازگار می‌باشند. ویژگی‌های دیگری

مانند مقاومت به خشکی یا مقاومت به شرایط بسیار مرطوب، ممکن است شاخصی از حساسیت کمتر بـه تراکم محسوب گردند.

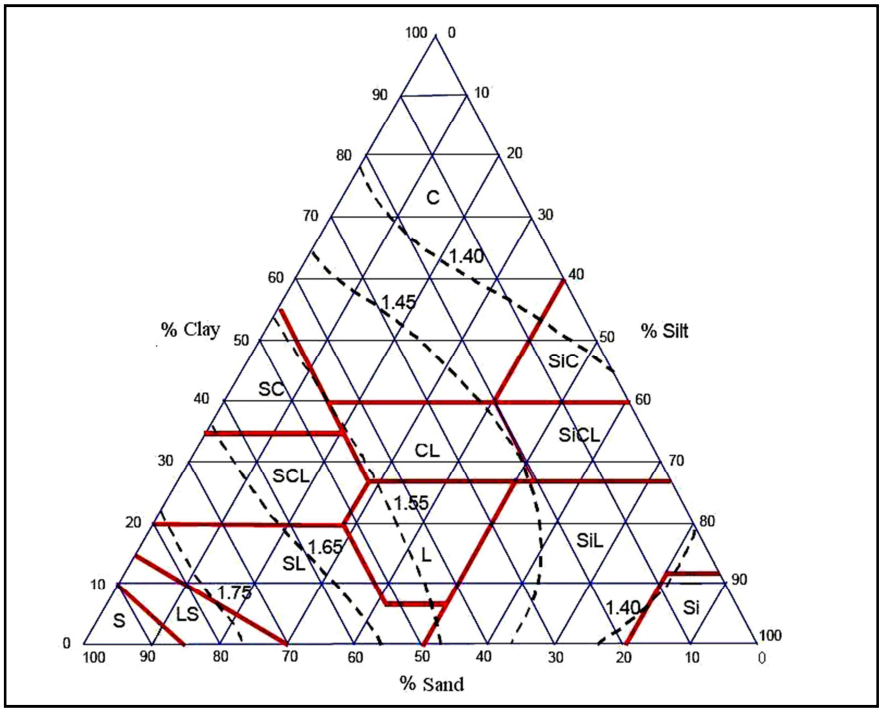
مقدار محدود کننده جرم مخصوص ظاهری برای رشد ریشه گیاه به عوامل متعـددی از جملـه مواد مادری، بافت خاک، رشد عمومی گیاه، و تاریخچه مدیریت مزرعـه بسـتگی دارد. دادو و وارینگتـون (۱۹۸۳) اظهار داشته‌اند که بافت خاک از آن جهت که بر میانگین اندازه خلل و فرج و مقاومت مکـانیکی خاک متراکم اثر دارد، بیشترین تاثیر را برحد بحرانی یا مقدار محدودکننده جرم مخصوص ظاهری بـرای رشد ریشه گیاه[1] *(GLBD)* بر جای می‌گذارد. آنان برای ارزیابی مقاومت خاک به رشد ریشه، اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری را بر فروسنجی ترجیح داده‌اند زیرا کمتر به مقـدار رطوبـت و روش انـدازه‌گیـری وابستگی دارد. دادو و وارینگتون (۱۹۸۳) برای خاک‌هایی با *GLBD* معین، مقدار میانگین شـعاع خلـل و فرج ذرات را محاسبه و رابطه رگرسیون آنها را به دست آوردند. سـپس بـرای ۸۰ بافـت مختلـف مقـادیر *GLBD* را محاسبه و در مثلث بافت خاک قرار دادند. در گام بعدی، منحنی‌های هم جرم مخصوص رسم شده (شکل ۹) که با استفاده از آن حد بحرانی تراکم برای رشد گیـاه را مـی‌تـوان بـرآورد نمـود. مقـادیر *GLBD* به دست آمده از منحنی‌های هم جرم مخصوص با مقادیر گزارش شـده اداره حفاظـت از منـابع طبیعی وزارت کشاورزی آمریکا در جدول ۷ مطابقت زیادی دارد. مقدار *GLBD* با استفاده از معادله زیـر قابل محاسبه است (تاجیک، ۱۳۸۷).

$$GLBD = 1.34 + 3.02\ [0.225\ (d_g{}^{0.5})] \qquad R^2 = 0.99 \qquad (۱-۲)$$

که در آن،

d_g برابر میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

1- Growth Limiting Bulk Density



شکل ۹- مثلث بافت خاک همراه با منحنی‌های هم جرم مخصوص (گلداسمیت و همکاران، ۲۰۰۱)

جدول ۷- مقادیر کلی جرم مخصوص ظاهری (gcm^{-3}) در رابطه با رشد ریشه گیاه (*USDA-NRCS, 2003*)

بافت خاک	مقدار آرمانی	مقدار محدود کننده	حد بحرانی
S, LS	۱/۶۰ >	۱/۶۹	۱/۸۰ <
SL, L	۱/۴۰ >	۱/۶۳	۱/۸۰ <
SCL, L, CL	۱/۴۰ >	۱/۶۰	۱/۷۵ <
Si, SiL	۱/۳۰ >	۱/۶۰	۱/۷۵ <
SiL, SiCL	۱/۴۰ >	۱/۵۵	۱/۶۵ <
SC, SiC, CL (% clay = 35 - 45)	۱/۱۰ >	۱/۴۹	۱/۵۸ <
C (% clay > 45%)	۱/۱۰ >	۱/۳۹	۱/۴۷ <

گولداسمیت و همکاران (۲۰۰۱) درجه تراکم مطلوب برای رشد ریشه گیاه[1] *(DDC)* را به عنوان نسبت *GLBD* به حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک (*MBD*) حاصل از آزمون پراکتور تعریف نموده‌اند. آنان اظهار داشته‌اند که هنگام آماده سازی پی سازه‌ها بسته به اهمیت و کاربردهای آتی آنها (سد خاکی، جاده معمولی، باند فرودگاه، بزرگراه و...) معمولا خاک تا حد ۹۰ تا ۹۵ درصد *MBD* متراکم می‌گردد. چنین حدی از تراکم برای مقاصد زراعی یا ایجاد پوشش گیاهی توام با احداث سازه (مثلا در مورد سازه‌های تثبیت شیب یا مقابله با فرسایش، یا پروژه‌های مهندسی زیستی) مناسب نیست. مشاهدات آنان مؤید آن بوده است که مقدار *DDC* بین ۸۱/۹ تا ۹۱ درصد (میانگین ۸۴/۱ درصد) می‌تواند ضمن ایجاد پایداری در سازه احداث شده، شرایط نسبتا مناسبی برای رشد گیاهان نیز فراهم نماید. تاجیک (۱۳۸۷) مقدار *DDC* بین ۷۳/۲ تا ۹۳ با میانگین ۷۹/۶ درصد را به دست آورده که مفهوم آن متراکم کردن خاک تا حدود ۸۰ درصد *MBD* است که ضمن پایدار کردن سازه مفروض (برای تثبیت شیب یا کنترل فرسایش) مانعی برای رشد ریشه گیاه ایجاد نمی‌کند.

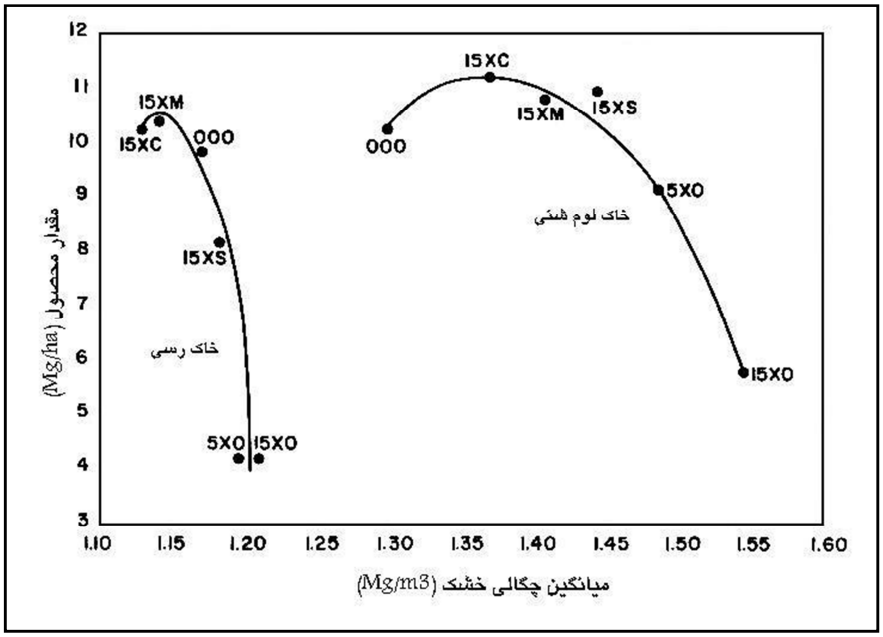
۲-۲-٤- واکنش گیاه به خاک‌ورزی

خاک‌ورزی به دلایل متعددی مانند آماده کردن بستر بذر، مخلوط کردن بقایای گیاهی و کودهای حیوانی با خاک، کنترل علف‌های هرز و یا کنترل فرسایش بادی انجام می‌شود. مروری بر اهداف کلی خاک‌ورزی توسط لارسون و ازبرن (۱۹۸۲) ارائه شده است. با توجه به هدف این فصل، خاک‌ورزی در اغلب موارد به عنوان بخش لازم تولید زراعی و به ویژه به عنوان عملیاتی که منجر به سست کردن لایه‌های متراکم خاک می‌گردد، در نظر گرفته شده است. اثرات خاک‌ورزی بر تولید محصول به خاک، اقلیم، ادوات مورد استفاده و پستی و بلندی خاک بستگی دارد. در جایی که تراکم خاک سطحی مشکل ساز شده است، خاک‌ورزی مطمئناً می‌تواند اثر اصلاحی داشته باشد.

در آزمایش‌های بررسی اثرات توام تراکم – خاک‌ورزی (کبک، اقلیم مرطوب) توسط نگی و همکاران (۱۹۸۱) در خاک‌های شنی و رسی، بیشترین مقدار محصول در خاک‌های بسیار متراکم که با گاوآهن قلمی یا برگردان‌دار شخم شده بود، به دست آمد که نتایج آن با قطعات آزمایشی غیر متراکم و بدون شخم قابل مقایسه بوده است. کمترین مقدار محصول در قطعات متراکم بدون شخم به دست آمد. نتایج به دست آمده از خاک‌های رسی و خاک‌های لوم شنی نشانگر آن بوده است که مقدار محصول را

1- Desirable degree of Compaction

می‌توان به صورت تابع خمیده خطی[1] از جرم مخصوص خاک نشان داد کـه در بخـش قبلـی (بـا وجـود متفاوت بودن ابزار خاک‌ورزی مورد استفاده) تشریح گردید (شکل ۱۰). ایـن نتیجـه‌گیـری‌هـا بـر مبنـای متوسط جرم مخصوص ظاهری خشک در ۲۰ سانتی‌متر بالایی خاک قرار دارند. برازش منحنی رگرسیون بر داده‌ها چندان مطلوب نیست که می‌تواند به اثر متفاوت ادوات خاک‌ورزی مورد اسـتفاده بـر سـاختمان خاک و در نتیجه افزایش تغییر پذیری داده‌ها نسبت داده شود.



شکل ۱۰- مقدار محصول ذرت در مقابل جرم مخصوص ظاهری خشک در دو خاک رسی و لوم شنی. کدهای روی هر نقطه به ترتیب از سمت چپ نشانگر تعداد عبور، فشار تماس *(62 kPa)* و ادوات خاک‌ورزی مورد استفاده در تراکم (*O* بدون شخم، *C* گاوآهن قلمی، *M* گاوآهن برگردان‌دار، *S* زیرشکن) می‌باشد (نگی و همکاران، ۱۹۸۱)

در مناطق خشک‌تر، راهبردهایی مانند کشت بدون شخم و شخم حفاظتی به طـور گسـترده‌ای به عنوان روش‌های حفاظت آب و خاک و کنترل فرسایش پذیرفته شـده و اغلـب از خـاک‌ورزی معمـول اجتناب می‌گردد (لارسون و ازبرن، ۱۹۸۲) اما حتی در چنین منـاطقی، خـاک‌ورزی مـی‌توانـد در کنتـرل

1- Curvilinear

علف‌های هرز یا آفات و بیماری‌های گیاهی یا کاهش مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه سودمند واقع گردد (دان و همکاران، ۱۹۸۷).

۲-۲-۵- واکنش خاک به تردد ماشین‌های کشاورزی

خاک‌های کشاورزی معمولاً در معرض دو اثر عبور ماشین‌های کشاورزی در جهات مختلف هستند که یکی منجر به تراکم شده (عبور چرخ‌ها) و دیگری (عملیات خاک‌ورزی) بخشی از نیمرخ خاک را سست و مخلوط می‌کند. اگر چه تمایل بر آن است که این دو اثر، جداگانه در نظر گرفته شود اما اثرات آنها بر ویژگی‌های خاک عملاً مستقل از هم نیستند زیرا واکنش خاک نسبت به هر یک از آنها تابعی از شرایط ایجاد شده در خاک (در عملیات قبلی) و مجموع اثر نیروهای طبیعی فعال در فاصله این دو عملیات می‌باشد.

واکنش خاک به تراکم تابعی از متغیرهای مربوط به تردد، ویژگی‌های خاک و مقدار رطوبت خاک در زمان تردد می‌باشد. واکنش خاک معمولاً به صورت تغییرات جرم مخصوص ظاهری خشک[1] *(DBD)*، تخلخل[2] *(PO)* و یا مقاومت به فروروی[3] *(PR)* به عنوان تابعی از فشار اعمال شده و مقدار رطوبت خاک[4] *(SMC)* بیان گردیده است.

متغیر *DBD* در تحقیقات مربوط به تراکم بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰) و با برداشت نمونه‌های دست نخورده یا اندازه‌گیری در محل با استفاده از سنجش اشعه گاما صورت می گیرد. مقدار *PO* به راحتی از *DBD* و جرم مخصوص جزء جامد خاک به دست می‌آید که هر دوی آنها شاخص‌های غیر مستقیم ویژگی‌های حرکت آب و قدرت تهویه محسوب می‌گردند. مقدار *PR* نیز معیاری از مقاومت خاک و ممانعت مکانیکی در برابر نفوذ ریشه محسوب می‌گردد. دشواری‌های تفسیر داده‌ها به علت اثر متغیرهایی مانند رطوبت، تاکنون کاملاً رفع نشده‌اند (پرومپرال، ۱۹۷۸). تفسیر داده‌های دستگاه اندازه‌گیری مقاومت به فروروی و تغییرات جرم مخصوص ظاهری، مستلزم تعیین *SMC* پیش و پس از تراکم می‌باشد.

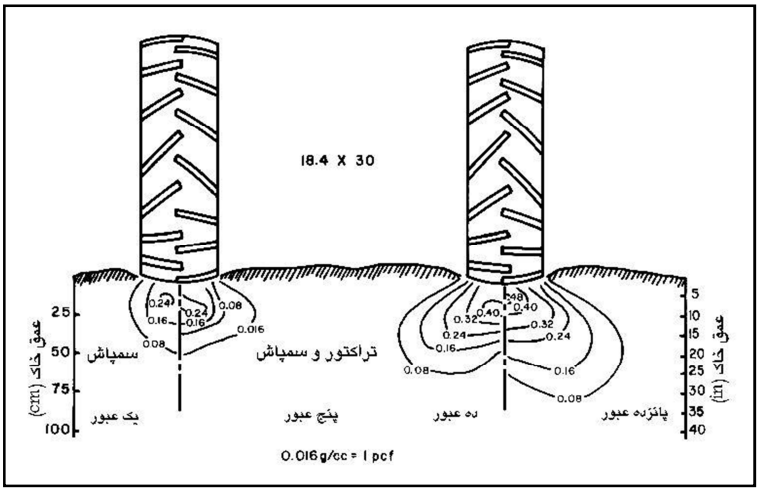
اگر چه خاک‌ورزی مستقیماً بر ویژگی‌های فیزیکی خاک اثر می‌گذارد، اما تاثیر آن به نوع ادوات، عمق شخم، شرایط اولیه خاک و رطوبت خاک در زمان خاک‌ورزی بستگی دارد

1- Dry bulk density
2- Porosity
3- Penetration resistance
4- Soil moisture content

(تیسدل و ادم، ۱۹۸۶). خاک‌ورزی منجر به بهبود شرایط خاک شده و درجه خاکدانه‌سازی آن را تغییر می‌دهد و همانگونه که قبلاً تشریح شده است (ون دورن، ۱۹۸۲) تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های مرتبط با تراکم که ناشی از خاک‌ورزی‌اند به ویژه در مقیاس زمانی اثر بارندگی، موقتی دانسته شده (کاسل،۱۹۸۲؛ میک و همکاران، ۱۹۸۸) و پارامترهای خاکدانه‌سازی نیز به طور یکسان تعریف نشده است. این موضوع یکی از دشواری‌های بزرگ در مرتبط نمودن مقدار تراکم با عملیات خاک‌ورزی، پس از مشاهده تغییر شرایط خاک محسوب می‌گردد.

۲-۲-٦- مدل سازی تراکم

عبور چرخ ماشین‌ها معمولا به فشرده شدن خاک طبق الگوی ارائه شده توسط رقاوان و همکاران (۱۹۷۶) در یک خاک لوم شنی منجر می‌گردد (شکل ۱۱).

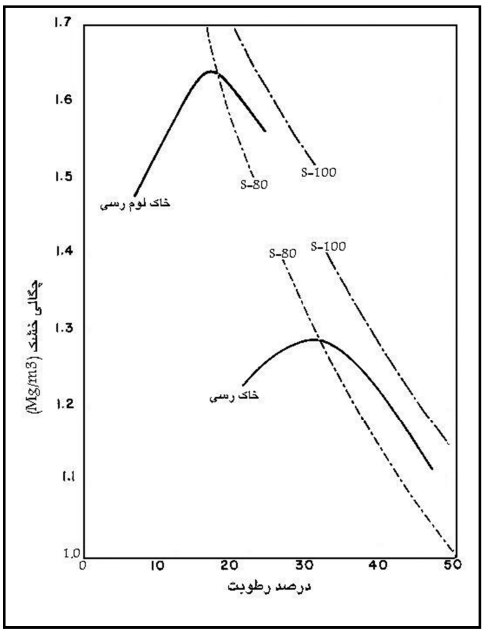


شکل ۱۱- الگوی تغییرات جرم مخصوص ظاهری خشک خاک نسبت به تعداد عبور (رقاوان و همکاران، ۱۹۷٦)

حداکثر تغییرات جرم مخصوص ظاهری در دامنه ۰/۱-۰/۵ Mg/m^3 و در عمق ۲۰-۱۵ سانتی‌متری مشاهده شده است. مقدار تغییرات جرم مخصوص ظاهری به بافت خاک، رطوبت موجود در خاک، فشار تماس (درادوات با وزن کمتر از ۱۰ تن در هر محور) یا بار محور (در ادوات سنگین‌تر از ۱۰

تن در هر محور) و تعداد عبور بستگی دارد. برای ادوات سبک‌تر، ناحیه با حداکثر تراکم در خاک سطحی ($۰-۳۰cm$) قرار دارد. ادوات سنگین با متراکم کردن خاک زیر سطحی ($۳۰-۶۰cm$) مشکل جدی ایجاد می‌کنند، زیرا عملیات اصلاحی مانند کاربرد زیرشکن در مقایسه با خاک‌ورزی معمول باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. مطالعات مربوط به اثر تردد نشان داده‌اند که در برخی سیستم‌های کشت رایج، شدت تردد به گونه ای است که ۹۰ درصد یا بیشتر از سطح مزرعه حداقل یک بار در هر فصل، در معرض عبور چرخ‌ها قرار می‌گیرد (برای مثال نگاه کنید به اریکسون و همکاران (۱۹۷۴) در گندم؛ وورهیس (۱۹۷۷) در ذرت). مطالب فوق منجر به ارائه مفهوم تردد کنترل شده[1] یا تولید ناحیه‌ای[2] گردیده است که در قسمت‌های بعد تشریح خواهد شد.

واکنش خاک نسبت به بارهای وارده، بستگی به مقدار رطوبت آن دارد. در مقدار معین انرژی اعمال شده بر سطح خاک، میانگین تغییرات *DBD* با *SMC* به شکل خمیده خطی است که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۲- منحنی تراکم پراکتور (با استفاده از مقدار رطوبت وزنی) به دست آمده از خاک لوم رسی و رسی با انرژی حاصل از ۲۵ ضربه چکش پراکتور روی هر یک از سه لایه خاک (اوهو و همکاران، ۱۹۸٦)

1- Controlled traffic
2- Zone production

مقدار حداکثر در منحنی، با آزمایش تراکم پراکتور (لمب، ۱۹۵۱) تعیین می‌گردد که بـه انـرژی اعمال شده بستگی دارد و موقعیت آن نسبت به محور افقی نمودار، عمدتاً به بافت خـاک وابسـته اسـت. آزمایش پراکتور به عنوان جایگزینی برای روش‌های معمول ارزیابی تراکم خاک، در واقع‌اندازه‌گیری غیـر مستقیم مقاومت خاک است و عمدتاً در خاک‌های همگن و برای مشخص کـردن اثـر رطوبـت و اجـزای معدنی و آلی بر تراکم خاک استفاده شده (هـورن و لبـرت، ۱۹۹۴) و در سـال‌هـای اخیـر در زمینـه‌هـای کشاورزی نیز بسیار به کار رفته است (تاجیک، ۱۳۸۷). در این آزمایش فرض مـی‌شـود کـه بـرای یـک انرژی تراکمی معین، درصد رطوبت تقریباً ثابتی وجود دارد که در آن حداکثر جرم مخصـوص خشـک یـا حداکثر تراکم به دست می‌آید. این درصد رطوبت به نام رطوبت بهینه و جرم مخصوص ظـاهری خشـک متناظر با آن به نام حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک تحت انرژی تراکمی معین نامیده می‌شود. بـه عبارت دیگر، برای یک مقدار انرژی تراکمی معین، درصد رطوبت بهینـه‌ای وجـود دارد کـه در آن، جـرم مخصوص ظاهری خشک یا تراکم خاک به حداکثر می‌رسد (رحیمـی، ۱۳۷۱). در آزمـون پراکتـور مقـدار رطوبتی که در آن حداکثر جرم مخصوص ظاهری[1] (MBD) به دست می‌آید، از جهـت اثـر منفـی آن در کشاورزی مقدار رطوبت بحرانی[2] (CWC) نامیده شده است (نانتومبو و کـامبول، ۲۰۰۶). در واقـع نقطـه MBD جایی است که تخلخل هوایی تقریبا وجود ندارد و پس از آن با افزایش رطوبت، جـرم مخصـوص کاهش می‌یابد.

مقدار MBD به دست آمده از آزمون پراکتور به عنوان بالاترین مقدار تراکم پذیری یک خـاک مشخص تعریف شده است که ارتباط معنی داری با ذرات معدنی ریز، ویژگـی‌هـای رطـوبتی در پتانسـیل ماتریک کم، و مقدار مواد آلی خاک دارد. مقدار MBD را می‌توان بهترین معیار برای توصـیف نـامطلوب ترین شرایط تخلخل خاک و نیز بهترین متمایز کننده افق‌هـای خـاک محسـوب نمـود (دیـاز- زوریتـا و کامبولو، ۲۰۰۰). تغییرات MBD و CWC بیش از آنکه متأثر از موقعیت جغرافیایی منطقه نمونه بـرداری باشد، تحت اثر بافت خاک مربوطه است. نانتومبو و کامبول (۲۰۰۶) اظهار داشته‌اند کـه بـا یـافتن رابطـه MBD و CWC با بافت خاک می‌توان خطر ایجاد تراکم در خاک‌ها را ارزیابی نمود. در این صورت، عدم مشابهت مقدار و نحوه اعمال نیرو در شرایط آزمایشگاهی با شرایط واقعی مزرعه بایـد مـورد توجـه قـرار گیرد و کاربرد تراکم نسبی توصیه شده است. برخی از محققان شیب قسمت نزولی نمودار آزمون پراکتـور

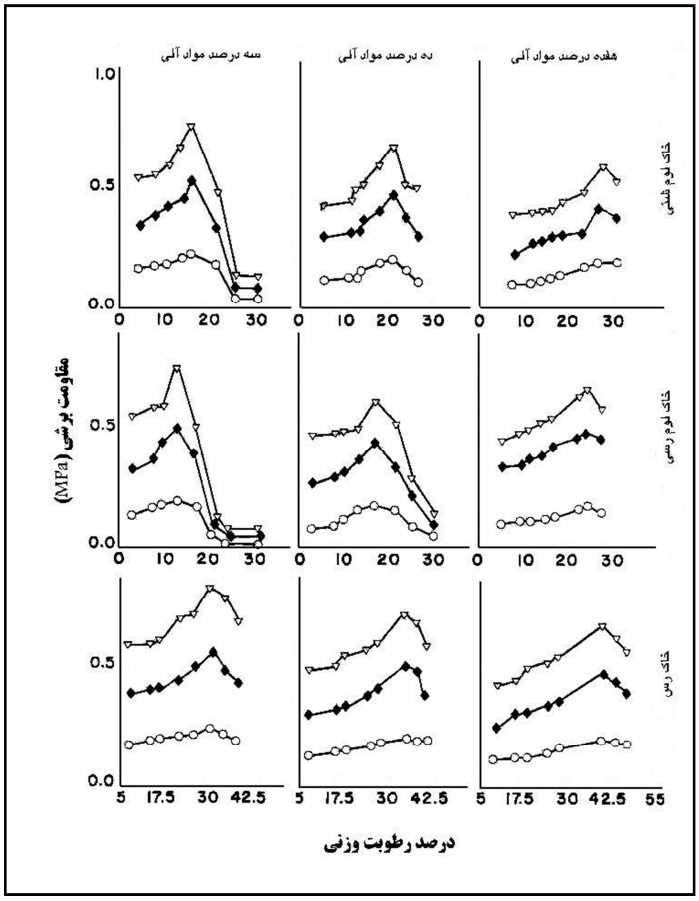
1- Maximum Bulk Density
2- Critical Water Content

را به عنوان حساسیت به تراکم[1] *(SC)* تعریف نموده‌اند، در حالی که برخی دیگر تفاوت میان *MBD* و اولین نقطه قسمت نزولی نمودار را معیار بهتری برای حساسیت به تراکم می‌دانند (کویروگا و همکاران، ۱۹۹۶).

اهمیت زراعی پارامترهای آزمون پراکتور (*MBD* و *CWC*) توسط واگنر و همکاران (۱۹۹۴) بیان شده است. آنان اظهار داشته‌اند که حداکثر خردشدن کلوخه‌ها در اثر خاک ورزی در رطوبتی معادل رطوبت بهینه حاصل از آزمون پراکتور واقع می‌گردد. نقطه *MBD* در واقع جایی است که تخلخل هوایی تقریبا وجود ندارد و پس از آن با افزایش رطوبت، جرم مخصوص کاهش می‌یابد. از داده‌های واگنر و همکاران (۱۹۹۴) از ۱۹ ایالت امریکا رابطه غیر خطی برآورد *CWC* از مقدار کربن آلی، رس و شن خاک به دست آمده است. فهم اثر مواد آلی و بافت خاک بر تراکم پذیری به فهم بهتر عوامل کنترل کننده تراکم‌پذیری یک منطقه کمک می‌کند. احتمال رسیدن به رطوبت بحرانی (*CWC*) در حین خاک‌ورزی مزرعه به اقلیم و منطقه بستگی دارد. برای ارزیابی پتانسیل خطر تراکم خاک، ترکیب موازنه آب خاک با برآورد درجه اشباع در *CWC* پیشنهاد شده است. در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک، از پارامتر حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک حاصل از آزمون پراکتور برای بیان تراکم نسبی خاک استفاده شده است (واگنر و همکاران، ۱۹۹۴). گولداسمیت و همکاران (۲۰۰۱) نیز درجه تراکم مناسب برای رشد ریشه گیاه را با محاسبه نسبت جرم مخصوص بحرانی خاک (حاصل از منحنی‌های هم جرم مخصوص در مثلث بافت خاک) به حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک (حاصل از آزمون پراکتور) ارائه نموده‌اند.

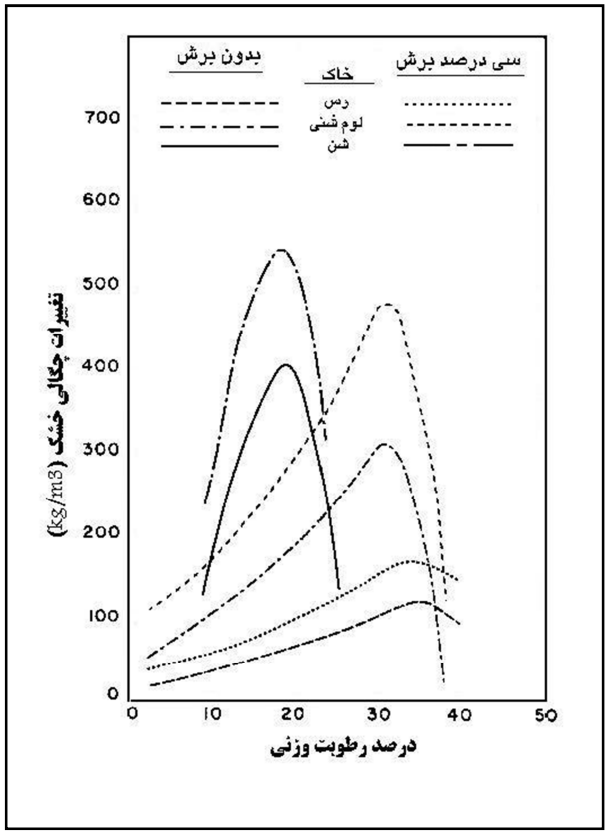
رقاوان و همکاران (۱۹۷۷*a*) مشاهده کرده‌اند که مقدار رطوبت بهینه برای حداکثر تراکم، متناسب با کاهش انرژی اعمال شده در آزمون تراکم ایستا، افزایش می‌یابد اما چنین اثری در داده‌های صحرایی آنها مشاهده نشده است. خاک‌های با بافت ریزتر، نسبت به خاک‌های درشت بافت، در مقادیر بالاتر رطوبت به حداکثر تراکم می رسند و ظرفیت نگهداری آب آنها نیز بیشتر است. اوهو و همکاران (اوهو و همکاران، ۱۹۸۶) نشان دادند که در سطوح تراکم یکسان، با افزایش مواد آلی و کاهش مقاومت برشی، حد بهینه به سمت رطوبت‌های بیشتر حرکت می‌کند (شکل ۱۳).

3- Susceptibility to Compaction



شکل ۱۳- اثر مواد آلی بر ویژگی‌های تراکمی سه خاک با بافت متفاوت (O۵ ضربه؛ ♦۱۵ ضربه؛ ∇ ۲۵ ضربه) (اوهو و همکاران، ۱۹۸٦)

در مقادیر بالاتر رطوبت بهینه (در آزمایش تراکم پراکتور) لغزش چرخ می‌تواند به همان‌اندازه وزن ادوات باعث تراکم گردد. مطالعات آزمایشگاهی رقاوان و مک کی (۱۹۷۷) نشان داده است که بیش از ۵۰ درصد از تراکم خاک سطحی می‌تواند به برش ایجاد شده توسط لغزش چرخ نسبت داده شود (شکل ۱۴).



شکل ١٤- تراکم اضافی ناشی از برش ایجاد شده توسط لغزش چرخ در سه خاک با بافت متفاوت (رقاوان و مک کیز، ١٩٧٧)

حداکثر تاثیر بر تراکم، در لغزش‌های بین ١٥ تا ٢٥ درصد مشاهده شده است که شامل مقدار لغزش معمول (٢٠ درصد) نیز می‌گردد. این اطلاعات در مطالعات صحرایی نیز تایید شده است (رقاوان و همکاران، *b* ١٩٧٧ و *b*١٩٧٨). در مقادیر بیشتر لغزش، ساختمان خاک سطحی تخریب می‌شود. شیارهای عمیق ناشی از حرکت چرخ و معابر حاشیه‌ای مزرعه نیز به علت ایجاد فرورفتگی بیشتر، در مقادیر زیاد رطوبت خاک باعث ایجاد مشکلاتی می‌گردند.

لارسون و همکاران (۱۹۹۴) اظهار داشته‌اند که تراکم‌پذیری[1] وابسته به مقدار رطوبت خاک است و لذا مدیریت آب خاک نقش مهمی در مدیریت تراکم ایفا می‌کند. قابلیت کار بر روی خاک[2] نیز به صورت محدوده‌ای از پتانسیل رطوبتی که دستکاری مکانیکی خاک با حداقل صدمه بر ساختمان آن امکانپذیر باشد، تعریف شده است. دامنه مطلوب رطوبت به نوع خاک، عملیات مورد نظر، روش عملیات و نوع ماشین بستگی دارد. دامنه رطوبتی بهینه همچنین به عنوان دامنه قابلیت تردد[3] نیز تعریف شده است که برابر قابلیت تحمل بار ناشی از تردد بدون صدمه دیدن ساختمان خاک می‌باشد که برای عملیات و خاک‌های مختلف یکسان نیست. ممکن است سطح خاک برای تهیه بستر بذر باندازه کافی خشک باشد اما در همان زمان، رطوبت خاک عمقی در حدی است که تحمل تردد را ندارد. لارسون وهمکاران (۱۹۹۴) همچنین مشاهده نموده‌اند که مقاومت خاک و خاکدانه‌ها با کاهش مقدار رطوبت از حد بالایی خمیری[4](UPL) به حد پایینی خمیری[5](LPL) به طور معنی داری افزایش یافته و سپس به تدریج و متناسب با کاهش رطوبت، کاهش یافته است. مقدار رطوبت بهینه قابلیت کار روی خاک کمتر از LPL بوده و مقدار رطوبت بهینه خاک ورزی در حدود $0.9LPL$ گزارش شده است. این مشاهدات به اهمیت مدیریت آب خاک و زمان بندی خاک ورزی تأکید دارد اما تا کنون چنین مشاهدات کلی در مورد به حداقل رساندن تراکم خاک به دست نیامده است.

در اغلب منابع علمی، نتایج متناقضی از اثر مواد آلی بر تراکم‌پذیری و مقاومت خاک گزارش شده است (سون، ۱۹۹۰). یکی از علل چنین تناقض‌هایی آن است که مواد آلی شامل ترکیبات بسیار متفاوت است که برای فهم اثر ویژه آنها طبقه بندی اجزاء با خواص و مرحله تجزیه مشابه ضرورت دارد (گوریف، ۱۹۹۴). توماس و همکاران (۱۹۹۶) همبستگی منفی میان حداکثر تراکم‌پذیری و مقدار کربن آلی خاک یافته‌اند. سون (۱۹۹۰) اظهار داشته است که افزودن مواد آلی به خاک به علت افزایش مقاومت خاک به تغییر شکل و یا افزایش الاستیسیته، باعث کاهش تراکم‌پذیری می‌شود. ژانگ و همکاران (۱۹۹۷) اظهار نموده‌اند که اثر مواد آلی در کاهش تراکم‌پذیری به بافت خاک و ترکیب شیمیایی مواد آلی بستگی دارد. واگنر و همکاران (۱۹۹۴) نیز معادله غیر خطی برآورد رطوبت بهینه از مقدار کربن آلی، رس و شن خاک را ارائه نموده‌اند. نتایج آنان نشان داده است که تشریح اثرات کمی و کیفی مواد آلی و بافت

1- Compactability
2- Workability
3- Trafficability
4- Upper plastic limit
5- Lower plastic limit

خاک بر تراکم‌پذیری می‌تواند به فهم دقیق تر عوامل کنترل کننده تـراکم‌پـذیری در هـر منطقـه منجـر گردد. آراگون و همکاران (۲۰۰۰) اظهار داشته‌اند که اثرات مواد آلی بر تراکم‌پذیری خاک از منطقه‌ای بـه منطقه دیگرمتفاوت است که بستگی به متغیرهای دیگری بجز مواد آلی دارد. همچنین ترکیب شـیمیایی مواد آلی می‌تواند بر نتایج آزمایش پراکتور مؤثر باشد. نتایج آنها نشان داده اسـت کـه همبسـتگی منفـی میان *MBD* با مقدار کربن آلی و *CWC* وجود دارد. همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیـری شـده و بـرآورد *MBD* با در نظر گرفتن مقدار سیلت علاوه بر مواد آلی به طور معنی‌داری افزایش یافته است. آراگـون و همکاران (۲۰۰۰) نتیجه‌گیری نموده‌اند که دقت برآوردهـای *MBD* و *CWC* از روی مقـدار مـواد آلـی و پارامترهای بافت خاک به‌اندازه‌ای بالاست که آنها را برای پیش‌بینی پارامترها مناسب می‌سازد.

کوشش‌های اولیه برای مدل سازی تغییرات جرم مخصوص ظاهری (یا تخلخل) خـاک نسـبت به بار وارده و مقدار رطوبت بر مبنای متراکم کردن خاک‌های دست خورده در شرایط آزمایشـگاهی بـوده است. معادله سوهن (۱۹۵۸) برای به دست آوردن تخلخل یـک خـاک دسـت خـورده بـه صـورت تـابع لگاریتمی از فشار استاتیک اعمال شده در رطوبت معـین، در شـرایط صـحرایی توسـط امیـر و همکـاران (۱۹۷۶) اصلاح شده که در آن تخلخل به عنوان تابعی از رطوبت خاک، فشار اعمال شـده و فشـار بـاقی مانده[1]، نشان داده شده است. آنها برای تعیین بهترین زمان تردد ماشین‌هـا کـه خطـر تـراکم را کـاهش می‌دهد، مدل تراکم را با معادله زهکشی تلفیق نمودند. لذا تغییرات تخلخل به صورت معادله زیر در آمـده است:

$$dPo=B \ln (P_2/P_1) + S * C \ln (t_2/t_1) \qquad (۲-۲)$$

که زیر نویس‌های ۱ و ۲ نشانگر مقدار تغییر، پیش و پس از تراکم هستند. B و C ویژگی‌هـای تراکم خاک‌اند و S ثابت ویژه خاک است که اثر زمان بر کاهش رطوبت خـاک توسـط زهکشـی را بیـان می‌کند. P_1 فشار باقی مانده یا فشار مورد نیاز بـرای رسـاندن خـاک کـاملاً سسـت (بکـر) بـه تخلخـل مزرعه‌ای پیش از تراکم و P_2 فشار اعمال شده است. امیر و همکاران (۱۹۷۶) و گوپتا و الماراس (۱۹۸۷) کاربردهای این معادله را با توجه به زمان عملیات و مقدار کاهش تراکم ناشی از بهبود زهکشی و کاهش فشار سطحی، تشریح نموده‌اند.

1- Residual

جنبه‌های عملی مفهوم فشار اعمال شده نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در آزمایش‌های صحرایی تراکم، رقاوان و همکاران (۱۹۷۶*b*، ۱۹۷۷*a*) دریافتند که با روش‌های رگرسیون می‌توان به خوبی جرم مخصوص ظاهری خشک در عمق میانگین خاک سطحی را به مقادیراندازه‌گیری شده آن مرتبط نمود، به گونه‌ای که لگاریتم طبیعی فشار اعمال شده تابعی از مقدار رطوبت خاک در نظر گرفته شود. در این حالت، فشار اعمال شده برابر حاصلضرب فشار تماسی و تعداد عبور *(nP)* است. معادلات مربوط به *SMC* قبل و بعد از رطوبت بهینه پراکتور باید بر داده‌ها برازش مطلوب داشته و ضریب مربوط به متغیر مستقل آنها ثابت و منطقی[1] باشد. معادلات رگرسیون که بر مبنای مطالعات صحرایی بوده و شامل توابع لگاریتمی *nP* و *SMC* و لغزش می‌گردند (رقاوان و مک کی، ۱۹۷۸) برآوردهای مناسبی را نشان داده‌اند، اگر چه این معادلات نسبت به جهت روابط با *nP* و عمق خاک و با توجه به مشاهدات عینی الگوی تراکم و دامنه رطوبتی موجود در طبیعت، منطقی به نظر نمی‌رسند. پس از آن، رقاوان و اهو (۱۹۸۵) نشان دادند که می‌توان فشار تماسی را به انرژی ناشی از ضربات پراکتور مرتبط نمود و این ارتباط، مستقل از بافت خاک می‌باشد. در این صورت، ویژگی‌های تراکم یک خاک معین در شرایط آزمایشگاهی را می‌توان در شرایط صحرایی نیز به کار برد. یک جنبه عملی در مطالعه نیروهای تراکمی اعمال شده که تا کنون در مقالات نیامده است، وابستگی اعمال بار معین (مثلاً بار ناشی از پخش کود یا برداشت محصول) به زمان می‌باشد. بار وارده می‌تواند به وضوح در قسمتی از مزرعه با قسمت دیگر متفاوت باشد. در هر حال، با اعمال برخی برنامه‌ریزی‌ها، تراکم بیش از حد در برخی قسمت‌های مزرعه، به ویژه در محل دور زدن ماشین‌ها، قابل اجتناب خواهد بود.

گوپتا و لارسون (۱۹۸۲) مدلی برای تراکم و خرد شدن خاک ارائه کرده‌اند که قدمی در جهت حل مشکل برخی عملیات زنجیره ای متراکم کننده و خرد کننده خاک محسوب می‌گردد. با فرض وجود رابطه میان جرم مخصوص ظاهری در حالت تراکم و توزیع اندازه خاکدانه‌ها، آنها اظهار داشتند که انتخاب ادوات خاک‌ورزی مناسب که توزیع‌اندازه خاکدانه و لذا جرم مخصوص ظاهری مطلوب را ایجاد کند، امکان‌پذیر است. اگر چه نتایج بخش مربوط به تراکم مدل در آزمون‌های مزرعه‌ای رضایت‌بخش بوده (گوپتا و همکاران، ۱۹۸۵) اما تا کنون تخمین‌های معقولی از مدل ترکیبی که بتواند شرایط پس از عملیات خاک‌ورزی را نشان دهد، ارائه نشده است. موفقیت چنین کوشش‌هایی به صحت روابط میان

1- Persistent

جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها وابسته است که آن نیز احتمالاً بـر حسـب نـوع خـاک، بافت و شرایط اولیه متغیر خواهد بود.

کاهش طبیعی تراکم خاک در حین یخ زدن – ذوب، انبساط – انقباض، و ایجاد ترک ناشـی از فرایند خشک شدن از جمله راه‌های بهبود ساختمان خاک متراکم شده محسوب می‌گردد امـا وارد کـردن هر کدام از آنها در یک مدل مناسب اگر غیر ممکن نباشد، بسیار دشوار است. منابع علمی موجـود نشـان می‌دهند که طول زمان بهبود ساختمان به اقلیم، نوع خاک، مقدار رس، مقدار مـواد آلـی و درجـه تـراکم بستگی دارد. زمان بهبود ساختمان خاک بسیار متراکم در جاده‌های صحرایی موجاو، بـیش از صـد سـال برآورد شده است (وب و همکاران، ۱۹۸۶). گامدا و همکاران (۱۹۸۷) اظهار داشته‌انـد کـه در یـک خـاک رسی و در اقلیم معتدل، کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش مقدار محصول حتی پـس از یـک بـار عبور ادوات بسیار سنگین ممکن است سه سال طول بکشد. باید توجه داشت که مقیاس زمـانی افـزایش محصول مستقیماً به بهبود ساختمان خاک ارتباط ندارد. هاکانسون (۱۹۸۲) با وجود مقادیر بـالای *DBD* و *PR*، افزایش محصول در طی زمان را مشاهده نموده است. وی این افزایش را به توسعه شبکه ترک‌هـا و مجاری حاصل از حرکت کرم‌های خاکی که منجر به بهبود نفوذپذیری و فراوانی ریشـه‌هـا مـی‌گـردد، نسبت داده است. دکستر (۱۹۸۶) مطالعاتی را در شرایط آزمایشگاهی ترتیب داده است تا شواهدی دال بر اهمیت نقش موجودات زنده خاک در اصلاح خاک‌های متراکم و افزایش حجم ریشه‌ها به دسـت آورده و سپس ابعاد دیگر موثر بر روند اصلاح طبیعی خاک‌های متـراکم را بررسـی نمایـد. مطالعـات مربـوط بـه سیستم‌های بدون شخم بیانگر اثر تجمع مواد آلی و فعالیت ریشه بر اصلاح سـاختمان خـاک مـی‌باشـند (لعل و همکاران، ۱۹۷۹).

رفع محدودیت‌های علم مکانیک کلاسیک و کاستی‌های معادلات تجربی (هیلل، ۱۹۸۷) منجر به ارائه نظریه‌های کامل‌تری شده است که با آن می‌توان طبیعت لایـه‌ای خـاک را نیـز در نظـر گرفـت. پالوک و همکاران (۱۹۸۶) روش اجزاء محدود[1] را برای ارائه مدل تراکم در شـرایط تـردد مکـرر بـه کـار برده‌اند. هتی آراشی و اکالاهان (۱۹۸۰) نیز نظریه مکانیکی پتانسیل حالت بحرانی[2] را به عنوان جایگزین نظریه کلاسیک تشریح نموده‌اند. با وجود این، معادله‌های به دست آمده از روش‌های تجربی یا مکانیـک کلاسیک فهم استواری از پدیده تراکم خاک ارائه داده و راهنمایی‌های مفیدی برای کاهش خطـر تـراکم شدید (بوسیله تنظیم زمان عملیات کشاورزی و انتخاب ماشین‌های مناسب) فراهم می‌نمایند.

1- Finite element
2- Potential critical state

۲-۲-۷- خلاصه

در این قسمت، طرح مفهومی روابط ماشین – خاک و خاک – گیاه بر مبنای برخی تحقیقات موجود ارائه گردید که درقسمت چارچوب تصمیم‌گیری با تفصیل بیشتر بیان خواهد شد. عوامل اصلی موثر در واکنش خاک به تردد ماشین‌ها شناخته شده‌اند. فرایندهای شناخته شده خاک از تغییرات محیطی ناشی از تراکم و خاک‌ورزی از راه‌های گوناگون تاثیر می پذیرند لیکن از اثر عوامل شیمیایی و زیستی در مقالات علمی غفلت شده که احتمالاً علت آن فقدان روش‌های نمونه برداری مناسب و محدود کردن متغیرهای مدل بوده است. یک نکته مهم آن است که اگر چه هر یک از این دیدگاه‌ها را می‌توان بسیار پیچیده بیان نمود اما امکان ارائه مدل‌های واقعی از چنین سیستم پویایی در آینده نزدیک مورد تردید است. خاک‌ها در مکان و زمان بسیار متغیرند. واکنش گیاه به شرایط خاک هم به اقلیم وابسته است که خود فرایندی احتمالی بوده و به تاثیرات متقابل زمانی میان آب وهوا، رشد گیاه و پارامترهای خاک در طول نیمرخ نیز بستگی دارد. همچنین، شواهدی وجود دارد که گیاهان به تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک به همان‌اندازه موازنه عناصر غذایی ناشی از تغییرات فیزیکی محیط واکنش نشان می‌دهند. بنابراین، مطالعات جامع برای تعیین حساسیت گیاهان به اثر همزمان عوامل متعدد، ضرورتی آشکار است.

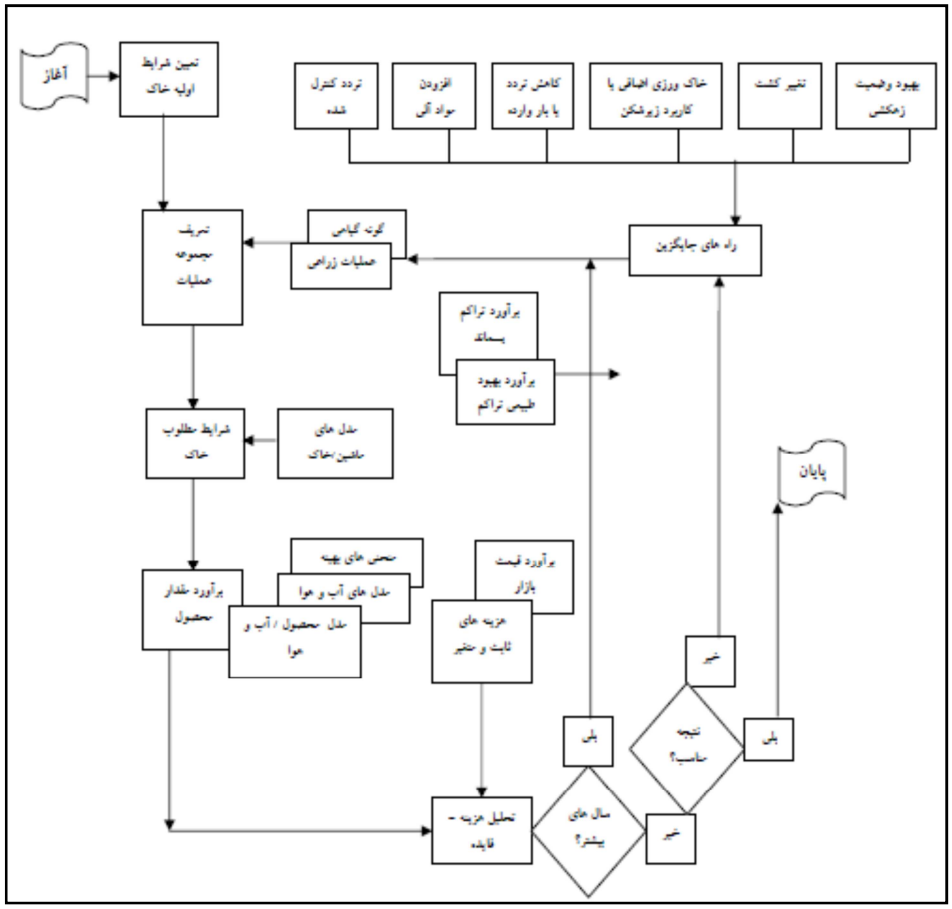
۲-۳- به‌کارگیری یک چارچوب تصمیم‌گیری

۲-۳-۱- نکته‌های بنیادین

بر مبنای نظریه منحنی بهینه، مدیریت خاک‌ها به منظور افزایش تولید توام با حفظ شرایط فیزیکی مطلوب امکان پذیر است، مشروط بر آنکه اقلیم و عوامل توپوگرافی نیز به حساب آیند. تاکید مجدد بر این نکته لازم است که تراکم لزوماً عامل محدود کننده ای نیست و در همه موقعیت‌ها زیان آور نمی‌باشد. در مناطق خشک، فواید کاهش تراکم و سست کردن خاک مهم‌تر از تلفات تبخیری رطوبت ناشی از شخم خاک سطحی نیست. بدون تردید، در آینده برای تهیه مدل‌های خاک و محصول – اقلیم به عملیات کنترل تراکم توجه بیشتری خواهد شد. گوپتا و آلماراس (۱۹۸۷) کاربرد یک پایگاه داده‌های اقلیمی را درتخمین مقدار رطوبت خاک برای توصیف مقادیر بحرانی بار ناشی از تردد ماشین‌های کشاورزی در شرایط و زمان معلوم تشریح نموده‌اند. وپراسکاس (۱۹۸۸) روشی را بر اساس توزیع بارندگی برای تعیین احتمال افزایش محصول تنباکو در اثر شخم عمیق ارائه نموده است.

با فرض شرایط معمول در تولید مکانیزه محصول، یک کشاورز با محدودیت‌های اساسی مانند نوع خاک، طول فصل رشد و اقلیم و همچنین محدودیت‌های اقتصادی روبروست که تعیین کننده نوع محصولی هستند که تولید آن می‌تواند موفقیت‌آمیز باشد. محدودیت اقتصادی به نوع فعالیت، زمینه‌های منطقه ای و سطح مداخله دولتی بستگی دارد. با پذیرش این نکته که به حداکثر رساندن سود لزوماً هدف اصلی تولید محصولات زراعی نیست و حفظ یا بهبود شرایط فیزیکی خاک نیز واجد اهمیت می‌باشد، ارایه چارچوبی برای تصمیم‌گیری کشاورز یا مروج کشاورزی ضرورت می‌یابد. طرحی از نکات اصلی مورد نظر، در شکل ۱۵ آمده است.

برای یک فعالیت کشاورزی معین (با فرض وجود حد قابل قبولی از سطح حاصل‌خیزی و کنترل آفات و بیماری‌ها) ابتدا باید شرایط اولیه خاک تعیین گردد زیرا واکنش خاک به تردد وابسته به آن است. سپس، باید اثرات یک سری از عملیات بر شرایط خاک در طول فصل رشد برآورد گردد که لازمه آن، فهم رفتار خاک تحت تنش مکانیکی می‌باشد. همچنین، تراکم باقی‌مانده و امکان اصلاح آن برای محصولات بعدی باید برآورد گردد. دامنه‌ای از مقدار محصول احتمالی را می‌توان از منحنی‌های بهینه (مقدار محصول در برابر تراکم‌پذیری) و احتمال وقوع شرایط آب و هوایی مختلف برآورد نمود. تحلیل هزینه – فایده نیز می‌تواند برای فصل مورد نظر یا چند سال متوالی انجام گیرد. مدل‌های محصول – اقلیم آشکارا نقش مهمی در راهبردهای مدیریت خاک ایفا می‌کنند. جزئیات چنین مدل‌هایی در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱۵- چارچوب راهبرد مدیریت پایدار ساختمان خاک با در نظر گرفتن محدودیت‌های منطقه‌ای و اقتصادی

شرایط اولیه خاک ممکن است به گونه ای باشد که عملیات اصلاحی به طور غیرمستقیم ضرورت یابد. در این حالت، لازم است راه‌حل‌های جایگزین در نظر گرفته شود. شرایط پیش‌بینی شده خاک ممکن است احتمال کاهش محصول یا لزوم عملیات اصلاحی اساسی تا پیش از فرا رسیدن فصل بعدی را شامل گردد و لذا باز هم گزینه‌های ممکن دیگری باید در نظر گرفته شود. تخمین مقدار محصول یا بازده اقتصادی[1]، بر مبنای یک سال یا چند سال، معمولا عامل تعیین‌کننده‌ای محسوب می‌گردد.

1- Economic return

بر مبنای نتایج برآوردها، روش‌های جایگزین متعددی را می‌توان در نظر گرفت. اگر پیش‌بینی شود که عملیات معمول منجر به تراکم شدید می‌گردد، توصیه‌هایی مانند نصب زهکش‌های کافی یا منتظر ماندن برای شرایط خشک‌تر پیش از حرکت ادوات چرخ‌دار، کاهش وزن ادوات، کاهش دفعات تردد، یا افزودن مواد آلی (به طور مستقیم یا با اعمال تناوبهای منظم و مناسب) قابل ارائه است. خاک‌های متراکم با خاک‌ورزی یا شخم عمیق، کاشت گیاهان پوششی، یا کاربرد مواد آلی و یا آیش گذاری قابل اصلاح‌اند. اثرات یخ زدن – ذوب با غرقاب کردن زمین در اوایل زمستان قابل افزایش است. کاهش تردد یا محدود کردن آن نیز گزینه‌هایی هستند که در کاربرد ماشین‌های سنتی و برای توسعه ماشین‌های عریض و دارای قابلیت حرکت جانبی تا حدی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (تیلور، ۱۹۸۵). اگر شرایط خشک‌تری پیش‌بینی شود، منحنی‌های بهینه ممکن است افزایش مفیدی در تراکم‌پذیری نشان دهند. راه حل آخر ممکن است تغییر کشت باشد.

۲-۳-۲- اجرا

اجرای یک چارچوب تصمیم‌گیری مستلزم شناخت شرایط اولیه می‌باشد که در منابع علمی کمتر به آن توجه شده است. چند مسئله وجود دارد که باید به آنها پرداخته شود. اول آن که تعیین کنیم آیا بررسی مشکل تراکم، بدون توجه به شدت آن اولویت دارد یا خیر. برای مثال، برخی مزرعه‌ها چنان دچار مشکلات زهکشی ضعیف، آلودگی به آفات و بیماریها یا مشکل سمیت هستند که مشکل تراکم در آنها اولویت خود را از دست داده است. تراکم ممکن است تنها در عمق معینی از خاک – مانند تشکیل کفه سخت[1] – ایجاد مشکل کند. همچنین، تراکم ممکن است به خاک سطحی محدود گردد یا به اعماق خاک نیز گسترش یابد. در برخی موارد، شرایط عمومی خاک باید با نمونه‌برداری تعیین شود.

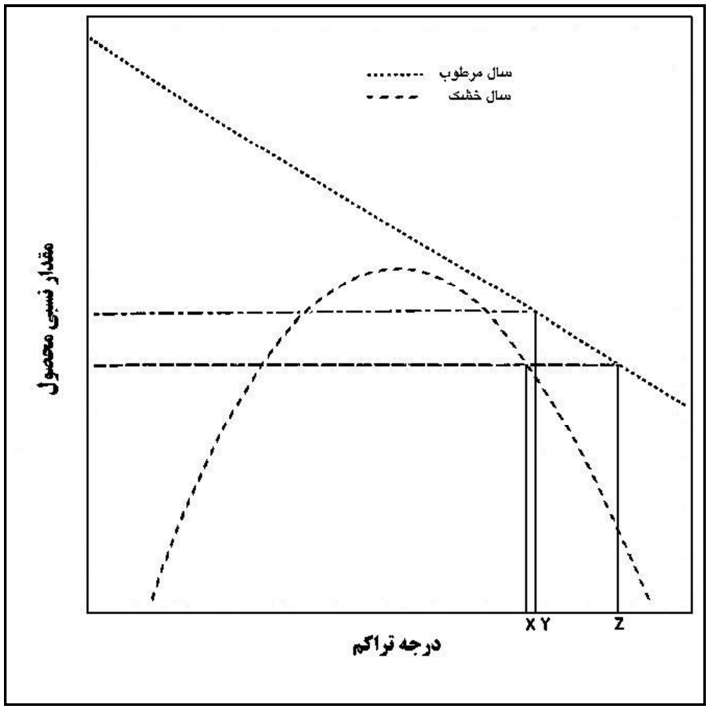
مسئله دوم، تعیین پارامترهای مربوط به تراکم است. با توجه به معیار تراکم‌پذیری، جرم مخصوص ظاهری خشک و مقاومت به فروروی معمولاً شاخص‌های خوبی محسوب می‌گردند. به منظور پیش‌بینی تراکم، رطوبت خاک، مواد آلی ومقدار بار وارده باید معلوم باشند. مسئله سوم، ارائه طرح و روش نمونه‌برداری است که سریع بوده و به آسانی قابل اجرا و تفسیر باشد که احتمالا نیازمند وجود کارشناسان و کاردان‌های کشاورزی و ادوات ویژه در منطقه می‌باشد. با فرض آنکه مقدار رطوبت، جرم مخصوص و مقاومت به فروروی، صفات مورد نظر خاک بوده و همزمان قابل اندازه‌گیری باشند و همچنین بتوان به

1- Hard pan

سرعت داده‌های مربوطه را تحلیل نمود؛ مشکل تغییر پذیری داده‌ها همچنان باقی است. کاسل (۱۹۸۲) معادله‌ای را ارائه کرده است که روابط میان اندازه نمونه و تغییرپذیری ویژگی‌های آن را نشان می‌دهد. مطالعات اولیه برای تعیین رابطه میان تغییرپذیری داده‌ها و فواصل زمانی نمونه‌برداری نیز باید انجام شوند، زیرا فاصله زمانی مورد استفاده باید متناسب با محدودیت زمانی تکنسین‌ها و دقت مورد نیاز زارعین باشد. درجه انحناء در اطراف نقطه حداکثر در منحنی پراکتور را نیز می‌توان برای تعیین دامنه احتمال برآورد رطوبت به کار برد. در صورتی که مقدار رطوبت در تعداد عبور معمولی، به نزدیکی حد بهینه میل کند، قله تیزتر منحنی به مفهوم بحرانی‌تر[1] بودن دقت برآورد می‌باشد.

منحنی‌های بهینه را می‌توان به عنوان راهنمایی درتعیین حدود بحرانی تراکم خاک بر حسب مقدار محصول و در شرایط اقلیمی مربوطه به کار برد. در شکل ۱۶ منحنی‌های محصول- تراکم برای سال‌های خشک و مرطوب نشان داده شده است. دو خط شکسته، مربوط به منحنی بازگشت سرمایه یا عملکرد اقتصادی هستند که یکی در حالت بدون آبیاری و دیگری همراه با آبیاری می‌باشد. حداکثر درجه متراکم شدن برای موقعیت‌های مختلف با عمود کردن خطی بر محل تقاطع منحنی‌های عملکرد اقتصادی و منحنی محصول- تراکم به دست می‌آید. در این جا فرض شده است که منحنی محصول- تراکم در حالت آبیاری، مشابه سال مرطوب است.

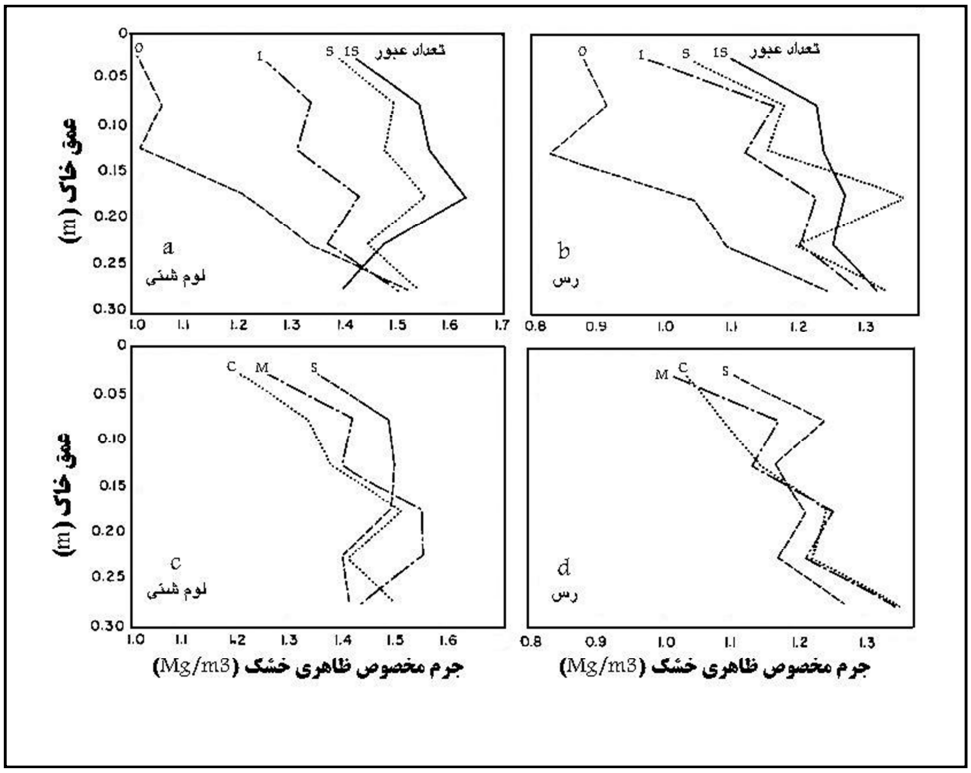
1- Critical



شکل ١٦- مقدار تراکم بحرانی که از منحنی‌های بهینه به دست می‌آید و تابع تعریف اقتصادی سطوح بحرانی تراکم می‌باشد (_ _ _، آستانه اقتصادی محصول؛ - - -، آستانه اقتصادی بالاتر به علت هزینه‌های مربوط به سیستم آبیاری؛ *X*، سطح بحرانی تراکم *(CCL)* برای سال خشک و بدون آبیاری؛ *CCL, Y* برای سال خشک و با وجود سیستم آبیاری؛ *CCL, Z* برای سال مرطوب)

اهمیت مدل‌های برآورد تراکم ناشی از خاک‌ورزی نیز کاملاً روشن است. منحنی‌های بهینه که مقدار محصول را در مقابل تراکم نشان می‌دهند، می‌توانند با کاربرد مدل‌های مناسب به صورتی ارائه گردند که مقدار محصول به عنوان تابعی از برخی عملیات (که در سطح مزرعه به راحتی قابل تفسیراند) نشان داده شود. اگر چه مسایل نظری اساسی حل نشده‌ای وجود دارند، اما حدود اطمینان ویژگی‌هایی که از برخی عملیات ناشی می‌شوند را می‌توان ابتدا به‌طور آزمایشی برای خاک‌های نمونه در مناطق مشخص، تعیین نمود. جرم مخصوص ظاهری اولیه خاک و نیمرخ‌های مربوط به درجات مختلف تراکم برای دو خاک لوم شنی و رسی در شکل ١٧ *(a,b)* نشان داده شده است. اثرات سست‌کننده

(ضد تراکمی) انواع ادوات خاک‌ورزی در قطعات آزمایشی با حداکثر تراکم در شکل ۱۷ *(d,c)* نشـان داده شده است.



شکل۱۷- نیمرخ میانگین جرم مخصوص ظاهری برای قطعات با خاک لوم شنی و رسی در فشار تماس ٦٢*KPa* *(a.b)* قطعاتی که در معرض ۱۵ بار عبور با فشار تماس ٦٢*KPa* قرار گرفته *(c,d)* و سپس با گاوآهن قلمی، *C*؛ گاوآهن برگردان‌دار، *M*؛ و زیرشکن، *S*؛ سست شده‌اند

مقدار کاهش تراکم[1] و تراکم پسماند را می‌توان با تعداد تکـرار کـافی و در دامنـه‌ای از شـرایط اولیه به صورت آماری بیان نمود. در آزمایش‌های شخم عمیق، برنیه و همکاران (۱۹۸۹) نشان داده‌اند که مقدار کاهش تراکم با دو مرتبه عبور زیرشکن، بیش از یک بار عبور بوده است. مطالعـات بعـدی ممکـن

1- Loosening

است شامل ترکیبی از اثر ادوات خاک‌ورزی و سطوح اولیه تراکم خاک بوده و تصویر بهتری از چگـونگی نگهداری ساختمان فیزیکی خاک در دامنه‌ای مناسب ارائه دهند.

۲-۳-۳- نکته‌های اقتصادی

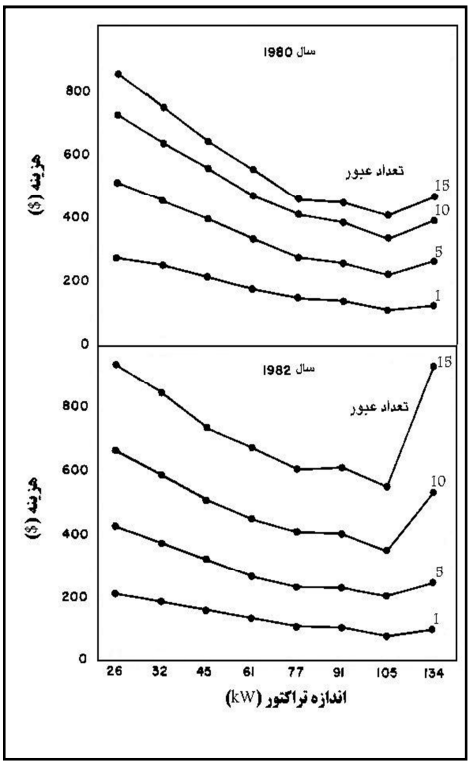
از دیدگاه زارعین معمولی که لزوماً باید متکی به خود باشند، هر فرایند تصمیم‌گیری مربوط بـه کیفیت خاک، همان‌قدر که متاثر از محدودیت‌های طبیعی مربوط به نوع خاک، توپوگرافی و اقلـیم اسـت، به جنبه‌های اقتصادی نیز محدود می‌گردد. بنابراین، یکی از جنبه‌های پیش‌روی عملیات حفاظـت خـاک (شامل تناوب‌های زراعی‌ای که مواد آلی، حاصلخیزی و ساختمان خاک را بهبود مـی‌بخشـند) عمـدتا بـه میل تولیدکننده برای پذیرش زیان‌های احتمالی کوتاه مدت به منظور کسب سود از تولید بالقوه پایـدار در بلند مدت بستگی دارد. این زیان‌های احتمالی ممکن است در سطح ملی از طریق برنامـه‌هـای تشـویقی پوشش داده شود.

یک دیدگاه آرمانی نیز آن است که گزینه‌ها در واقع مستقل از هزینه‌ها باشـند، ماننـد سیسـتم تولیدی که تنها رفع نیاز جمعیتی خاص مورد نظر آن است. در چنین سیستمی، به حداکثر رسـاندن تولیـد می‌تواند در شرایط کمبود عرضه مورد نظر باشد، در صورتی‌که تثبیـت مقـدار محصـول ممکـن اسـت در شرایط رکود، هدف تولید قرار گیرد و لذا آستانه تولیـد بـا محـدودیت‌هـایی مواجـه خواهـد شـد. مطالـب فوق‌الذکر به منظور تاکید بر امکان تغییر دیدگاه‌های عام که ممکن است تهدید کننده باشند، ارائه گردیده است که یکی از آنها تلقی کشاورزی بـه عنـوان فـراهم کننـده انـرژی خـام مـورد نیـاز بـرای پیگیـری فعالیت‌های دیگر است. چنین برداشتی می‌تواند نتیجه تمایل به زراعت در سطح وسیع و خودکار کردن، و متعاقب آن، رواج سازماندهی مجدد کشاورزی محسوب گردد.

در اینجا، ملاحظات اقتصادی نیازمند توجه بیشتر هستند. روابط میان مقـدار محصـول، قیمـت بازار، تراکم ناشی از تردد ماشین‌ها، و هزینه‌ها اخیراً برای سه محصول مهم در منطقه کبک بررسی شـده است. نخود (گونجال و رقاوان، ۱۹۸۶)، ذرت علوفـه‌ای و ذرت دانـه‌ای (گونجـال و همکـاران، ۱۹۸۷) از محصولات مورد بررسی بوده‌اند. مطالعات مورد نظر بر مبنای داده‌های حاصل از آزمایش‌های تـراکم کـه در آن، تمام قطعات آزمایشی متراکم بوده، قرار داشته‌اند. داده‌های مربوط به مقـدار محصـول سـال‌هـای مختلف به صورت تابعی از nP (تعداد عبور) نشان داده شده‌اند. مقدار کاهش محصول در مزرعه (تفاضـل بین مقدار محصول در قطعات متراکم و غیر متراکم) برای اندازه‌های متفاوت تراکتور، با محاسبه درصـد

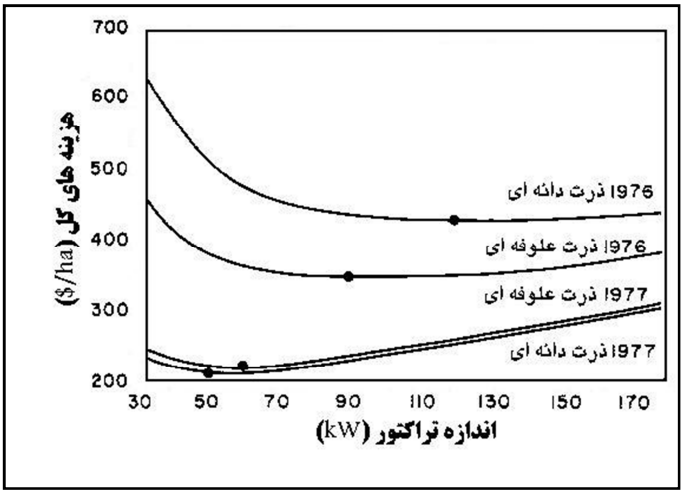
سطح تراکم[1] *(CAP)* به دست می‌آید. مقدار*CAP* برابر با نسبتی از سطح تحت بـار چـرخ‌هـای عقـب و سطح تحت یک عملیات استاندارد در یک عبور، می‌باشد. این نسبت با افـزایش انـدازه تراکتـور، کـاهش می‌یابد. بنابراین، تحلیل اقتصادی شامل برآورد مقدار کاهش محصول ناشی از تراکم (در شرایط اقلیمی و هزینه ماشین‌های متفاوت) می‌گردد.

نمودار کل هزینه‌ها در ایکر برای محصول نخود به عنوان تابعی از اندازه تراکتور و تعداد عبـور در شکل ۱۸ ارائه شده است. داده‌های مشـابهی نیـز بـرای ذرت علوفـه‌ای و ذرت دانـه‌ای در شـکل ۱۹ مشاهده می‌گردد.



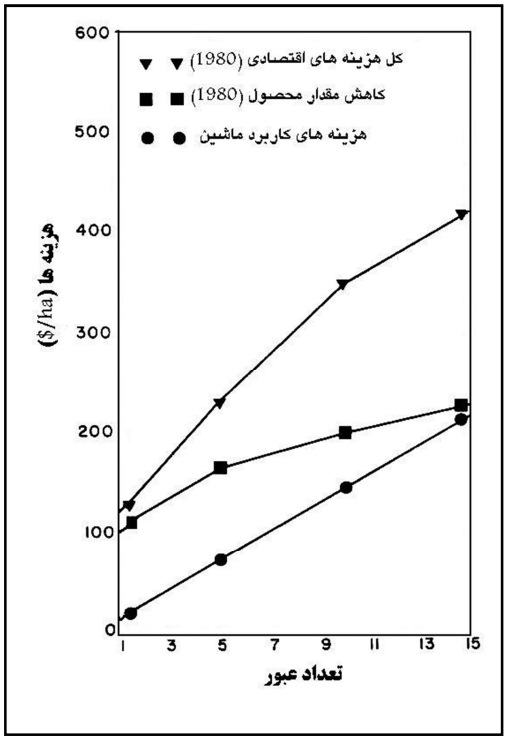
شکل ۱۸- کل هزینه‌ها در ایکر برای تولید نخود در ایالت کبک (گونجال و رقاوان، ۱۹۸٦)

1- Compaction Area Percentage



شکل ۱۹- کل هزینه‌ها در هکتار برای تولید ذرت علوفه‌ای و ذرت دانه‌ای در یک سال مرطوب (۱۹۷٦) و یک سال خشک (۱۹۷۷) به صورت تابعی از اندازه تراکتور (گونجال و همکاران، ۱۹۸۷)

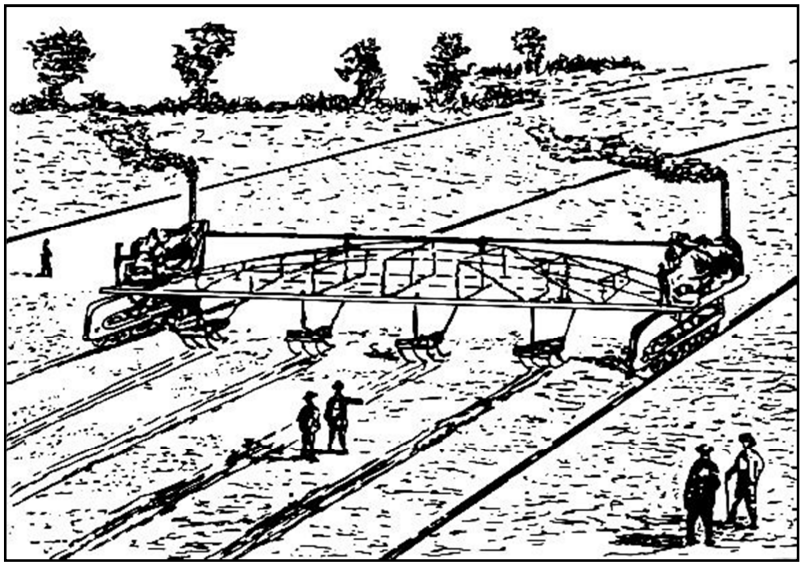
نتایج مربوطه نشان داده‌اند که اندازه مطلوب تراکتور به نوع محصول و شرایط آب و هوایی بستگی دارد و با در نظر گرفتن شدت تردد (درصد سطح تحت پوشش) تراکتورهای کوچک لزوماً بهتر نیستند. با کاهش تعداد عبور، صرفه‌جویی در هزینه‌ها قابل ملاحظه بوده است (شکل ۲۰). آنچه در هر دو این مطالعات مورد غفلت قرار گرفته است اثرات تراکم باقی‌مانده ناشی از کاربرد ارزان ترین‌اندازه تراکتور می‌باشد. اما در عین حال، مطالعاتی در جهت کاربرد فرایند برنامه‌ریزی خطی در مطالعات اقتصادی تراکم (مکاتبه شخصی با *G. Lovoie*) بر یک مبنای چند ساله، تک کشتی و تناوبی انجام شده است که الزاماً اثرات باقی مانده و اثرهای اصلاح کننده کاربرد مستقیم مواد آلی (اوهو و همکاران، ۱۹۸۵) یا برقراری تناوب‌های زراعی ویژه را نیز شامل می‌گردد (گونجال و همکاران، ۱۹۸۷).



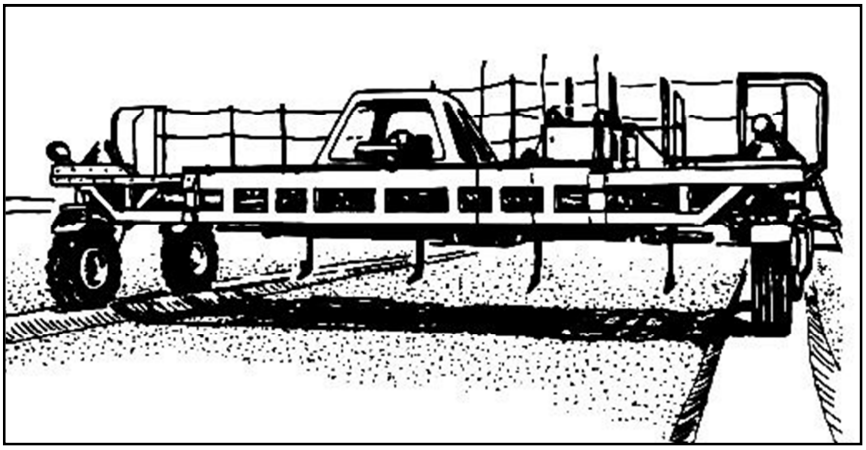
شکل ۲۰- هزینه‌های اقتصادی کل برای تولید ذرت بعنوان تابعی از تعداد عبور دراندازه بهینه تراکتور (گونجال و رقاوان، ۱۹۸٦)

یک روش جایگزین که در حال حاضر بیشتر به آن توجه می‌شود، تردد کنترل شده است. نتیجه ضمنی این روش آن است که درصد کوچکی از کل مساحت مزرعه درمعرض تردد ماشین‌ها قرار گرفته و در عین صرفه‌جویی انرژی در فرایند کشش، باقی مانده سطح مزرعه نیز از خطر تراکم مصون می‌ماند. چنین روشی را شاید بتوان احیای سیستم راهنمای هالکت[1] دانست (شکل ۲۱) که در زمان ارائه در سال ۱۸۵۸ بسیار گران قیمت محسوب می شد. نوع تکمیل شده سیستم هالکت در شکل ۲۲ دیده می‌شود که ماشینی عریض با واحد نیروی ویژه و قابلیت حرکت جانبی است.

1- Halkett`s guideway system



شکل ۲۱- تردد کنترل شده با استفاده از دو موتور بخار در مسیر مشخص که توسط هالکت در سال ۱۸۵۸ به تصویر کشیده شده است (پارتریج، ۱۹۷۳، طراحی از تینکر)



شکل۲۲- نسخه جدید ماشین عریض مورد استفاده در تحقیقات مربوط به تردد کنترل شده در وزارت کشاورزی آمریکا (تیلور، ۱۹۸۵، طراحی از تینکر)

امکان کاربرد ماشین‌های معمولی در چنین زمینه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض آنکه تردد معمولی ماشین‌های کشاورزی همراه با ۱۵ درصد کاهش در مقدار محصول بالقوه باشد، در حالت تردد کنترل شده که فقط ۱۰ درصد سطح مزرعه در معرض تراکم است، حتی اگر هیچ گیاهی در خطوط تردد نروید، مقدار کل کاهش محصول تنها ۱۰ درصد خواهد بود. اگر کاهش محصول در خطوط تردد، ۵۰ درصد و در بقیه قسمت‌های زمین برابر صفر در نظر گرفته شود، مقدار کل کاهش محصول، تنها ۵ درصد خواهد بود. حرکت جانبی ماشین مزیت اضافی است که نیاز به محل دور زدن ماشین‌ها را مرتفع نموده و لذا بر سطح قابل استفاده در کل مزرعه می‌افزاید.

۲-٤- خلاصه و نتیجه‌گیری

هدف این فصل ارائه یک دیدگاه کلی از مشکل فروسایی خاک در اثر تردد ماشین‌های کشاورزی بوده است. اصول روابط ماشین – خاک – گیاه به خوبی توضیح داده شده است، اما به علت وجود اثرات متقابل میان تغییرات زمانی و مکانی خاک‌ها و اقلیم همراه با شرایط متفاوت رشد گیاه، کمّی کردن این روابط دشوار است. تا کنون، در تحقیقات انجام شده، عوامل اصلی موثر در تراکم خاک شناسایی شده و ضمن بیان روش‌های اصلاح، توصیه‌هایی برای کاهش خطر تراکم از جمله: تنظیم زمان عملیات کشاورزی با توجه به شرایط رطوبتی خاک، الگو و شدت تردد و ویژگی‌های چرخ و بار وارده؛ شخم عمیق؛ افزودن مواد آلی؛ تناوب‌های ویژه با هدف حفظ سطح حاصلخیزی و مواد آلی ارائه گردیده است. ارایه و تکمیل راهبردهای کنترل شرایط فیزیکی خاک نیز امکان‌پذیر است اما اجرای آنها به ارزیابی هزینه – فایده، سیاست موجود و تغییرات بازار بستگی دارد. شرایط مذکور می‌تواند به معرفی روش‌های مناسب امکان سنجی[1] اقتصادی برنامه‌های اصلاحی و تناوب‌های زراعی مفید و همچنین توسعه روش‌های متناسب و ادوات ارزان برای نشان دادن و پایش[2] درجه تراکم اراضی منجر گردد. توصیف آماری تراکم، خاک‌ورزی و اثر فرایندهای طبیعی بر ویژگی‌های خاک و همچنین تحلیل احتمال برای شرایط آب و هوایی باید به خدمت گرفته شده و به عنوان راهنمای تصمیم‌گیری میان مدت و بلند مدت به کار رود.

1- Feasibility
2- Monitoring

تهیه و تکمیل راهنماهای عملی همان‌اندازه مشکل است که به کارگیری و اجرای آنها. کولور و سی چاران (۱۹۸۶) خاطر نشان کرده‌اند که باید در جهت افزایش آگاهی عمومی در مورد فروسایی خاک اقدام شود، لیکن گیرت (۱۹۸۶) نشان داده است که در کانادا، تفاوت سود خالص در هکتار برای سیستم‌های کشت حفاظتی معین در مقایسه با سیستم‌های در حال فروسایی، تنها در دوره زمانی ۱۰ سال یا بیشتر از نظر اقتصادی معنی‌دار است. در فعالیت‌هایی که در مرز یک کشاورزی موفق قرار دارند، سیستم‌های حفاظتی چندان جالب توجه نیست. کولور و سی شاران (۱۹۸۶) به عوامل موثر بر درجه پذیرش راهبردهای حفاظتی توسط زارعان، مانند عوامل شخصی (سن و تحصیلات زارع)، اقتصادی (اندازه مزرعه و سود خالص)، دولتی (کمک‌های مالی، فنی، تحقیقاتی) و فیزیکی (توپوگرافی و اقلیم) اشاره نموده‌اند.

در حال حاضر، از یک سو تحقیقات کشاورزی به جنبه‌های بهره‌وری و افزایش تولید سوق داده شده است که بهینه‌سازی آن با فشارهای اقتصادی کوتاه مدت محدود می‌شود. اما از سوی دیگر، حل مشکل فروسایی خاک فرایندی درازمدت است و باید بجای حداکثر تولید، بر پایداری و دوام آن تاکید بیشتری شود. بدون توجه به پایداری تولید، خاک‌ها عاقبت به عنوان یک محیط رشد تامین کننده غذا، متروک خواهند شد و... حکایت همچنان باقی‌ست.

۲-۵- مراجع

تاجیک، ف. ۱۳۸۷. کاربردآزمون پراکتور در ارزیابی تراکم خاک‌های کشاورزی با در نظر گرفتن اثر ویژگی‌های خاک. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. نشریه شماره ۸۷/۴۹. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی-کرج.

رحیمی، حسن. ۱۳۷۱. مکانیک خاک. انتشارات قائم، تهران.

Amir, I., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and R.S. Broughton. 1976. Soil compaction as a function of contact pressure and soil moisture content. Can. Agric. Eng. 18(1):54-57.

Aragon, A., M.G.Garcia, R.R.Filgueira, Ya. A. Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: The relationship with organic carbon and water content. Soil & Till. Res. 56: 197-204.

Barnes, K.K., W.M. Carleton, H.M. Taylor, R.I. Throckmorton, and G.E. Vanden Berg. 1971. Compaction of agricultural soils. ASAE Monograph, St. Joseph, MI.

Bernier, H., G. Bostock, G.S.V. Raghavan, and R.S. Broughton.1989. Subsoiling effects on moisture content and bulk density in the soil profile. Appl. Eng. Agric. 5(1):24-28.

Blake, G.R., W.W. Nelson, andR.R. Allmaras.1976. Persistence of sub-soil compaction in a Mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 943-948.

Boone, F.R. 1986. Towards soil compaction limits for crop growth. Neth. J. Agric. Sci.34:349-360.

Bowen, H.D. 1981. Alleviating mechanical impedance. In: G.F. Arkin and H.M.Taylor (eds.), Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE, St. Joseph, MI.

Cassel, D.K. 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. pp. 45-67. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Special Publ. No.44. Madison, WI.

Chancellor, W.J. 1976. Compaction of soil by agricultural equipment. Bull. 1881, Div. Agr. Sci., Univ. California, Davis.

Coote, F.R. 1980. The deterioration of agricultural land: How sick are our soils? Agrologist 9(4) : 12-14.

Culver, D., and R. Seecharan. 1986. Factors that influence the adoption of soil conservation technologies. Can. Farm Econ. 20(2) : 9-13.

Daddow, R.L. and G.E. Warrington. 1983. Growth-Limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. WDG Report, WSDG-TN-00005, USDA Forest Service.

Dann, P.R., A.G. Thomas, R.B. Cunningham, and P.H.R. Moore. 1987. Response by wheat, rape and field peas to pre-sowing herbicides and deep tillage. Aust. J. Exp. Agric. 27:431-437.

Dexter, A.R. 1986a. Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. Plant and Soil 95 : 123-133.

Dexter, A.R. 1986b. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. II. Entry of pea and wheat roots into sub-soil cracks. Plant and Soil 95 : 135-147.

Dexter, A.R., 1986c. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. III. Entry of pea and wheat roots into cylindrical biopores. Plant and Soil 95 : 149-161.

Diaz–Zorita, M. and G.A. Grosso. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactibility of soils from the Argentinean pampas. Soil & Tillage Res., 54:121-126.

Dumanski, J. 1980. The agricultural land resource: Locating the loss. Agrologist 9(4):15-17.

Eriksson, J., I. Hakansson, and B. Danfors. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Bull. 354, Swed. Inst. Agr. Eng., Uppsala, Sweden. (Eng. Trans. by J.K. Aase).

Gameda, S., G.S. V. Raghavan, E. McKyes and R. Theriault. 1985. A reivew of subsoil compaction. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 970-978.

Gameda, S., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and R. Theriault. 1987a. Sub-soil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects. Soil and Tillage Res. 10: 113-122.

Gameda, S. , G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and R. Theriault, 1987b. Sub-soil compaction in a clay soil. II. Natural alleviation. Soil and Tillage Res. 10: 123-130.

Gill, W.R. 1971. Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph, St. Joseph, MI.

Girt, J. 1986. The on-farrn economics of sustainability and public intervention. Can. Farm Econ. 20(2) : 3-8.

Goldsmith, W., Silva, M., and Fischenich, C. 2001. Determining optimal degree of soil compaction for balancing mechanical stability and plant growth capacity, ERDC(TN-EMRRP-SR-26), U.S. Army Engineer Research and Development center, Vicksburg, MS.

Guerif, J. 1994. Effects of compaction on soil strength parameters, In: Soane, B. D. and C.Van Ouwerkerk(Eds.), Soil compaction in crop production. Elsevier. Amsterdam. pp.191-214.

Gunjal, K.R. , and G.S. V. Raghavan, 1986. Economic analysis of soil compaction due to machinery traffic. App. Eng. Agric. 2(2) : 85-88.

Gunjal, K.R. , G. Lavoie, and G.S. V. Raghavan. 1987. Economics of soil compaction due to machinery traffic and implications for machinery selection. Can. J. Agric. Econ. 35: 591-603.

Gupta, S.C. , and R.R. Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. Adv. Soil Sci. 6: 65-100.

Gupta, S.C., A. Hadas, W.B. Voorhees, D. Wolf, W.E. Larson, and E.C. Schneider. 1985. Field testing of a soil compaction model. Int. Conf. Soil Dynamics Proc. 5: 979-994.

Gupta, S.C. , and W.E. Larson. 1982. Modelling soil mechanical behavior during tillage. pp. 151-178. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Spec. Pub. 44, Madison, WI.

Hadas, A., W.E. Larson, and R.Ri Allmaras. 1988. Advances in modeling machine-soil-plant interactions. Soil and Tillage Res. 11(4) : 349-372.

Hakansson, I. 1982. Long-term effects of vehicles with high axle load on subsoil compaction and crop response. 9th Conf., Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO) (Osijek, Yugoslavia), pp. 213-218.

Hakansson, I., W.B. Voorhees, and H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil and Tillage Res. 11(3):239-282.

Hettiaratchi, D.R.P., and J.R. O'Callaghan. 1980. Mechanical behaviour of agricultural soils. I. Agric. Eng. Res. 25: 239-259.

Hillel, D. 1987. Modeling in soil physics: A critical review. In: L.L. Boersma (ed.), Future developments in soil science research. SociI Sci. Soc. Am. , Madison, WI.

Horn, R., and Lebert M.1994. Soil compactibility and compressibility, In: Soane, B. D. and C.VanOuwerkerk(Eds.), Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam. pp.45-69.

Lal, R., G.F. Wilson, and B.N. Okigbo. 1979. Changes in properties of an alfisol produced by various crop covers. Soil Sci. 127: 377-382.

Lambe, T.W. 1951. Soil testing for engineers. p. 165. Wiley, NY.

Larson, W.E., and G.J. Osborne. 1982. Tillage accomplishments and potential. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Spec. Pub.44, Madison, WI.

Larson, W. E., A. Eynard, A. Hadas, and J. Lipiec.1994. Control and avoidance of soil compaction in practice, In: Soane, B. D., and C. Van Ouwerkerk(Eds.), Soil compaction in crop production. Elsevier. Amsterdam. pp. 597-625.

Lindstrom, M.J., W.B. Voorhees, and G.W. Randall. 1981. Long-term tillage effects on interrow runoff and infiltration. Soil Sci. Sco. Am. J. 45: 945-948.

Lovejoy, S.B., and T.L. Napier (eds.). 1986. Conserving soil: Insights from socioeconomic research. Soil Conservation Society of America, Ankeney, IA.

Meek, B.D., E.A. Rechel, L.M. Carter, and W.R. DeTar. 1988. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone production systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:232-236.

Mehuys, G.R. 1984. So~1 degradatio~ of agricultural land in Quebec. A review and Impact assessment. Science Council of Canada, Ottawa.

Mohammad, F. 1987. Sugarbeet development under conservation tillage. M.Sc. thesis, McGill University, Montreal, Canada.

Negi, S.C., E. McKyes, G.S.V. Raghavan, and F. Taylor. 1981. Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. I. Terramechanics 18(2):81-90.

Nhantumbo, A.B.J.C. and A.H. cambule ,2006, Bulk density by proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique, soil & tillage Res., 87:231-239.

Oldeman, L.R. et al. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation, An explanatory note. ISRIC, Wageningen.

Ohu, J.O., G.S.V. Raghavan, and E. McKyes. 1985a. Peatmoss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. Trans. ASAE, 28(2): 201-424.

Ohu, J.O., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, K.A. Stewart, and M.A. Fanous, 1985b. The effects of soil compaction and organic matter on the growth of bush beans. Trans. ASAE 28(4): 1056-1061.

Ohu, J.O., G.S. V. Raghavan, E. McKyes, and G. Mehuys. 1986. Shear strength prediction of compacted soils with varying organic matter content. Trans. ASAE 29(2):351-355.

Partridge, M. 1973. Farm tools through the ages. Osprey, Reading, Berk. United Kingdom.

Perumpral, J.V. 1987. Cone penetrometer applications-A review. Trans. ASAE 30(4):939-944.

Pollock, D., Jr., J. V. Perumpral, and T. Kuppusamy. 1986. Finite element analysis of multipass effects of vehicles on soil compaction. Trans. ASAE 29(1) :45-50.

Quiroga, A.R., D.E. Buschiazzo, and N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. Soil & Till. Res., 52:21-28.

Raghavan, G.S. V., P. Alvo and E. McKyes. 1990. Soil compaction in agriculture: A view toward managing the problem. In: Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). Advances in soil science, Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Raghavan, G.S. V. 1985. Methods of alleviating soil compaction. Soil Compaction Conf. (Ohio State Univ., Columbus, OH), April 1985.

Raghavan, G.S. V. , and E. McKyes. 1977. Laboratory study to determine the effect of slip-generated shear on soil compaction. Can. Agric. Eng. 19(1) : 40-42.

Raghavan, G.S. V. , and E. McKyes. 1978. Statistical models for predicting compaction by off-road vehicular traffic in different soil types. J. Terramechanics, 15(1) : 1-14.

Raghavan, G.S. V., and E. McKyes. 1983. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. J. Terramechanics 19(4) : 235-242.

Raghavan, G.S. V. , E. McKyes, M. Chasse, and F. Merineau. 1976a. Development of compaction patterns due to machinery operation in an orchard soil. Can. J. Plant Sci. 56 : 505-509.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, I. Amir, M. Chasse, and R.S. Broughton. 1976b. Prediction of soil compaction due to off-road vehicle traffic. Trans. ASAE 19:610-613.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, and B. Beaulieu. 1977a. Prediction of clay soil compaction. J. Terramechanics 14(1):31-38.

Raghavan, G.S. V. , E. McKyes, and M. Chasse. 1977b. Effect of wheel slip on soil compaction. J. Agric. Eng. Res. 22:79-83.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, G. Gendron, B. Borglum, and H.H. Le. 1978a. Effects of soil compaction on development and yield of corn (maize). Can. J. Plant Sci. 58: 435-443.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, and B. Beaulieu. 1978b. Clay soil compaction due to wheel slip. Trans. ASAE 21(4) : 646-649,653.

Raghavan, G.S.V., E. McKyes, F. Taylor, P. Richard, and A. Watson. 1979. The relationship between machinery traffic and corn yield reactions in successive years. Trans. ASAE 22: 1256-1259.

Raghavan, G.S. V., and J.O. Ohu. 1985. Prediction of equivalent pressure of Proctor compaction blows. Trans. ASAE 28(5) : 1398-1400.

Raghavan, G.S. V. , F. Taylor, B. Vigier, L. Gauthier, and E. McKyes. 1982. Effect of compaction and root rot disease on development and yield of peas. Can. J. Agric. Eng. 24(1) : 31-34.

Sheptukhov, V.N., A.I. Voronin, and M.A. Shipilov. 1982. Bulk density of the soil and its productivity. Soviet Soil Sci. 14(5) : 97-107.

Soane, B.D. 1985. Traction and transport systems as related to cropping systems. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 863-935.

Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson, and D.J. Painter. 1981a. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. Soil and Tillage Res. 1: 207-237.

Soane, B.D., P.S. Blackwell, J.W. Dickson, and D.J. Painter. 1981b. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. Soil and Tillage Res. 1 :373-400.

Soane, B.D., and F.R. Bonne, 1986. The effects of tillage and traffic on soil structure. Soil and Tillage Res. 8: 303-306.

Soane, B.D. , J.W.Dickson, and D.J. Campbell. 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review. III. Incidence and control of compaction in crop production. Soil and Tillage Res. 2: 3-36.

Soane, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. Soil & Till. Res. 16: 179- 201.

Soehne, W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agric. Eng. 39: 276-281,290.

Taylor, J.H. 1985. ~ontrolled traffic: A spin-off of soil dynamics research. Int.Conf SoIl Dynamlcs Proc. 5: 1101-1111.

Taylor, J.H., and W.R. Gill. 1984. Soil compaction: State-of-the-art report. I. Terramechanics 21 (2) : 195-213.

Tisdall, J.M., and H.H. Adem. 1986. Effect of water content at tillage on size distribution of aggregates and infiltration. Aust. J. Exp. Agric. 26: 193-195.

Thomas, G. W., G. R. Haszler, and R. L. Blevins. 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test. Soil Sci., 161: 502- 508.

Van Doren, D.M., R.R. Allmaras, D.R. Linden, and F.D. Whisler (Organ. Committee). 1982. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. ASA Pub. 44, Madison, WI.

Vepraskas, M.J. 1988. A method to estimate the probability that sub-soiling will increase tobacco yields. Soil Sci. Am. J. 52: 229-232.

Vigier, B., and G.S.V. Raghavan. 1980. Soil compaction effect in clay soils on common root rot in canning peas. Can. Plant Disease Survey 60(4) :43-45.

Voorhees, W.B. 1977. Soil compaction: Our newest natural resource. Crops Soils Mag. 29: 13-15.

Voorhees, W.B. 1980. Energy aspects of controlled wheel traffic in the Northern Corn Belt of the Unied States. Proc. Int. Soil Tillage Res. Organization, 8th Conf 1979 (Univ. of Hohenheim, Germany) 2: 333-338.

Voorhees, W.B., W. W. Nelson, and G. W. Randall. 1985. Soil and crop response to wheel traffic on highly productive soils of the northern corn belt. Int. Conf Soil Dynamics Proc. 5: 1120-1131.

Voronin, A.I. 1982. Bulk density of an irrigated Chestnut soil and its productivity. Soviet Soil Sci. 14(3) : 78-84.

Wagner.L. E., N. M. Ambe, and D. Ding. 1994. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 37: 1121- 1125.

Webb, R.H., J. W. Steiger, and H.G. Wilshire. 1986. Recovery of compacted soils in Mojave Desert ghost towns. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1341-1344.

Zhang, H., K. H. Hartge, and H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. Soil sci. Soc. Am. J., 61: 239- 245.

فصل سوم

زهکشی، شرایط ماندابی و بی‌هوازیستی در خاک

۳-۱- مقدمه

شرایط ماندابی، یادآور رژیم رطوبتی به عنوان یک پارامتر طبقه‌بندی خاک و همچنین تداعی‌کننده سیستم‌های زهکشی مصنوعی است که بسامد و تداوم شرایط ماندابی (ناشی از سطح ایستابی بالا یا شرایط اشباع خاک) را اصلاح می کنند. هنگام وقوع شرایط ماندابی، هوای خاک تخلیه شده و از تبادل مفید گازها بین خاک و اتمسفر جلوگیری می‌شود. در چنین حالتی، محیط اطراف ریشه از اکسیژن تهی شده و فعالیت‌های حیاتی در خاک به مواردی محدود می‌شود که موجودات زنده می‌توانند بدون اکسیژن آزاد، انرژی لازم را کسب کنند. این فرایند به عنوان شرایط بی‌هوازی شناخته می‌شود.

اگر چه درک نقش رژیم رطوبتی در فرایند تشکیل خاک و ویژگی‌های ذاتی فیزیکی و شیمیایی و زیستی خاک‌ها در شرایط رطوبتی مختلف حایز اهمیت است اما این مفاهیم، ارتباط اندکی با فروسایی خاک در شرایط ماندابی و بی‌هوازی دارند. فروسایی خاک به علت شرایط ماندابی و بی‌هوازی مستلزم تغییر رژیم رطوبتی خاک از وضعیت طبیعی به وضعیت مرطوب‌تر – بدون توجه به مقدار رطوبت در شرایط طبیعی – می‌باشد. جدول ۸ وسعت و شدت شرایط ماندابی در جهان نشان می‌دهد.

جدول ۸- وسعت و شدت شرایط ماندابی(میلیون هکتار) در خاک‌های جهان (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱)

خفیف		متوسط	شدید	کل	درصد از کل اراضی
آسیا	۰/۴	–	–	۰/۴	۰/۰۱
آفریقا	۰/۴	۰/۱	–	۰/۵	۰/۰۲
آمریکای جنوبی	۳/۹	–	–	۳/۹	۰/۲۲
آمریکای مرکزی	۰/۸	۳/۳	۰/۸	۴/۹	۰/۰۲
آمریکای شمالی	–	–	–	–	–
اروپا	۰/۵	۰/۳	–	۰/۸	۰/۰۸
استرالیا	–	–	–	–	–
کل جهان	۶/۰	۳/۷	۰/۸	۱۰/۵	۰/۰۸

با انجام تحقیقات، پیشرفت‌های قابل توجهی در فهم قابلیت‌ها و محدودیت‌های خاک برای استفاده‌های گوناگون ایجاد شده است. این تحقیقات، با مطالعه خاک‌هایی که در شرایط متفاوت رطوبتی تشکیل شده‌اند و یا با مطالعه تغییرات ویژگی‌های خاک در فرایند زهکشی – که منجر به تغییر رژیم رطوبتی به شرایط خشک‌تر یا کاهش بسامد شرایط ماندابی می‌گردد – صورت گرفته است. اما، اطلاعات بسیاراندکی درباره تغییرات حاصله – که گمان می‌رود به فروسایی خاک‌های بالقوه حاصلخیز منجر شود – در خاک‌هایی که رژیم رطوبتی‌شان مرطوب‌تر می‌شود، وجود دارد (فوزی و لعل، ۱۹۹۰).

در این فصل کوشش می‌شود تا فروسایی خاک با استفاده از مشاهدات مستقیم تغییرات خاک در حین مرطوب‌تر شدن و کاربرد فرضیات غیر مستقیم در مورد تغییرات ناشی از زهکشی و خشک‌کردن خاک‌ها تشریح گردد. واضح است که ویژگی‌ها و فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی در خاک، در اثر آغاز و ادامه شرایط ماندابی، دچار فروسایی و انحطاط خواهد شد. مباحث جدید درباره زهکشی نیز در پایان فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۲- علت‌های ایجاد شرایط ماندابی

۳-۲-۱- شرایط ماندابی کوتاه مدت در اثر بارندگی زیاد یا سیل

در مناطق بارانی، حوادث غیر مترقبه اقلیمی با ۲۰، ۵۰ یا ۱۰۰ سال دوره بازگشت می‌توانند سبب تغییرات شدید در سطح خاک شوند. بارندگی‌های شدید، طوفان و گردباد انرژی کافی برای

جابجایی و فرسایش خاک سطحی و تغییر کلی آن را دارند. در برخی شرایط، یک منطقه ممکن است کاملاً با رسوبات حاصل از فرسایش منطقه دیگر پوشیده شود. اگر چه شرایط ماندابی در این مناطق نمی‌تواند انرژی لازم برای تغییر چهره زمین[1] را فراهم کند، اما باعث کاهش مقاومت خاک و اخلال در فرایند خاکدانه‌سازی در محل شده و می‌تواند منجر به فروسایی خاک پس از وقوع حوادث غیرمترقبه گردد.

۳-۲-۲- بالا آمدن سطح ایستابی در اثر آبیاری یا نشت از کانال

بالا آمدن سطح ایستابی در اثر آبیاری و نشت از کانال احتمالاً محسوس‌ترین مثال فروسایی خاک ناشی از شرایط ماندابی است. میلیون‌ها هکتار از اراضی زراعی در اثر چنین شرایطی از حیز انتفاع خارج شده‌اند. کاربرد بیش از حد یا نشت آب در خاک‌های نفوذپذیر منجر به حرکت رو به پایین آب و تجمع آن در سطح طبیعی ایستابی می‌گردد. در نتیجه، سطح ایستابی شروع به بالا آمدن می‌کند تا حدی که موازنه آبی جدیدی حاصل شود. این سطح جدید با حالت ماندگار[2] معمولاً بسیار نزدیک به سطح خاک است و منجر به رشد گیاهان سازگار با سطح ایستابی بالا، کاهش قابلیت تردد و تجمع املاح در قسمت‌های بالایی نیمرخ خاک می‌گردد. تجمع املاح از تبخیر آب و افزایش غلظت املاح موجود در آب آبیاری ناشی می‌گردد. به نظر می‌رسد که نشت از کانال بیش از کاربرد آب آبیاری اضافی، در بالا آمدن سطح ایستابی موثر است اما مقدار هر دو قابل توجه می‌باشد. این مسئله در پروژه مربوط به شرایط ماندابی و شوری در پاکستان و هند در سال ۱۹۶۴ بررسی شده است. فروسایی خاک‌ها در این منطقه عمدتاً ناشی از شوری و کمتر متأثر از شرایط ماندابی و بی‌هوازی بوده است. بالا آمدن سطح ایستابی به بسامد و دوره برگشت بیشتر بارندگی نیز نسبت داده شده است (کاخ سفید آمریکا، ۱۹۶۴).

۳-۲-۳- سطح ایستابی کم‌عمق آویزان[3] ناشی از تراکم

خاک‌ورزی مکرر و تردد ابزار شخم منجر به تراکم خاک می‌گردد. با افزایش تعداد عملیات و سنگین‌تر شدن ادوات شخم، عمق و شدت تراکم خاک افزایش می‌یابد. سرانجام، عمق تراکم از عمق

1- Landscape
2- Steady-state
3- Perched shallow water table

شخم بیشتر می‌شود و یک لایه فشرده دائمی در کف لایه شخم گسترش می‌یابد. این لایه مانع نفوذ عمقی آب در نیمرخ خاک شده و لذا ناحیه اشباعی در ناحیه شخم و بالای لایه فشرده ایجاد می‌گردد. جزئیات چنین شرایطی توسط فوزی (۱۹۸۷) و فوزی و همکاران (۱۹۸۶) گزارش شده است.

در صورت افزونی باران بر نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب در خاک سطحی، با وقوع هر بارندگی، این ناحیه اشباع متناوباً ایجاد می‌گردد. در شرایطی که کشاورزان ناچار به کشت دیرهنگام و شخم در حالت اشباع این لایه شوند، قابلیت تردد و خاک‌ورزی کاهش یافته و احتمال تراکم و فشردگی بعدی افزایش می‌یابد. رطوبت زیاد در بالای لایه متراکم به خرد شدن و پراکنش خاکدانه‌ها، محدود شدن عمق ریشه و ایجاد شرایط بی‌هوازی (که خود بر قابلیت جذب عناصر غذایی موثر است) منجر می‌گردد.

۳-۲-٤- بالا آمدن سطح ایستابی در اثر نوع مدیریت خاک سطحی

شواهد مختلفی از تاثیر مدیریت خاک سطحی (مانند آیش طولانی و جنگل‌زدایی) بر هیدرولوژی، منجمله برسطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی وجود دارد. این تغییرات هیدرولوژیک پس از طی زمان منجر به ایجاد شرایط ماندابی در افق‌های سطحی خاک می‌شود. سرانجام، خاک به حدی تخریب می‌شود که استفاده سودمند از آن، محدود یا ناممکن می‌گردد.

زراعت در مناطق خشک معمولاً شامل تناوبی از کشت و آیش است. از سال یا سال‌های آیش برای افزایش ذخیره آب از طریق افزایش نفوذ و کاهش مقدار تبخیر استفاده می‌شود. این روش، تعادل طبیعی هیدرولوژی را برهم می زند. با افزایش سال‌های آیش از یک سال به دو سال، سطح آب زیرزمینی افزایش یافته و به حد گسترش نشت گرده‌ای[1] می‌رسد. منطقه نشت معمولاً بسیار شور و غیر قابل تردد است. دورینگ و ساندووال (۱۹۷۶) چنین شرایطی را به خوبی تشریح نموده‌اند.

جنگل‌زدایی و تبدیل جنگل به اراضی زراعی در تمام نواحی اقلیمی رایج است و منجر به تغییر موازنه هیدرولوژیک در حالت تعادل طبیعی می‌گردد. تا کنون عمدتاً به اثر جنگل‌زدایی بر فرسایش خاک توجه شده و از اثر آن بر شرایط هیدرولوژیک عمق خاک صرف‌نظر شده است. در مناطق تپه ماهور، جنگل‌زدایی منجر به افزایش نقاط نشت و افزایش جریان آب می‌شود. در مناطق مسطح، بالا آمدن سطح ایستابی از نتایج اولیه جنگل‌زدایی است (بتانی و همکاران، ۱۹۶۴). مک‌گینس و هارولد

1- Hillside seepage

(۱۹۷۱) چنین شرایطی را در اراضی شیبدار به خوبی توصیف نموده‌اند. اثرات بالقوه کاهش سطح ایستابی پس از جنگل‌کاری، توسط سازمان عمران دره تنسی (۱۹۶۲) تشریح شده است. قابلیت تردد و عمق ریشه، از این تغییرات هیدرولوژیکی تاثیر می‌پذیرند.

۳-۲-۵- کند شدن زهکش سطحی به علت احداث سازه‌ها

احداث سازه‌های بزرگ مانند بزرگراه‌ها، خاکریزهای حفاظت از سیل، باند فرودگاه‌ها و... گاهی باعث ممانعت از زهکشی سطحی می شوند. اگرچه طراحی نادرست این سازه‌ها ممکن است علت این امر به حساب آید اما اغلب اوقات، ملاحظات اقتصادی، نوع طراحی مقرون به صرفه را تعیین می‌کند. اهداف احداث بزرگراه‌ها که شامل شیب و سطح یکنواخت و انتخاب کوتاه‌ترین مسیر می‌شود، معمولاً الگوی طبیعی حرکت آب در سطح خاک را تغییر می‌دهد. ممکن است کانال‌ها نیاز به بازسازی داشته باشد و احداث نهرهای سرپوشیده و نصب پمپ الزامی باشد زیرا سازه‌های بزرگ مانع جریان آب در مسیرهای طبیعی خود می شوند. ماندابی شدن خاک و جاری شدن سیل در سطح خاک، معمولاً در شرایطی واقع می‌شود که مسیرهای خروجی آب با سازه‌های موجود محدود شده‌اند. اگر چه غرقاب شدن خاک موقتی است، اما تداوم و تکرار شرایط ماندابی وابسته به محل بوده و ممکن است به فروسایی خاک منجر گردد. در چنین وضعیتی، بدیهی است که قابلیت تردد ماشین‌ها و حیوانات کاهش یابد. شرایط بی‌هوازی نیز ممکن است بر قابلیت جذب عناصر غذایی و عمق توسعه ریشه تاثیر بگذارد. کوناکر و دیردن (۱۹۸۸) برخی از این اثرات را در جنگل‌های بارانی استرالیا گزارش کرده‌اند.

۳-۳- اثرات ماندابی شدن خاک

از نظر زراعی یا زیستی یک اثر بسیار مهم شرایط ماندابی، ایجاد شرایط بی‌هوازی است که ممکن است از دیدگاه فیزیکی اهمیت کمتری داشته باشد. در اینجا، برای تعیین و تعریف اثرات شرایط ماندابی خاک، بر سه جنبه فیزیکی، شیمیایی و زیستی تاکید خواهد شد.

۳-۳-۱- اثرات فیزیکی

بزرگترین تغییر فیزیکی مرتبط با شرایط ماندابی که روندی تخریبی شمرده می‌شود، کاهش مقاومت در خاک است. این تغییر با معیار مقاومت فشاری محصور نشده[1] نشان داده شده و به صورت فرو رفتن چرخ‌ها و سم حیوانات در خاک دیده می‌شود. فرو رفتن چرخ‌ها موجب کاهش نیروی کششی موتور و اختلال در انجام عملیات زراعی می‌گردد. مقاومت فشاری محصور نشده در خاک‌های چسبنده وابسته به استحکام[2] آن است که نشانگر مقدار رطوبت می‌باشد و در حالت خیس به صورت «خیلی نرم» توصیف می‌شود. این پدیده بسیار ساده است و هر کس با پیاده روی یا اتومبیلرانی روی خاک خیس می‌تواند طبیعت چنین فروسایی را درک نماید.

اثر بلند مدت این نوع از فروسایی به انجام کار روی خاک در شرایط بسیار خیس بستگی دارد و در صورتی که انرژی بر خاک اعمال نشود، فروسایی فیزیکی نیز واقع نمی‌گردد؛ اما برخورد قطرات باران، حرکت چرخ‌ها و حیوانات و سایر ابزار اعمال انرژی بر خاک، منجر به خرد شدن ذرات یا ایجاد حالت شفته یا گلخرابی[3] می‌شود که شاهدی بر شرایط واقعی فروسایی فیزیکی خاک است. شارما و دداتا (۱۹۸۵) گزارش کرده‌اند که شفته شدن خاک به افزایش جرم مخصوص ظاهری، و کاهش نفوذ عمقی و هدایت آبی اشباع در لایه سطحی خاک خشک متراکم منجر می‌گردد. رید و پارکینسون (۱۹۸۴) مشاهده کرده‌اند که ترک خوردن در خاک‌هایی رخ می‌دهد که ساختمان خاک در اثر لگدمال شدن تخریب شده است در حالی‌که انقباض (فصلی) مناطق لگدمال نشده، بدون ترک خوردن صورت گرفته است. این مطلب، همچنین به وضوح در مشاهدات هوندال و همکاران (۱۹۷۶) نشان داده شده است. نواحی زهکشی نشده، سله‌های بزرگ تر و ضخیم تر و ترک‌های گسترده‌تری داشته‌اند.

قطعات آزمایشی بدون زهکشی که توسط هوندال و همکاران (۱۹۷۶) تشریح شده است با یک خاکریز جلوگیری از رواناب احاطه شده‌اند. کل بارندگی در قطعات آزمایشی باقی می‌ماند که موجد شرایط مصنوعی ماندابی خاک می‌گردد. در جدول ۹ خلاصه‌ای از مقایسه ویژگی‌های فیزیکی خاک در شرایط زهکشی نشده (با وجود خاکریز) و با زهکشی سطحی (بدون خاکریز) ارائه شده است.

1- Unconfined compressive strength
2- Consistency
3- Puddling

جدول ۹- مقایسه ویژگی‌های فیزیکی خاک رسی *Lacustrine* در قطعات با شرایط ماندابی مصنوعی (محصور در خاکریز)، نزدیک به شرایط طبیعی ماندابی (زهکشی سطحی) و خشک‌تر از حالت طبیعی (زهکشی سطحی و زیرزمینی)، (هوندال و همکاران، ۱۹۷٦)

ویژگی خاک	محصور در خاکریز	زهکشی سطحی و زیرزمینی	زهکشی سطحی
جرم مخصوص ظاهری، gcm^{-3}			
عمق cm **۱۵-۰**	۱/۲۹	۱/۲۲	۱/۲۶
عمق cm **۳۰-۱۵**	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۳۳
مقدار رطوبت در ۱- بار، $\%w/w$			
عمق cm **۱۵-۰**	۳۰/۴	۳۰/۱	۳۰/۶
عمق cm **۳۰-۱۵**	۲۹/۲	۲۹/۶	۲۹/۶
تخلخل هوایی، $\%v/v$			
عمق cm **۱۵-۰**	۱۲/۵	۱۷/۰	۱۴/۵
عمق cm **۳۰-۱۵**	۹/۵	۱۶	۱۲/۰
مقاومت فشاری محصور نشده، $kgcm^{-2}$			
عمق cm **۱۵-۰**	۲/۵	۱/۶	۲/۳
عمق cm **۳۰-۱۵**	۳/۱	۲/۳	۲/۹
مقاومت به فرو روی، $kgcm^{-2}$	۱۴/۴	۶/۰	۱۲/۶
هدایت هیدرولیکی، cmh^{-1}	۰/۰۶	۲/۰	۰/۳۰

خاک‌ها در شرایط ماندابی و در قطعات محصور در خاکریز، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت به فروروی بیشتر و تخلخل هوایی (در مکش یک بار) و هدایت آبی اشباع کمتری دارند.

اشتینهارت و ترافورد (۱۹۷۴) تفاوت‌های قطعات آزمایشی را از جهت فرو رفتن چرخ‌ها، فشردگی جانبی در شیار حاصل از حرکت چرخ، مقاومت به فرو روی و چگالی مرطوب، اندازه‌گیری کرده و نشان داده‌اند که در خاک رسی شخم خورده، سیستم زهکشی زیرزمینی خسارت ناشی از تردد تراکتور و

فرو رفتن چرخ‌ها را کاهش داده است. همچنین، در این تیمار، تراکم در ۱۶ سانتی‌متری زیر لبه تراکتور کاهش یافته است. با افزایش مکش ماتریک خاک از ۲ تا ۲۵ سانتی‌متر؛ هر ۱۰ سانتی‌متر افزایش مکش بر کاهش فشردگی شیار حاصل از حرکت چرخ (با فرض ۶۷۰ کیلوگرم بار تراکتور) موثر بوده است. جمع‌بندی اشتینهارت و ترافورد (۱۹۷۴) چنین بوده است که برای خاک‌های رسی که موقتاً غرقاب می‌شوند، زهکشی و رساندن سطح ایستابی به ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متری سطح خاک برای به حداقل رساندن تخریب ساختمان خاک توصیه می‌شود.

خرد شدن خاکدانه‌ها جنبه دیگری از فروسایی خاک در اثر شرایط ماندابی است. با ادامه آبپوشی، لایه‌های نازک آب، اطراف ذرات کانی را احاطه می‌کنند و با افزایش تدریجی ضخامت لایه آب، بارهای نگهداری شده توسط ذرات سست شده و ذرات خاکدانه از هم جدا می شوند. فرانسیس و کروز (۱۹۸۲) نشان داده‌اند که پایداری خاکدانه‌ها حساسیت زیادی به مکش ماتریک – به ویژه در مکش نزدیک صفر – دارد و عملیات مدیریتی که باعث کند کردن زهکشی درونی خاک می‌شوند، ممکن است با افزایش پتانسیل ماتریک، اثر منفی قابل توجهی بر پایداری ساختمان خاک داشته باشد. چنین پدیده‌ای در فرایند برخورد قطرات باران به سطح خاک مصداق دارد. ابوشرار و همکاران (۱۹۸۶) گزارش کرده‌اند که خرد شدن خاکدانه‌ها ممکن است بدون پراکنش رس رخ دهد اما در فرایند خرد شدن، ذرات پراکنده رس همزمان با شکستن خاکدانه، منتشر می شوند. این ذرات رس پس از ته نشینی به تشکیل یک ناحیه با نفوذپذیری اندک یا غیرقابل نفوذ در کف لایه شخم کمک می کنند.

از گذشته‌های دور این باور وجود داشته است که خاک‌های بسیار مرطوب در بهار به کندی گرم می‌شوند. استین هویس و والتر (۱۹۸۶) این فرض را آزموده و به طور نظری نشان داده‌اند که میزان رطوبت عامل اصلی تغییرات درجه حرارت در خاک‌های معدنی نمی‌باشد. مقادیر دمای خاک سطحی در فواصل مختلف از لوله‌های زهکش زیرزمینی (جدول ۱۰) نشان می‌دهد که در ماه آوریل، میانگین حداکثر دمای روزانه در عمق ۵ سانتی‌متری خاک و مجموع قرائت‌های ساعتی در دوره ۳۰ روزه در دورترین فاصله از زهکش، بالاترین مقدار را داشته است. در نتیجه، این فرضیه که زیاد شدن رطوبت باعث کندی گرم شدن خاک در بهار می‌شود، زیر سؤال می‌رود. اسکاتر و هورن (۱۹۸۵) با استفاده از روش‌های شبیه سازی آزمایشگاهی، تغییرات ظرفیت حرارتی حجمی، هدایت گرمایی و پخشیدگی حرارتی را اندازه‌گیری کرده و نشان داده‌اند که زهکشی اثر قابل توجهی بر دمای خاک ندارد.

جدول ۱۰- اثرات زهکشی بر دمای خاک - آوریل ۱۹۸٤، کلمبوس، اوهایو (فوزی و لعل، ۱۹۹۰)

فاصله از زهکش (متر)	میانگین دمای حداکثر روزانه (^{o}C)	میانگین دمای حداقل روزانه (^{o}C)	مجموع قرائت‌های ساعتی، در ۳۰ روز (^{o}C)
۰	۱۳/۴	۶/۰	۵۶۰۴
۹	۱۳/۶	۵/۷	۵۵۴۰
۱۸	۱۳/۷	۵/۷	۵۵۷۹
۲۷	۱۴/۴	۵/۶	۵۷۱۵

برای هر قانونی، استثنایی وجود دارد. رطوبت زیاد ناشی از غرقاب شدن، از گذشته‌های دور به عنوان عامل فروسایی خاک در نظر گرفته شده است، اما آیش سیلابی روش مدیریت جالبی است که در اراضی نیشکر کشور گویان اجرا می‌شود (گومبز، ۱۹۸۲). در این روش، ساختمان مطلوب و پایدار در خاک‌های سنگین ایجاد می‌شود که عامل بسیار مهمی در موفقیت کشت مستمر در خاک‌های سنگین رسی گویان بوده است. در این روش، خاک پس از شخم، غرقاب شده و به مدت ۶ تا ۹ ماه رها می‌شود. پس از زهکشی آب موجود در مرحله غرقاب، مراحل نهایی آماده‌سازی زمین انجام می‌گردد.

۳-۳-۲- اثرات شیمیایی و زیستی

دو اثر شیمیایی مهم شرایط ماندابی و بی‌هوازی مرتبط با فروسایی خاک وجود دارد که یکی تجمع املاح در خاک سطحی یا نزدیکی آن در مناطق خشک و نیمه خشک که سطح ایستابی بالا دارند و دیگری تغییر میزان حلالیت و شکل شیمیایی عناصر غذایی در شرایط بی‌هوازی می‌باشد. شوری خاک با نامناسب کردن آن جهت تولید محصولات زراعی عامل فروسایی خاک می‌شود. شرایط بی‌هوازی نیز با غیرقابل جذب کردن برخی عناصر غذایی و به حد سمیت رساندن برخی دیگر، منجر به فروسایی خاک می‌گردد. توصیف مسئله شوری به فصل مربوطه در جلد دوم این کتاب واگذار می‌شود که مشخصاً بر این مسئله متمرکز شده است.

اثر شرایط ماندابی بر فرایندها و ویژگی‌های زیستی خاک هنوز گزارش نشده است. در شرایط بی‌هوازی، واضح است که مواد آلی در طی زمان تجمع می یابند. خاک‌هایی که در شرایط مرطوب تشکیل شده‌اند، حاوی مواد آلی زیاد هستند و گاهی به عنوان خاک‌های آلی شناخته می‌شوند. همچنین، محیط بی‌هوازی طبعاً توازن نسبی جمعیت جانداران در خاک را بر هم می‌زند.

کاهش پتانسیل اکسیداسیون و احیاء[1] قابل توجه ترین تغییر کمّی کوتاه مدتی است که در خاک‌های با شرایط ماندابی ایجاد می‌گردد. خاک‌های با تهویه مناسب معمولاً پتانسیل اکسیداسیون و احیاء بین ۴۰۰+ تا ۷۰۰+ میلی ولت دارند که در خاک‌های غرقاب ممکن است به ۳۰۰- میلی‌ولت برسد. در مقادیر کمتر از ۴۰۰+ میلی‌ولت، شرایط خاک به عنوان احیای متوسط و در ۱۰۰- میلی‌ولت به عنوان احیای شدید تعریف می‌شود. مادامی که اکسیژن در دسترس باشد، ترکیبات اکسید شده دیگر خاک (عناصر غذایی) نسبتاً از احیای شیمیایی و زیستی مصون هستند زیرا اکسیژن گازی به عنوان یک گیرنده الکترون، واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی را کامل می‌کند. در صورت فقدان اکسیژن در شرایط ماندابی، ترکیبات اکسید شده خاک، گیرنده الکترون شده و احیاء می‌گردند. یکی از ترکیباتی که به سهولت احیاء می‌شود، نیترات است که شکل قابل جذب نیتروژن در خاک می‌باشد. احیای نیترات به دنیتریفیکاسیون موسوم است که منجر به هدر رفت سریع نیتروژن از خاک به صورت گازی می‌شود. به علت مقادیر زیاد نیتروژن مورد نیاز برای تولید محصول مناسب، هدررفت نیتروژن از خاک را به عنوان فرایندی فروساینده می‌توان در نظر گرفت زیرا در این فرایند، نیتروژن قابل جذب به سرعت از خاک تخلیه می‌شود.

اطلاعات‌اندکی در مورد وضعیت شیمیایی خاک‌های غرقاب در دسترس می‌باشد. پونام پروما (۱۹۷۲) مرور کاملی بر کارهای انجام شده در این مورد تا سال ۱۹۷۰، ارائه نموده است. توصیف خاک‌های شالیزار توسط وی احتمالاً بیشترین کاربرد را در مباحث این قسمت دارد، زیرا چنین خاک‌هایی برای کشت برنج به کار می روند که در آن برای غرقاب کردن خاک و شفته کردن آن، خاکریزهایی ساخته می‌شود. در حین غرقاب کردن خاک، شرایط احیاء ایجاد می‌شود و حلالیت عناصر آهن، منگنز، سیلیس و فسفات افزایش یافته و در سطح خاک پخش می‌شوند یا به صورت جریان توده‌ای به طرف عمق خاک منتشر می‌گردند. هر گاه که آهن و منگنز احیاء شده به سطح حاوی اکسیژن برسند، با سیلیس و فسفات رسوب می‌دهند.

لعل و تیلور (۱۹۶۹ و ۱۹۷۰) مقدار جذب ۵ عنصر غذایی پرمصرف و ۱۰ عنصر کم مصرف توسط ذرت را در شرایط با سطح ایستابی بالا و شرایط با زهکشی خوب در لایسیمتر مقایسه نموده‌اند. در خاک خیس، جذب آلومینیوم، آهن، منگنز و مولیبدن افزایش یافته، در حالی که جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس، بور و قلع کاهش یافته است. شارما و دداتا (۱۹۸۵) گزارش کرده‌اند که در شرایط ماندابی شالیزار، حلالیت آهن و منگنز افزایش یافته است در حالی که پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، و

1- Redox potential

مقدار آبشویی نیترات، آمونیوم، فسفر، پتاسیم و روی کاهش می‌یابد. افزایش حلالیت آهن و منگنز در پی کاهش اکسیژن در خاک توسط پاتریک و هندرسون (۱۹۸۱) نیز تایید شده است. داده‌های منتشر نشده کوپر و فوزی (۱۹۸۷) به وضوح نشانگر آن است که افزایش حلالیت منگنز می‌تواند در pH اسیدی، اثر سمی بر سویا داشته باشد.

۳-٤- اصلاح خاک‌های ماندابی

بحث‌های زیادی در مورد تبدیل اراضی ماندابی به اراضی زراعی در گرفته است که در اینجا مورد نظر نیست اما باید توجه داشت که صرف نظر از علت مشکل، هنگام فروسایی خاک زراعی در فرایند ماندابی شدن و ایجاد شرایط بی‌هوازی، روش اصلاح باید اثرات منفی شرایط ماندابی را به حداقل رسانده و حاصلخیزی منابع خاک را حفظ نماید. در این رابطه، اهمیت زیست محیطی تالاب‌های طبیعی نباید مورد غفلت قرار گیرد.

از دیدگاه تاریخی و بر اساس اسناد به دست آمده از تمدن‌های باستانی (آدامز، ۱۹۸۱) برخی سیستم‌های زهکشی سطحی در گذشته وجود داشته‌اند. این سیستم‌ها که شامل بسترهای بلند و انهار بودند، باعث زهکشی سریع آب اضافی خاک سطحی شده و حداقل در بخشی از سطح خاک مانع ایجاد شرایط ماندابی دائم می‌گردیدند. ناحیه زهکش و تهویه شده با چنین سیستمی، در دوره‌های متوالی و طولانی حفظ می‌شده است.

اخیراً به عنوان راهی برای جلوگیری از تخریب توان تولیدی اراضی، از سیستم‌های زهکش زیرزمینی استفاده شده است. گمان می‌رود قدیمی‌ترین سازه‌های موجود زهکش زیرزمینی مربوط به کاتو امپراتور روم باشد (ویور، ۱۹۶۴). چنین سیستم‌هایی می‌توانند با زهکشی آب از نیمرخ خاک، آن را در برابر شرایط ماندابی محافظت نمایند و به این وسیله ناحیه دارای تهویه‌ای را در خاک ایجاد کنند که عمیق‌تر و دائمی‌تر باشد. در جایی که خروجی‌های کافی موجود نباشد، استفاده از پمپ برای حصول اطمینان از کاهش تناوب و کوتاه شدن دوره‌های ماندابی شدن خاک توصیه می‌گردد.

اهمیت زهکشی برای اصلاح شرایط ماندابی خاک از دیر زمان مورد مطالعه بوده است (وزارت کشاورزی آمریکا، ۱۹۸۷). کارایی زهکشی در جلوگیری از فروسایی ناشی از شرایط ماندابی خاک، در هر منطقه بر حسب اقلیم، خاک و روش زراعت، متفاوت می‌باشد (کلارک و همکاران، ۱۹۸۸). زهکشی روش اصلاح تضمین‌شده‌ای برای مقابله با فروسایی ناشی از شرایط ماندابی نیست اما می‌تواند دوره‌های

شرایط بی‌هوازی را به حداقل رسانده و با بهبود شرایط تردد، کمک به پیشگیری از شور شدن و کاهش فرسایش خاک، به روند اصلاح خاک کمک کند.

۳-۵- نتیجه‌گیری

خاک‌های حاصلخیز منبعی ارزشمند برای پایداری سطح قابل قبول زندگی بشری محسوب می‌گردند و بایستی کوشش‌های جدی برای جلوگیری از فروسایی خاک - صرف‌نظر از علت آن - صورت گیرد. شرایط ماندابی باعث فروسایی فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. از دست رفتن مقاومت خاک فرسایش آن را تشدید، تراکم خاک را تسهیل و تردد را کند می‌نماید. ایجاد شرایط احیای شیمیایی و زیستی در شرایط بی‌هوازی خاک، منجر به کاهش قابلیت جذب برخی عناصر غذایی ضروری و به ویژه نیتروژن شده و حلالیت برخی عناصر را تا حد سمیت افزایش می‌دهد. زهکشی، ابزاری مدیریتی است که برای محافظت خاک از فروسایی در شرایط ماندابی قابل کاربرد است. زهکشی سطحی و زیرزمینی تا حدی هدف فوق را تامین می‌کند و اغلب اوقات هر دو نوع زهکشی برای کنترل موثرتر آب اضافی در خاک مورد نیاز است.

۳-٦- نگاهی نو به زهکشی

مدیریت ضعیف آبیاری توام با سازه‌های ناکافی زهکشی منجر به آن شده است که اراضی فاریاب در مناطق خشک و نیمه خشک با خطر ماندابی و شور شدن تدریجی و در نهایت تخریب کامل خاک مواجه گردند. برآورد شده است که نیمی از اراضی فاریاب جهان دچار مشکلات مرتبط با زهکشی هستند و ۲۵ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی به علت ایجاد شرایط ماندابی و شوری ناشی از آبیاری نابارور شده (اسمدما، ۲۰۰۰) و۲۵۰ میلیون هکتار از دیمزارها نیز نیازمند بهبود زهکشی‌اند (اسمدما و همکاران، ۲۰۰۰). این روند به دلیل ناکارایی آبیاری و زهکشی ضعیف رو به افزایش است (عبدالدائم، ۲۰۰۰). با نگاهی به آمار تخریب اراضی مشاهده می‌شود که ۷۶/۶ میلیون هکتار از اراضی جهان در اثر شوری ثانویه ناشی از فعالیت‌های انسان (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱) و ۴۳ میلیون هکتار از اراضی فاریاب در مناطق خشک جهان عمدتاً در اثر ایجاد شرایط ماندابی و شور و سدیمی‌شدن تخریب شده‌اند (درگن و همکاران، ۱۹۹۱). شدت تخریب اراضی ناشی از شرایط ماندابی و شور شدن تقریباً ۰/۵ میلیون هکتار در سال برآورد شده است (اسمدما و همکاران، ۲۰۰۰).

با در نظر گرفتن تاثیرات و فواید قابل توجه زهکشی در جنبه‌های زیست محیطی و اجتماعی- اقتصادی و همچنین حوزه‌های سلامت و بهداشت، کاهش خسارت به جاده‌ها و ساختمان‌ها و کنترل سیلاب، بهبود زهکشی را می‌توان ابزار مهمی‌برای دستیابی به توسعه پایدار محسوب نمود. به عنوان نمونه، سهم زهکشی در تولید ناخالص داخلی کشور مصر معادل حدود یک میلیارد دلار (۸ درصد ارزش افزوده بخش کشاورزی) است. بازگشت سرمایه اقتصادی زهکشی در مصر طی سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۲ حدود ۱۹ درصد برآورد گردیده که به صورت افزایش ۲۵-۱۵ درصدی در تولید کشاورزی نمایان شده است (اوکس، ۲۰۰۳).

عدم شناخت اثرات مثبت و اهمیت زهکشی در نیل به توسعه پایدار از یک سو و محدودیت‌های عملی و کمبود سرمایه‌گذاری در احداث زهکش‌ها از سوی دیگر باعث شده است که در سال‌های اخیر کمتر به زهکشی پرداخته شود. برای مثال، در دوره زمانی ۲۰۰۰- ۱۹۷۵ از ۳۸ میلیارد دلار بودجه بانک جهانی برای اجرای ۲۱۸ پروژه توسعه کشا ورزی، تنها ۸/۵ میلیارد دلار (حدود ۱۷ درصد) به پروژه‌های زهکشی اختصاص یافته که حدود نیمی از آن به ۱۶ کشور در مناطق خشک و نیمه‌خشک تعلق گرفته است. این بدان معنی است که متوسط سرمایه‌گذاری در مناطق خشک و نیمه خشک جهان معادل ۱۹۰ میلیون دلار در سال بوده است (عبدالدائم، ۲۰۰۰).

صرف‌نظر از شواهد باستانشناختی، زهکش‌های موجود جهان حدود دو قرن سابقه دارند. دانش زهکشی پس از ارایه معادله‌های بنیادی جریان آب در محیطهای متخلخل توسط دارسی و دوپویی در قرن نوزدهم و کاربرد این معادله‌ها برای جریان آب سفره‌های آزاد به طرف زهکش‌ها توسط روث در آغاز قرن بیستم گسترش یافت. پس از ارایه نظریه‌های هوخهات به عنوان بنیانگذار زهکشی علمی‌در سال ۱۹۳۰، دانش زهکشی علیرغم داشتن پیشینه قابل توجه علمی و عملی در مقایسه با سایر علوم به کندی رشد یافته است. دانشمندان و کارشناسان زهکشی در دهه‌های اخیر عمدتا بر تعیین عمق و فاصله مناسب زهکش‌ها و تهیه مدل‌های ریاضی جهت برآورد تغییرات زمانی و مکانی سطح ایستابی و رابطه آن با فاصله و عمق زهکش‌ها متمرکز شده‌اند (اردکانیان، ۲۰۰۳).

با توجه به این که ایجاد سازه‌های آبی برای تخلیه زه‌آب از نیمرخ خاک نوعی دخالت در وضعیت طبیعی منابع آب و خاک می‌باشد، نمی‌توان اثر این دخالت را مستقل از سایر عوامل در زیست بوم یک منطقه بررسی نمود. در حال حاضر و با ورود به قرن بیست و یکم، مباحث جدیدی در مورد

زهکشی فراتر از جنبه‌های صرفا فنی مطرح شده است. این مباحث جدید عمدتا متکی بر نگرش سیستمی و در نظر گرفتن جنبه‌های گوناگون و به هم پیوسته مدیریت منابع طبیعی می‌باشد.

۳-٦-۱ نگرش جامع به زهکشی

بهره‌برداری پایدار از سیستم منابع طبیعی مستلزم مدیریتی جامع نگر و همه جانبه است که بدون حذف عوامل موثر و با شناخت عمیق روابط متقابل آنها، راهبری، حفاظت و کارکرد بهینه سیستم را تضمین نماید. نکته متناقض‌نما آن است که زهکشی به عنوان یک موضوع و مایه نگرانی، تقریباً از بحث‌های مربوط به آب محو شده و به "عامل از یاد رفته" در مدیریت منابع آب مبدل گشته است (شومان و فریزم، ۲۰۰۱)، اما جبران مافات با بررسی جدی و اصلاح نگرش‌ها امکان پذیر می‌شود. با تمرکز و تاکید برجنبه‌های مشکل دار مرتبط با زهکشی، می‌بایست اثر آن بر بهبود معیشت، کاهش فقر و مدیریت پایدار منابع در جوامع مختلف نشان داده شود. همچنین، با نگرش جامع و پرهیز از جزئی‌نگری در مورد زهکشی به عنوان بخش ضروری مدیریت خاک و آب، جایگاه حقیقی زهکشی باید مشخص شده و به تناقض موجود پایان داده شود.

مدیریت نادرست آبیاری و عملیات زراعی موجب ایجاد شرایط شوری، سدیمی و ماندابی در۴۰ تا۵۰ درصد از مجموع ۲۷۰ میلیون هکتار اراضی فاریاب جهان شده و انجام عملیات زهکشی و کنترل شرایط ماندابی و شوری در ۸۵–۶۰ میلیون هکتار از اراضی را ضروری ساخته است. موفقیت در این امر مستلزم بازنگری و احتمالا طراحی مجدد و تغییر مدیریت زهکش‌ها می‌باشد. دلایل متعددی برای ضرورت تغییر دیدگاه در مورد مفهوم زهکشی و نگاه جامع بر آن وجود دارد که از جمله می‌توان به افزایش پیچیدگی وتقابل منافع در برخی سیستم‌های مدیریت آب؛ لزوم بازنگری اهداف و روش‌های مدیریت خاک و آب به علت تغییر ارزش‌های اجتماعی؛ تنزل اهمیت زهکشی به عنوان بخشی از سیستم منابع طبیعی؛ و ضرورت حضور فعال متخصصان زهکشی برای باز بینی موقعیت آب در زیست بوم اشاره نمود. نگاه جامع به زهکشی همچنین می‌تواند در مورد تامین هزینه‌های مطالعه و طراحی، احداث، مدیریت، بهره‌برداری و نگهداری سیستم زهکشی گره‌گشا باشد. روشن شدن فواید غیر کشاورزی زهکشی ازجنبه‌های بوم شناختی، زیست محیطی، بهداشتی، کنترل سیل، تنظیم سطح ایستابی، حفاظت سازه‌ها، پایداری منابع و آثار اقتصادی– اجتماعی می‌تواند بهره‌برداران گوناگون را به مشارکت در تامین هزینه‌ها و مدیریت زهکش‌ها برای نسل امروز و فردا ترغیب نماید (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۵).

مروری بر تجارب جهانی، دامنه گسترده‌ای از اثرات متفاوت زهکشی بر کارکردهای عمده سیستم منابع طبیعی را نشان می‌دهد. اثرات زهکشی را می‌توان بر کشاورزی، بهداشت، سازه‌ها، جاده‌ها، و محیط زیست مشاهده نمود. در مطالعات موردی انجام شده (بنگلادش، مصر،اندونزی، مکزیک، هلند، پاکستان) درس‌های زیر را می‌توان آموخت (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۳):

- اگرچه اثرات زهکشی بر تولید و بهره‌وری کشاورزی، بنیادی و انکار ناپذیر و نتایج آن در کوتاه مدت قابل مشاهده است اما به علت احتمال تغییر نیازهای زهکشی در طول زمان، طراحی و احداث زهکش مستلزم برنامه‌ریزی بلندمدت و انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن جنبه‌های زیست محیطی می‌باشد. در غیر این صورت، سیستم ایجاد شده پایدار نخواهد ماند و ممکن است صدمات جبران‌ناپذیری بر زیست بوم منطقه وارد آورد.
- جنبه‌های بهداشت عمومی‌و تامین و تصفیه آب شرب در زهکشی اهمیت بسیاری دارد اما معمولاً به خوبی شناخته نشده و بستگی زیادی به کیفیت مدیریت و نگهداری سیستم زهکشی دارند.
- اهمیت زهکشی برای حفاظت از سازه‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط ارتباطی، جاده‌ها و مکان‌های باستانی در مناطق روستایی کمتر مورد توجه و تاکید قرار گرفته است.
- زهکشی کشاورزی غالباً تاثیرات منفی بر کارکرد زیست بوم داشته و همچنین به عنوان مجرایی برای پخش پساب‌ها و آلاینده‌ها عمل کرده است. درعین حال، مواردی از اثر مثبت زهکشی بر محیط زیست نیز مشاهده شده است. لازم است تعادلی میان اثر زهکشی بر افزایش تولید کشاورزی و اثر آن بر محیط زیست برقرار گردد.

۳-۶-۱-۱ *بازنگری یک تجربه*

دره سان یواکین در ایالت کالیفرنیا با اقلیم نیمه خشک دارای اهمیت کشاورزی است. رودخانه سان یواکین، دره را به دو قسمت غربی و شرقی تقسیم می‌کند. در قسمت شرقی دره با خاک سبک، عمدتاً باغداری رایج است و در قسمت غربی با خاک سنگین، محصولات ردیفی کشت می‌شود. متوسط تبخیر و تعرق مرجع در زمستان ۲-۱ میلی متر در روز و در تابستان ۸-۷ میلی‌متر در روز است. متوسط بارندگی حدود ۳۰۰ میلی متر است که عمدتاً در زمستان به وقوع پیوسته و مقدار آن در قسمت شرقی دره بیشتر است. برای تامین آب مورد نیاز، سازه‌ها و شبکه‌های بزرگ آبیاری طی سال‌های ۷۰-۱۹۳۰ در قسمت‌های شمالی منطقه احداث گردید. در قسمت غربی دره، پس از چند دهه آبیاری، به علت وجود

لایه نفوذ ناپذیر در عمق ۱۰۰ متری و آبیاری و آبشویی اضافی، سطح ایستابی بالا آمده و منجر به بروز مشکل شوری گردید. از دهه ۶۰ تا ۸۰ برای خارج کردن آب و املاح اضافی و تامین تهویه مناسب از سیستم‌های زهکشی زیرزمینی استفاده شده است. اخیراً به علت آنکه آب زهکش‌ها حاوی املاح مضر مانند سلنیم درحد سمیت بوده، خروج زه آب‌ها محدود گردیده است. برای رفع این مشکل با توسل به تکنیک‌های مختلف (مانند تبخیر یا کاربرد مجدد زه آب، اختلاط زه آب با آب آبیاری، کاربرد متوالی زه آب یک مزرعه برای مزرعه دیگر و...) سعی در یافتن راه حلی برای حذف زه‌آب خروجی از مزارع با رعایت پایداری در زیست بوم موجود شده است.

اما حکایت، همچنان باقی‌ست. حتی زهکشی کنترل شده که همراه با بالا نگهداشتن سطح ایستابی و استفاده از آب زیرزمینی برای تامین قسمتی از نیاز آبی گیاه می‌باشد نیز در حال آزمون با مطالعات لایسیمتری است و احتمالاً نیل به اهداف کشاورزی پایدار همچنان دشوار خواهد بود. نتایج حاصل از آزمایش‌های زهکشی کنترل شده نشان داده است که هشت درصد نیاز آبی پنبه، ۲۵ درصد نیاز آبی گلرنگ و ۱۵ درصد نیاز آبی یونجه (در سال اول) از آب زیرزمینی تامین شده است. تعیین میزان تحمل گیاه نسبت به اعمال تنش آب و املاح و نحوه مدیریت آبیاری در این روش نیازمند انجام بررسی‌های بیشتر است (سوپ و همکاران، ۲۰۰۳).

۳-۶-۱-۲ نگرش جامع و توسعه پایدار

گام اول تغییر دیدگاه در مورد زهکشی ارائه تعریفی از زهکشی به صورت ذیل است: "زهکشی عبارت است از مدیریت خاک و آب به وسیله خارج کردن آب سطحی اضافی و تنظیم سطح ایستابی کم عمق با هدف دستیابی به منافع اقتصادی و اجتماعی به صورتی که با حفاظت از کارکردهای کلیدی زیست بوم همراه باشد". با نگاهی تخصصی تر، مدیریت جامع زهکشی شامل موارد ذیل است (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۵):

- شناسایی اهداف چند گانه مدیریت سطح ایستابی کم عمق و تخلیه آب سطحی اضافی و همچنین نیازهای باز تولید سیستم طبیعی در طول زمان (پایداری منابع).
- سازگار نمودن تداخل کارکردهای زهکشی با سیستم منابع طبیعی با در نظرگرفتن تنوع عوامل و موقعیت‌های زهکشی و با هدف بهینه‌سازی تولید کالا و خدمات در سیستم منابع طبیعی (برنامه‌ریزی و مدیریت عوامل و کارکردهای چندگانه زهکشی).

- ضرورت در نظر گرفتن خواسته‌ها و توانایی‌های بهره‌برداران مختلف در سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری در مورد زهکشی (دموکراتیزاسیون).
- اصلاح مبانی علمی‌برای تغییر دیدگاه دانشمندان و کارشناسان زهکشی در جهت رعایت پایداری، چند جانبه بودن و خواسته‌های بهره‌برداران در فرایند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری.

۳-۶-۱-۳ آموزه‌ها و گام‌های پیش رو

آموزه‌های عمومی‌حاصل از تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد:

الف) ما نیازمند تهور در شناسایی و معرفی همه اثرات مثبت و منفی احداث سیستم زهکشی با توجه به همه هزینه‌ها و فایده‌ها هستیم که ممکن است مستلزم طراحی مجدد و مدیریت چند منظوره سیستم، اعمال قیمت‌های عادلانه و جبران خسارات همه کسانی که از احداث زهکش آسیب دیده‌اند، باشد.

ب) احداث سیستم زهکشی در یک منطقه به تنهایی نمی‌تواند به رفع فقر و بهبود معیشت بهره‌برداران منجر شود. نادیده گرفتن برخی کارکردهای خاک و آب و بی‌توجهی به علایق بهره‌برداران، علت اصلی ناپایداری سیستم‌های زهکشی و فقیر شدن یا بهبود نیافتن معیشت برخی افراد بوده است (بانک جهانی، ۲۰۰۲). مطالعه دقیق برای شناخت پتانسیل‌های منابع طبیعی و خواسته‌های بهره‌برداران، و همچنین توجه به تاثیر دوسویه میان زهکشی و فقر از سوی مدیران، برنامه ریزان و سیاست‌گزاران می‌تواند احداث زهکش را به عنوان گامی در جهت فقرزدایی مطرح نماید.

ج) تجربه‌های اندکی از اجرای پروژه‌های دوراندیشانه زهکشی با دیدگاه چندمنظوره و جامع، به ویژه در کشورهای در حال توسعه وجود دارد که برداشتن گامی‌بزرگ به سوی تغییر دیدگاه‌ها را دشوار می‌سازد. تغییر گام به گام و مستمر دیدگاه‌ها شامل تغییر سیاست‌های توسعه و مدیریت زهکشی به عنوان راهی عملی برای ایجاد تغییر ترجیح داده می‌شود (بانک جهانی، ۲۰۰۲). با وجود این، تغییر الگوها در جهت نیل به دیدگاه زهکشی جامع ضرورت دارد و فرصتی را فراهم می‌سازد تا نه تنها اثرات جانبی کاربرد فناوری به خوبی شناخته شود بلکه معضلات اصلی سیستم رایج زهکشی کشاورزی نیز از میان برداشته شود.

د) تغییرات باید با آموختن و اصلاح دانسته‌ها آغاز گردد. در گام اول، شناخت وضعیت موجود، مشکلات و نیازهای ویژه زهکشی ضروری است. تنظیم سیاست‌ها، ارائه راه حل‌ها، برنامه‌ریزی جامع و اجرای زهکشی مستلزم جمع‌آوری و استفاده از اطلاعات موجود در چارچوب‌های خاص تحلیل مانند *"DrainFrame"* می‌باشد.

ه) دولت‌ها و مراکز تحقیقاتی وابسته به آنها و همچنین مجامع علمی و سیاست‌گذاری بین المللی می‌توانند در ارتباط با مباحث مختلف و مهمی‌مانند محیط زیست، مدیریت آب، توسعه پایدار کشاورزی، تامین و تصفیه آب، و توسعه اجتماعی پیشگام تغییر دیدگاه‌ها بوده و حرکت به سوی نگرش جامع به زهکشی را تسهیل و تسریع نمایند (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۵).

۳-۶-۱-٤ نتیجه گیری و پیشنهادها

پذیرش ایده طراحی و مدیریت چند منظوره زهکش‌ها، تعیین اندازه مناسب سیستم، برنامه‌ریزی اجرا، مدیریت، بهره‌برداری و نگهداری و همچنین، پیش‌بینی اثرات آن را دشوار می‌سازد. به طورکلی، طرح‌های کوچک با اهداف مشخص، امکان مشارکت موثر بهره‌برداران و نهادهای مختلف را بیشتر فراهم می‌نماید. در هر حال، علاوه برجنبه‌های فنی، مسایل اجتماعی – اقتصادی نیز باید مورد توجه قرارگیرد. پیشنهاد بانک جهانی برای استراتژی منابع آب در سال ۲۰۰۳ که براستفاده کارا، عادلانه و پایدار از آب و در نظرگرفتن زهکشی به عنوان جزئی از مدیریت جامع منابع طبیعی تاکید دارد، می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری محسوب گردد. به دلیل ماهیت متغیر و پویای منابع طبیعی (از جمله آب و خاک) سیاست‌گذاری در مورد آن می‌بایست انعطاف پذیر و قابل تجدیدنظر باشد. گام‌های اصلی این سیاست‌ها شامل موارد ذیل است (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۵):

- نگرش جامع به موقعیت زهکشی
- شناسایی مشکلات و اولویت‌ها
- آینده‌نگری و تعیین اهداف بلند مدت
- برداشتن گام‌های کوچک و فرصت‌طلبانه در جهت بهینه‌سازی معیارها و کیفیت زهکشی چند منظوره
- فراهم نمودن امکانات اداری و نهادی و تعریف مسئولیت‌ها
- در نظرگرفتن اهداف مرحله‌ای و تقویم زمانی
- ایجاد مکانیزم خودآموزی و اصلاح

افزون بر این، طراحی زهکش و راه کارهای مدیریت سیلاب می‌بایست هماهنگ بوده و سیستم زهکشی و سازه‌های آن باید به گونه‌ای اجرا شود که توان کاستن از سرعت و حجم رواناب را داشته باشد. به منظور کنترل آلودگی، پیش‌بینی سازه‌ها و امکاناتی در سیستم زهکشی برای کنترل و

بهبود کیفیت زه آب خروجی و قابلیت استفاده مجـدد از زه آب ضـرورت دارد کـه در اغلـب پـروژه‌هـای موجود، از آن صرف‌نظر شده است. اثرات زهکشی بر بهداشت عمومی، شیوع بیماری‌ها وکیفیت آب شرب و روش‌های بهبود کارایی سیستم زهکشی از جهت بهداشتی نیز می‌بایست مورد توجه و تاکید بیشتر قرار گیرد (عبدالدائم و همکاران، ۲۰۰۳).

نگرش جامع به زهکشی با پیچیده‌تر شدن فناوری‌های مورد نیاز برای طراحی، اجرا و مـدیریت زهکشی همراه است. طراحی و مدیریت چند منظوره زهکش‌ها همچنان استثنائی در میان قاعـده جـاری است، اما در صورت رایج شدن آن، اهـدافی ماننـد افـزایش بهـره‌وری و حفاظـت آب و خـاک، حفاظـت سازه‌ها، بهداشت عمومی، کنترل سیل، بهبود زیست بوم و... نیز قابل دستیابی می‌باشد. در صورت تعریف مجدد زهکشی به صورت مدیریت سطح ایستابی، قابلیت کنترل عمق سطح ایستابی و سطح آب درکانال زهکشی اهمیت چشمگیری پیـدا کـرده و امکـان تنظـیم مـوارد مهمـی همچـون رطوبـت خـاک بـرای محصولات دیم و فاریاب، آب لازم برای پرورش آبزیان، جلوگیری از نشسـت اراضـی، موازنـه شـیمیایی عناصر غذایی در خاک و... فراهم می‌گردد. کنترل سطح ایستابی برای مصارف گوناگون با رعایـت منـافع بهره‌برداران مختلف، علاوه بر جنبه‌های تکنیکی مستلزم وجود نهادهای اداری مناسب، تـوام بـا حـداکثر مشارکت بهره‌برداران می‌باشد.

۳-٦-۲ زهکشی و تغییرات اقلیمی

طی دو قرن گذشته، زهکشی سطحی و زیرزمینی درکشورهای توسعه یافته به سرعت گسترش یافته است. درحال حاضر سازه‌های احداث شده، فرسوده یا تخریب شده و نیازمند بازسازی یـا جـایگزینی می‌باشد و لذا طراحی و ساخت مجدد برای بهبود تولید پایدار کشاورزی ضرورت یافتـه اسـت. افـزون بـر این، شرایط زیست محیطی از نیمه دوم قرن بیستم به بعد تغییـر یافتـه و موضـوع گـرم شـدن زمـین و تغییرات اقلیمی مورد توجه روزافزون قرارگرفته است. بالا آمدن سطح ایستابی در مناطق معتـدل مشـکل آفرین شده و در مناطق خشک با بروز مشکل شوری توام گشته است. در مناطق مرطوب و حاره‌ای، رشد فزاینده جمعیت و کشاورزی فشرده توجه به کنترل سیلاب را ضروری سـاخته اسـت. در همـه اقلـیم‌هـا، عوامل مشکل‌زا به خوبی شناخته شده‌اند اما عدم قطعیت ناشی از تغییرات اقلیمی، قیمـت‌هـای جهـانی و تجارت بین‌المللی حل مشکل را دشوار ساخته است (دراشین و فدس، ۲۰۰۳).

سیستم‌های زهکشی معمولاً برای کاربرد در زمان طولانی و با فرض تغییر نیافتن شرایط اقلیمی طراحی می‌شود درحالی که به علت گرم شدن زمین و اثر گلخانه‌ای چنین فرضی نادرست می‌نماید. دامنه عدم قطعیت در شرایط اقلیمی و اثر آن بر سیستم‌های زهکشی، تعریف معیارهای جدید طراحی، حدود بحرانی، برنامه مقابله با حوادث غیر مترقبه و سیاست‌های مدیریت آب را دشوار ساخته است. برنامه‌ریزان، سیاست‌گزاران، طراحان، محققان و مجریان سیستم‌های زهکشی با توجه به این عدم قطعیت و با هدف نیل به کشاورزی پایدار باید آماده تجدیدنظر در روند توسعه سیستم‌های زهکشی، فناوری‌های مورد استفاده، الگوی سازمانی و اعتباری، اولویت‌های تحقیقاتی و برنامه‌ریزی نیروی انسانی باشند. تغییرات اقلیمی در بلند مدت حائز اهمیت بوده و دسترسی به داده‌های آب– اقلیمی پیش نیاز ضروری برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت صحیح سیستم‌های زهکشی خواهد بود (دراشین و فدس، ۲۰۰۳).

۳-۶-۲-۱ گذشته، حال، آینده: افق ۲۰۲۵

توسعه سیستم‌های زهکشی عمدتاً در دو قرن اخیر صورت پذیرفته است. پیش از آن، در مناطق خشک، کشاورزی غیرفشرده با سطح ایستابی بسیار پایین‌تر از عمق ریشه و در مناطق مرطوب، کاشت گیاهان مقاوم به نوسان سطح ایستابی رایج بوده است و لذا ضرورتی برای تعبیه سیستم زهکشی احساس نمی‌شده است. از نیمه قرن بیستم به بعد، افزایش فشار جمعیت و ضرورت افزایش قابل توجه تولیدات کشاورزی توام با ضعف مدیریت اراضی فاریاب منجر به گسترش شرایط ماندابی و شور در اقلیم‌های مختلف شده و طراحی سیستم‌های زهکشی را ضروری ساخته است. با فرض توسعه ۰/۵ تا ۱ میلیون هکتار در سال زهکشی (همراه با اصلاح و بازسازی زهکش‌های موجود) وضعیت آینده زهکشی در افق زمانی ۲۰۲۵ را می‌توان چنین ترسیم نمود (دراشین و فدس، ۲۰۰۳):

- اراضی فاریاب: زهکشی در اغلب اراضی فاریاب از جهت مقابله با شرایط ماندابی و شوری ضروری خواهد بود. پروژه‌های الگویی در مناطق ماندابی و شور به منظور اصلاح و آزمون فناوری‌ها و همچنین آموزش نیروی انسانی نیز می‌بایست احداث شوند. پایش سطح ایستابی، مطالعه بیلان آب و استفاده متوازن از آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز باید به خوبی مورد توجه قرار گیرند. موارد فوق باید به صورت برنامه‌ای عملی و مدون در اختیار دست‌اندرکاران قرار گیرد. برنامه واقع‌بینانه در این خصوص

شامل احداث ۱۵–۱۰ میلیون هکتار زهکش روباز و ۳–۲ میلیون هکتار زهکش زیرزمینی (عمدتاً در کشورهای در حال توسعه) است که معادل تولید حاصل از ۴–۳ میلیون هکتار از اراضی فاریاب می‌باشد.

- اراضی دیم: بر اساس برآوردهای انجام شده، حدود یک سوم اراضی دیم جهان به طور طبیعی زهکشی کافی ندارند و برای افزایش پایدار تولید و جلوگیری از ایجاد شرایط سیلابی و ماندابی موقت، سرمایه گذاری برای بهبود زهکشی آنها ضروری و سودآور خواهد بود. دراین صورت، ۳۰۰–۲۵۰ میلیون هکتار از دیم‌زارها نیازمند بهبود زهکشی‌اند. در یک برنامه میان مدت واقع‌بینانه می‌توان ۳۰–۲۵ میلیون هکتار از آنها را که عمدتاً در نواحی حاره مرطوب جنوب آسیا واقع شده‌اند را اصلاح نمود. بهبود زهکشی در شرایط فوق منجر به ۳۰–۲۰ درصد افزایش تولید (معادل تولید ۷–۶ میلیون هکتار از دیم‌زارها) می‌گردد.
- چالش‌های فراروی سیستم‌های زهکشی در صورت وقوع تغییرات زیست محیطی: به کار بستن تمهیدات فوق‌الذکر ممکن است منجر به افزایش تولید به میزان ۱/۵–۱ درصد در اراضی فاریاب و۱–۰/۵ درصد در اراضی دیم (متوسط جهانی یک درصد) در افق ۲۰۲۵ گردد. این یک درصد افزایش تولید ناچیز به نظر می‌رسد و نشانگر آن است که امروزه، زهکشی به اندازه گذشته در تولید غذا اهمیت ندارد اما نقش آن در حفظ سطح تولید کنونی (به ویژه در اراضی فاریاب) انکار ناپذیر است. بدون احداث سیستم زهکشی، تولید محصولات کشاورزی در قسمت عمده‌ای (احتمالاً بیش از یک سوم) از اراضی فاریاب در مناطق خشک و نیمه خشک به صورت پایدار امکان‌پذیر نخواهد بود. این اراضی ممکن است با تبدیل به اراضی ماندابی و شور، به کلی از حیز انتفاع خارج شوند. دراین رابطه، فشار ناشی از تغییر نیازها، تقاضاها و شرایط اجتماعی– اقتصادی نیز ممکن است از پایداری سیستم تولید بکاهد. در افق ۲۰۲۵، بسیاری از تاسیسات و سازه‌های مربوط به زهکشی نیازمند بازسازی، اصلاح یا طراحی و اجرای مجدد با در نظر گرفتن عوامل مختلف مانند فناوری‌های نو، حفظ محیط زیست، تقویت نهادها، ارزیابی مالی و اقتصادی، توسعه نیروی انسانی و امکانات تحقیقاتی خواهند بود.

۳-۶-۲-۲ تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف جهان و اثر آن بر مدیریت جامع منابع آب

در مناطق خشک و نیمه خشک، قریب به اتفاق اراضی فاریاب به علت شرایط خاص اقلیمی در معرض شوری یا شرایط ماندابی می‌باشند. اگر چه آمار موثقی در مورد گستره اراضی ماندابی و شور وجود ندارد اما برآورد شده است که در حال حاضر ۱۲۰–۱۰۰ میلیون هکتار از اراضی فاریاب در مناطق خشک

و نیمه‌خشک دچار مشکلات ماندابی و شوری هستند که سالانه ۱-۰/۵ میلیون هکتار بر وسعت آنها افزوده می‌شود (اسمدما، ۲۰۰۰). با این وضعیت، توسعه پایدار بخش کشاورزی مستلزم بازنگری و اصلاحات اساسی در ساخت، بهره برداری، مدیریت و اجرا و بهره‌وری سیستم‌های آبیاری و زهکشی موجود می‌باشد (دراشین، ۲۰۰۱).

در مناطق معتدل، کشاورزی عمدتاً به صورت دیم است و به منظور تنظیم سطح ایستابی درحد مطلوب، سیستم‌های زهکشی زیرزمینی و روباز تعبیه گردیده است. عمده‌ترین اثر سیستم زهکشی در اراضی این مناطق، فراهم ساختن امکان خاک‌ورزی در زمان مناسب است. با توجه به اهمیت اساسی طول دوره روز در مناطق معتدل، تهیه بستر بذر و خاک ورزی در اوایل فصل کشت عاملی مهم برای دستیابی به حداکثر محصول می‌باشد. با توجه به توزیع نامناسب بارندگی در این مناطق، ممکن است آبیاری تکمیلی ضرورت یابد که با استفاده از آب‌های زیرزمینی غیر شور صورت می‌گیرد.

پیش‌بینی مدل‌های تغییر اقلیم برای سه ناحیه اصلی کشاورزی– اقلیمی به قرار زیر است (دراشین و فدس، ۲۰۰۳):

- مناطق خشک و نیمه خشک: این مناطق به تغییرات اقلیمی‌بسیار حساس‌اند به گونه‌ای که با افزایش یک الی دو درجه سانتی‌گراد دمای هوا و۱۰ درصدکاهش بارندگی، جریان سالانه رودخانه‌ها ۷۰-۴۰ درصد کاهش می‌یابد. اثر گلخانه‌ای ناشی از افزایش غلظت CO_2 به شدت بر فیزیولوژی گیاهان و پتانسیل تبخیر و تعرق تاثیر می‌گذارد. در غلظت CO_2 بالاتر از حد معمول، از شدت تبخیر و تعرق کاسته شده و در عین حال با افزایش بارندگی از نیاز آبی گیاه کاسته می‌شود اما این اثر به نوع گیاه نیز بستگی دارد. کیمبال و همکاران (۲۰۰۳) نشان داده‌اند که افزایش غلظت CO_2 تا ppm ۵۵۰ می‌تواند تبخیر و تعرق گندم زمستانه را حدود ۱۱ درصد کاهش دهد.
- مناطق مرطوب: بررسی اثرات گرمایش جهانی بر منابع آب مناطق مرطوب، عمدتا بر مبنای مطالعات انجام شده در حوضه‌های آبریز کشورهای هند، اندونزی، سری لانکا، اروگوئه، ونزوئلا و ویتنام صورت گرفته است. به عنوان نمونه، در هند و اروگوئه با فرض دو برابر شدن CO_2 و کاربرد مدل‌های مختلف، نتایج متفاوتی به دست آمده است اما همه مدل‌ها بر افزایش رواناب در اثر افزایش یک الی دو درجه سانتی‌گراد دمای هوا صحه گذارده‌اند.
- مناطق معتدل: تغییر عمده در مناطق معتدل در رژیم آبی و توزیع فصلی رواناب صورت می‌گیرد. به طور کلی، در اغلب مناطق معتدل و مرطوب، گرم شدن زمین منجر به افزایش میانگین رواناب سالانه می‌گردد. بیشترین افزایش رواناب به علت اثر افزایش دما بر کاهش پوشش برف و افزایش

بسامد وقوع و شدت سیل در زمستان واقع می‌شود. چنین اثراتی در نواحی که ذوب برف در بهار صورت می‌گیرد مشهودتر است. بنابراین، بسامد وقوع سیل و خشکی در زمستان و تابستان ممکن است معکوس شود.

در شرایط اقلیمی موجود، بهره‌وری بالا و انعطاف پذیری سیستم زهکشی و نهادهای اداری مربوطه می‌تواند مقابله با تغییرات احتمالی آینده را تسهیل نماید. فردریک و همکاران (۱۹۹۷) فرایند پنج مرحله‌ای برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی با در نظر گرفتن احتمال تغییرات اقلیمی را پیشنهاد نموده‌اند. در گام اول، معنی‌دار بودن احتمال تغییرات اقلیمی‌مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم، اثرات تغییر اقلیم بر منطقه مورد نظر برآورد می‌شود. گام سوم شامل تعیین برنامه‌های جایگزین و راهبردهای سازه ای و غیرسازه‌ای (مانند تغییر بهره‌برداری و مدیریت سیستم و سیاست‌های قیمت گذاری) می‌گردد. درگام چهارم، ارزیابی گزینه‌های مختلف بر مبنای محتمل‌ترین شرایط در آینده و با فرض وجود یا فقدان برنامه زهکشی صورت می‌گیرد. در نهایت، گزینه‌های مختلف از جنبه‌های گوناگون مقایسه شده و برنامه توسعه مناسب انتخاب می‌شود. انعطاف‌پذیری برنامه توسعه در مقابل تغییرات احتمالی و پیش‌بینی واکنش‌های مناسب اگر چه ممکن است مستلزم صرف هزینه و زمان بیشتر برای طراحی باشد، اما پارامتری ارزشمند در فرایند برنامه‌ریزی محسوب می‌گردد.

برآورد هزینه- فایده برای درنظر گرفتن تغییرات احتمالی اقلیم در طراحی سیستم‌های زهکشی به عوامل متعدد از جمله سطح برنامه‌ریزی (منطقه ای، ملی، بین المللی)، قابل اعتماد بودن سناریوهای برآورد، شرایط هیدرولوژیک، افق زمانی برنامه و یا طول عمر پروژه بستگی دارد (دراشین و فدس، ۲۰۰۳).

۳-۶-۲-۳ نتیجه گیری و پیشنهادها

اقلیم زمین از زمان‌های دور در معرض تغییر و تحولات طبیعی بوده است. تدریجی و کند بودن این تغییرات به موجودات زنده و محیط زیست آنها فرصت تطابق و سازگاری را می‌داده است. اما تغییرات اقلیمی‌سریع در قرن اخیر که ناشی از فعالیت‌های انسانی - با انگیزه تولید غذا برای جمعیت روز افزون و تامین رفاه بیشتر برای آنها- بوده به وضعیتی منجر شده است که شناسایی و مقابله با آن اولویتی اساسی در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری محسوب می‌گردد. افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، نابودی جنگل‌ها، توسعه شهر نشینی، تغییر کاربری اراضی و عملیات نامناسب زراعی از جمله عوامل تغییرات

اقلیمی‌ست که منجر به افزایش دمای هوا، و به تبع آن مختل شدن چرخه آب، تغییر شدت تبخیر و تعرق، شدت و بسامد بارندگی، دبی جریان رودخانه، رطوبت خاک و الگوی تغذیه آب‌های زیرزمینی گردیده است.

در حال حاضر، سیستم‌های زهکشی بر مبنای اطلاعات گذشته در مورد دما، بارندگی و نیاز آبی گیاهان و با در نظر گرفتن طول عمر بیش از ۵۰ سال طراحی می‌شوند، در حالی که اطلاعات گذشته راهنمای قابل اعتمادی برای کاربری‌های آینده محسوب نمی‌گردند. چالش امروز، شناسایی راهبردهای کوتاه مدت برای مقابله با عدم قطعیت‌های بلند مدت است.

تغییرات جهانی اقلیم اثرات عمده ای برکمیت وکیفیت منابع آب خواهد داشت. گرم شدن زمین ممکن است بر الگوی بارندگی، شدت تبخیر وتعرق، زمان و شدت وقوع رواناب، بسامد و شدت طوفان‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و وقوع سیلاب در اراضی ساحلی اثر بگذارد. همچنین تغییرات دما و بارندگی می‌تواند تقاضای مصرف‌کنندگان آب (کشاورزی و غیرکشاورزی) را متاثر سازد. همچنین، گرم شدن زمین و پدیده گلخانه‌ای اثرات عمده‌ای بر سیستم زهکشی بر جای خواهد گذاشت. برخی از این اثرات، مستلزم تجدید نظر در پارامترهای طراحی (شامل تغییر در مقدار بارندگی و الگوی رواناب، بالا آمدن سطح آب دریاها، سیل‌گیری اراضی فاریاب ساحلی، وکاربری اراضی) است و ایجاد تغییر در اصول برنامه‌ریزی را ضروری می‌سازد. بالا رفتن دمای هوا منجر به شتاب گرفتن چرخه آب، تغییر الگوی بارش و شدت و زمان رواناب و تغییر شدت و بسامد سیل و خشکسالی می‌گردد. دمای بالاتر هوا همچنین باعث افزایش شدت تبخیر و تعرق و تغییر وضعیت رطوبت خاک و سرعت نفوذ می‌شود. عدم قطعیت‌ها در چگونگی و زمان وقوع تغییر اقلیم و نحوه سازگاری سیستم زهکشی با این تغییرات، ازعمده ترین چالش‌های پیش روی برنامه ریزان و طراحان سیستم زهکشی محسوب می‌گردد. پرسش اولیه این است که بر اساس سناریوهای موجود در چه زمانی تغییرات اقلیمی در یک منطقه به طور معنی‌داری بر سیستم زهکشی تاثیر می‌گذارد و شدت این تاثیر تا چه حد است؟ پرسش بعدی پیش‌بینی نحوه مقابله با این تغییرات است. در طراحی زهکش‌های جدید باید با محاسبه هزینه‌ها در حالت‌های مختلف (مانند فرض عدم تغییر اقلیم یا فرض تغییر اقلیم با سناریوهای متفاوت) و برآورد سود حاصله، گزینه مناسب انتخاب گردد.

ارزیابی تغییرات اقلیمی و اثرات آن با وجود ابداع مدل‌های برآورد و پایش پارامترها، همچنان با عدم قطعیت روبروست و نه تنها در برنامه‌ریزی‌های آینده، بلکه در سنجش برنامه‌های موجود نیز به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است. اکنون، پرسش اصلی این نیست که برای توسعه سیستم‌های آبیاری

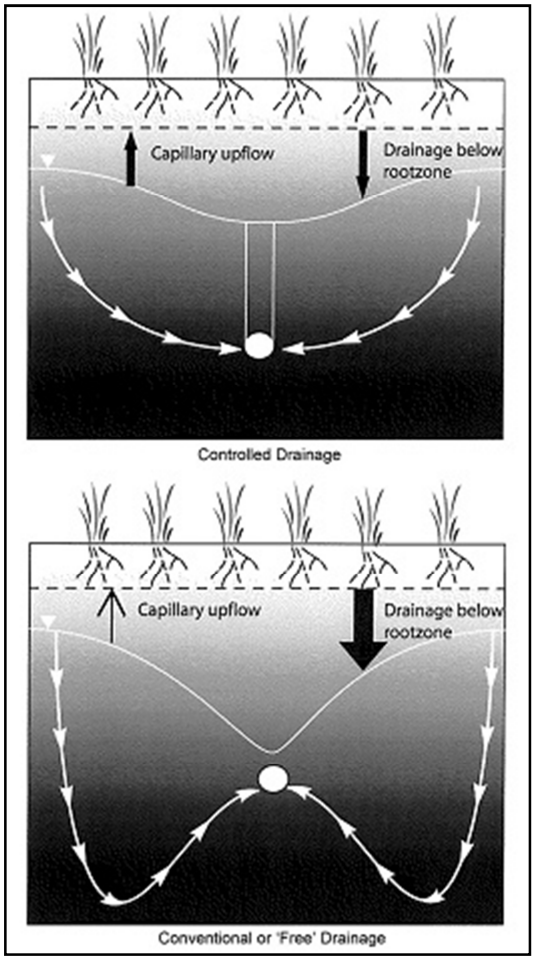
وزهکشی در ۵۰ یا ۱۰۰ سال آینده چه باید کرد بلکه مهم‌تر از آن تعیین راهبردهای دوراندیشانه برای مقابله با تغییرات در همین چند سال آینده است. نگاه جامع و همه جانبه به طراحی زهکش‌ها با توجه به احتمال تغییرات اقلیمی مستلزم انجام تحقیقات در مورد فرایند تغییرات اقلیمی‌در مقیاس جهانی و منطقه‌ای و رابطه اقلیم و هیدرولوژی؛ اثرات افزایش CO_2 اتمسفر بر پوشش گیاهی و رواناب؛ و اثر متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارندگی بر تقاضای آب و کارایی سیستم‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد.

۳-۶-۳ زهکشی کنترل شده

۳-۶-۳-۱ مقدمه

زهکشی به عنوان بخشی از مدیریت سطح ایستابی برای ایجاد شرایط قابل تردد و انجام عملیات مزرعه‌ای، حفاظت گیاه از شرایط ماندابی، و کنترل شوری خاک ضرورت دارد. اما در برخی شرایط و بعضی اقلیم‌ها حداکثر ظرفیت زهکشی طراحی شده ممکن است در همه مراحل رشد گیاه لازم نباشد و نهایتا کاهش محصول در اثر کمبود بارندگی و رطوبت خاک را نیز در پی داشته باشد. در این حالت، زهکشی کنترل شده روشی مناسب برای مدیریت سطح ایستابی است تا ضمن تامین هدف زهکشی، از اتلاف آب و عناصر غذایی و انتقال آلاینده‌ها جلوگیری گردد (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶). با انجام زهکشی کنترل شده سطح ایستابی بالا آمده و شدت زهکشی و مقدار زه آب کاهش می‌یابد. در این حالت، آب ذخیره شده در نیمرخ خاک برای تامین بخشی از نیاز آبی گیاه قابل استفاده خواهد بود و می‌تواند کمبود آب در برخی دوره‌های زمانی رشد گیاه را تامین نماید و لذا تنش‌های خشکی را کاهش دهد (شکل ۲۳).

باید توجه نمود که نیازهای زهکشی به علت تغییرات فصلی اقلیم، حساسیت متفاوت گیاهان به شرایط ماندابی یا عوامل دیگر، در طول سال متفاوت است. با زهکشی کنترل شده، متناسب با نیازها و شرایط مزرعه می‌توان سطح ایستابی را در طول فصل زراعی مدیریت نمود به طوری که مثلاً زهکشی کامل، محدود به دوره تهیه بستر بذر شود. مقدار افزایش محصول و کاهش آب کاربردی در مزرعه در اثر اجرای زهکشی کنترل شده به شرایط اقلیمی و مقدار بارندگی در هر سال بستگی دارد و ممکن است در سال‌های مختلف واکنش گیاه به زهکشی کنترل شده متفاوت باشد.



شکل ۲۳- مقایسه جریان آب در سیستم‌های زهکشی زیرزمینی (آیارز و همکاران، ۲۰۰٦)

با توجه به کند بودن واکنش خاک به تغییر سطح ایستابی و تفاوت این واکنش در بافت‌های مختلف خاک، مهمترین تصمیم‌گیری در زهکشی کنترل شده، یافتن سطح ایستابی مطلوب و زمان تنظیم آن است تا ضمن جلوگیری از ماندابی شدن خاک، حداکثر استفاده از رطوبت موجود در آن با در نظر گرفتن عمق ریشه صورت پذیرد. این موضوع به ویژه در خاک‌های دارای بافت سنگین اهمیت دارد؛ زیرا ممکن است زمان لازم برای رسیدن به سطح ایستابی مورد نظر آنقدر طولانی باشد که منجر به وقوع شرایط نامطلوب ماندابی گردد (پارسونز و همکاران، ۱۹۹۰).

۳-۶-۳-۲ اهداف و ضرورت‌ها

اهداف مدیریت سطح ایستابی و زهکشی کنترل شده شامل تمامی‌هدف‌های زهکشی معمولی به علاوه حفاظت آب خاک، افزایش محصول با کاهش یا حذف تنش کم آبی، کاهش انتقال عناصر غذایی و آلاینده‌ها از طریق زه آب می‌گردد. اولویت هر هدف به شرایط و نیازهای سیستم بستگی دارد (بانک جهانی، ۲۰۰۲). دستیابی به این اهداف به شرایط اقلیمی (که در هر سال و فصل زراعی متفاوت است)، نوع خاک و محصول و شرایط و امکانات منطقه اجرا بستگی دارد. به بیان دیگر، اهداف طراحی زهکش در سیستم مدیریت بهینه آب، معمولاً زهکشی در حد نیاز در دوره مرطوب و به حداقل رساندن هدر رفت آب در دوره خشک را شامل می‌شود. چنین سیستمی اغلب به عنوان زهکشی کنترل شده نامیده شده است. در سیستم زهکشی کنترل شده، در خروجی زهکش ابزار کنترلی تعبیه می‌گردد تا اتلاف آب در دوره خشک را کاهش داده و در دوره مرطوب امکان جریان زه آب را فراهم نماید (پارسونز و همکاران، ۱۹۹۰). به عبارت دیگر، هدف زهکشی کنترل شده، مدیریت شرایط رطوبتی در مزرعه با تنظیم سطح ایستابی در نیمرخ خاک است که به منظور به دست آوردن سود بهینه از آب قابل دسترس در عین بهبود کیفیت زه آب صورت می‌گیرد. در فصل رشد، با تنظیم سطح ایستابی در حد مطلوب می‌توان رطوبت مورد نیاز در ناحیه ریشه گیاه را با صعود موئینه‌ای فراهم نمود.

۳-۶-۳-۳ اهمیت و سودمندی

تا سال ۲۰۳۰، برای تامین غذا در کشورهای در حال توسعه، مقدار تولید اراضی فاریاب باید ۸۰ درصد افزایش یابد. چنین افزایشی با افزودن ۸۰ درصدی منابع آب و کاربرد روش‌های اصلاح ژنتیک امکان پذیر نیست و تنها چاره مسأله، افزایش کارایی مصرف آب و نگرش جامع به مدیریت آب و خاک است. طبق برآورد یونسکو، به طور میانگین و در سطح جهانی تنها ۴۵ درصد از آب مصرفی کشاورزی به طور مؤثر توسط گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد (ولوتمان و یانسن، ۲۰۰۳).

معمولا در اغلب نقاط جهان، طراحی، اجرا و مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی به طور جداگانه صورت گرفته است و لذا در بیشتر مواقع آبیاری بیش از حد نیاز صورت می‌گیرد. چنین وضعیتی منجر به اتلاف آب و کود در کشاورزی و آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی گردیده است (وهبا و همکاران، ۲۰۰۳). زهکشی کنترل شده جزء مهمی از مدیریت تلفیقی (یکپارچه) منابع آب و عملیات

مدیریتی بهینه[1] *(BMP)* محسوب می‌گردد. نقش زهکشی معمول هنوز حائز اهمیت است اما متناسب با تغییر دیدگاه‌ها، اهداف دیگری نیز باید در برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت زهکش‌ها در نظر گرفته شوند. دیدگاه‌های معمول زهکشی متکی بر حداکثر زهکشی و قابل تردد شدن زمین استوار بوده‌اند اما اکنون حفظ و ذخیره رطوبت و کاربردهای مجدد و چندگانه زه آب مورد نظرانـد. در حال حاضر سیستم‌های زهکشی نباید بدون توجه به کنترل کمی و کیفی زه آب طراحی شوند و حتی سیستم‌های موجود نیز باید به ابزار کنترل زهکشی مجهز گردند که در سطح مزرعه توسط کشاورزان قابل بهره‌برداری باشد. توجه به این امر در مقیاس حوضه آبخیز مستلزم توجه بیشتر سیاست‌گذاران و برنامه ریزان می‌باشد (ولوتمان و یانسن، ۲۰۰۳).

زهکشی کنترل شده گرچه با نام‌های دیگر، از سال‌های دور در برخی مناطق جهان اجرا می‌شده است. اساس زهکشی کنترل شده، محدود کردن خروج آزاد زه آب در حد نیاز و بر اساس معیارهای از پیش تعیین شده مدیریت آب است. زهکشی در اقلیم‌های مرطوب تابع بارندگی و در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک تابع آبیاری و باران‌های حاره ای[2] است. در سال‌های خشک، بهره‌برداران کشاورزی معمولاً آرزومند عدم کارایی زهکش‌ها هستند! زهکشی کنترل شده در هر دو نوع زهکشی روباز و روبسته به کار می‌رود. در مقیاس وسیع حوضه رودخانه‌ها، کنترل سیلاب نیز جزء ضروری زهکشی است. در سال‌های اخیر کمیت و کیفیت آب مورد نیاز برای محیط زیست نیز مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. سازمان‌های جهانی مانند یونسکو و فائو در این مورد توجه بیشتری به جنبه‌های گوناگون بحران آب دارند. در شرایط کمبود آب یا نامطمئن بودن منبع آب که منجر به کاهش مقدار محصول می‌شود، زهکشی کنترل شده می‌تواند مفید باشد. در زهکشی کنترل شده با کاهش حجم زه‌آب خروجی، از رها شدن علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها و سایر عناصر غذایی و رسوب به آب‌های سطحی کاسته می‌شود.

منافع حاصل از زهکشی کنترل شده برای زارعین و دولت‌ها مشترک است. زارعان به طور مستقیم با صرفه‌جویی در زمان و پول در مدیریت مزرعه و افزایش محصول؛ و دولت‌ها با تقویت منابع ارزشمند آب و کاهش خسارات زیست محیطی از این روش منتفع می‌شوند (بانک جهانی، ۲۰۰۵).

1- Best Management
2- Monsoo

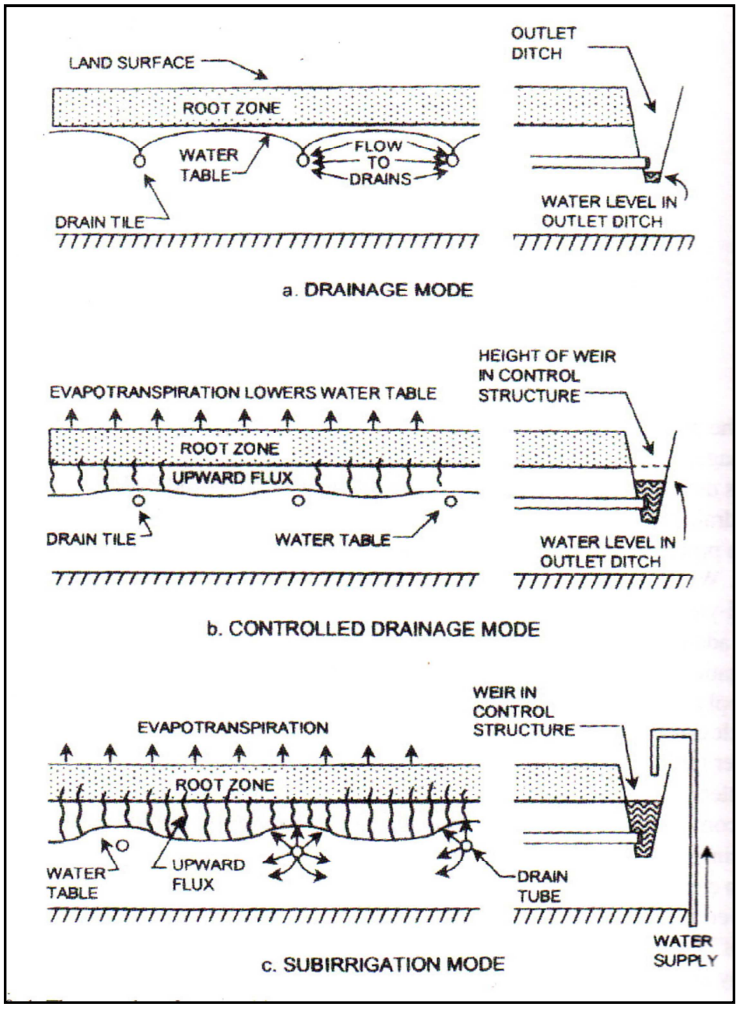
زهکشی کنترل شده روشی برای تلفیق مدیریت آبیاری و زهکشی است. در این روش با کاهش حجم زه آب، امکان حداکثر استفاده از آب آبیاری یا باران در عین جلوگیری از شرایط ماندابی و تجمع املاح در نیمرخ خاک فراهم می‌گردد. این روش، همچنین باعث کاهش دفعات آبیاری و ذخیره آب در خاک برای استفاده گیاه بدون افت کیفیت آب می‌شود. سودمندترین جنبه زهکشی کنترل شده، بهبود کارایی مصرف آب در کشاورزی فاریاب است. همچنین، بهبود عملکرد گیاه؛ کنترل شدت عبور آب از خاک و نگهداری عناصر غذایی مانند ازت و فسفر که منجر به حفظ حاصلخیزی خاک پس از بارندگی یا آبیاری می‌گردد؛ کاهش حجم زه آب و جلوگیری از هدر رفت نیترات و فسفات و آلوده شدن منابع آب سطحی و خسارت‌های زیست محیطی؛ و حفاظت از تالاب‌ها از جمله فواید جانبی زهکشی کنترل شده محسوب می‌گردد.

بهبود کارایی مصرف آب در مزرعه می‌تواند منجر به ذخیره آب در سطح حوضه آبخیز گردد مگر آنکه از زه آب استفاده مجدد گردد یا منبع عمدهٔ تأمین آب از چاه و آب زیرزمینی باشد. توجه به کیفیت زه آب در سطح مزرعه و در سطح حوضه آبخیز ضرورت دارد. در مناطقی که استفاده مجدد از زه‌آب رایج است معمولاً کاهش کیفیت، منجر به کاهش کارایی مصرف زه‌آب می‌گردد. بنابراین، ذخیره آب در سطح مزرعه باعث کاهش حجم زه‌آب و لذا ذخیره آب و افزایش کارایی مصرف آب در سطح حوضه آبخیز می‌شود (ابوت و همکاران، ۲۰۰۲).

در حال حاضر، معیارهای طراحی مورد قبول عام برای سیستم زهکشی کنترل شده نه در مناطق مرطوب و نه در مناطق خشک وجود ندارد (پاجه چی و همکاران، ۲۰۰۸) و اگرچه سال‌های زیادی است که زهکشی کنترل شده و آبیاری زیرزمینی در شمال آمریکا ترویج می‌شود اما هنوز معیارهای طراحی یا راهنمای اجرای آن کمیاب و کلی است. در کشورهای دیگر نیز تجارب موجود در حد قابل استفاده برای کشاورزان عادی کشورهای در حال توسعه ارائه نشده است. در اراضی فاریاب و دیم زارهای مناطق خشک و نیمه خشک بیشترین عامل انگیزش برای کاربرد زهکشی کنترل شده توسط کشاورزان، کمبود آب است. متاسفانه اغلب سیستم‌های موجود آبیاری و زهکشی برای مدیریت تلفیقی آب طراحی و اجرا نشده‌اند و فاقد ابزار کنترل سطح ایستابی می‌باشند (ولوتمان و یانسن، ۲۰۰۳).

۳-۶-۳-٤ پیشینه

سابقه انجام زهکشی کنترل شده (شکل ۲۴- *b*) به صورت آزمایشی یا عملی از دهه‌های گذشته در کشورهایی مانند آمریکا، هلند، ایتالیا، چین، فنلاند، کانادا، مالزی، نیوزلاند وجود داشته و در ابتدا در خاک‌های شنی و آلی مورد استفاده قرار گرفته اما مشاهده شده است در خاک‌های سنگین‌تر نیز قابل اجرا می‌باشد (اسکگز، ۱۹۹۹). از اواسط دهه هشتاد میلادی، مطالعات و تلاش‌های زیادی در جهت تلفیق زهکشی با آبیاری و کنترل سطح ایستابی به ویژه در اقلیم‌های مرطوب آمریکا و کانادا صورت گرفته است. در مناطق مرطوب با خاک سنگین، مدیریت سطح ایستابی دشوارتر است. برای اغلب محصولات زراعی، شرایط ماندابی کوتاه مدت (۱۲ تا ۲۴ ساعت) اثرات مخرب بیشتری نسبت به شرایط کم آبی موقت دارد. در مناطق خشک و خاک‌های سبک کنترل سطح ایستابی آسان تر است. در مناطق مرطوب که درصد زیادی از بارندگی در طول فصل رشد در ابتدای کاشت گیاه واقع می‌شود، بالا نگهداشتن سطح ایستابی منجر به کاهش گسترش ریشه گیاه می‌گردد که در دورهٔ خشک توان جذب گیاه از عمق خاک را کاهش می‌دهد و بر تنش خشکی می‌افزاید (پارسونز و همکاران، ۱۹۹۰). زهکشی کنترل شده توأم با آبیاری زیرزمینی (شکل ۲۴- *c*) در آمریکا توسعه یافته و به دلیل جنبه‌های مثبت زیست محیطی و افزایش محصول به طور گسترده‌ای در ۲۰ سال اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (اسکگز، ۱۹۹۹). یکی از مکانیسم‌های کاهش نیترات در زهکشی کنترل شده، افزایش دنیتریفیکاسیون در سطح ایستابی بالاست اما قسمت عمدهٔ کاهش تلفات نیترات مربوط به کاهش حجم زه آب در این روش مدیریتی است. آبیاری زیرزمینی احتمالاً دنیتریفیکاسیون و جذب نیترات توسط گیاه را افزایش می‌دهد اما در عین حال، بر حجم خروجی زهکش نیز می‌افزاید (اسکگز، ۱۹۹۵).



شکل ۲٤- نمایی از زهکشی آزاد، زهکشی کنترل شده و آبیاری زیر زمینی (اسکز، ۱۹۹۹)

زهکشی کنترل شده علاوه بر فراهم کردن امکان افزایش محصول و کارایی مصرف آب می‌تواند به بهبود کیفیت زه آب نیز منجر شود. گزارش شده است که زهکشی کنترل شده نه تنها باعث کاهش حجم زه آب و مقدار نیترات در خروجی زهکشی شده، بلکه از غلظت نیترات در ناحیه توسعه ریشه نیز کاسته است. آبشویی نیترات در سیستم زهکشی کنترل شده ۵۰ درصد نسبت به زهکشی معمول کاهش یافته است (وزارت کشاورزی و غذا- بریتیش کلمبیا، ۱۹۹۸). همچنین، با اجرای صحیح

سیستم زهکشی کنترل شده، مقدار کاهش ازت و فسفر در زه آب، بیش از ۵۰ درصد گزارش شده است (اوانز و همکاران، ۱۹۹۸).

حد لازم زهکشی به عواملی مانند مدت و شدت بارندگی، ویژگی‌های فیزیکی خاک، دمای هوا و خاک، نوع و مرحله رشد گیاه بستگی دارد. بنابراین طراحی و مدیریت زهکشی وابسته به منطقه مورد نظر است و اقلیم، ویژگی‌های خاک و نیازهای گیاه باید در آن در نظر گرفته شود. حد بحرانی که تعیین کننده مقدار بهینه زهکشی در همه مناطق و شرایط مختلف باشد عملاً وجود ندارد (اوانز و فوزی، ۱۹۹۹).

بسته به نوع محصول و کاربردهای آن، دقت کنترل در زهکشی می‌تواند متفاوت باشد. در تولید گل، میزان کنترل در حد چند سانتیمتر، در تولید علوفه در حد چند ده سانتیمتر و برای تولید سایر گیاهان زراعی و شرایط دیگر اقلیمیو توپوگرافی دقت کمتری ضرورت دارد (ابوت و همکاران، ۲۰۰۲).

مقدار افزایش محصول در اثر کاربرد زهکشی کنترل شده به شرایط اقلیمیو مقدار بارندگی در هر سال بستگی دارد و ممکن است در سال‌های مختلف واکنش گیاه به زهکشی کنترل شده متفاوت باشد. پارسونز و همکاران (۱۹۹۰) افزایش ۴ تا ۱۱ درصدی در مقدار محصول ذرت را طی آزمایش ۵ ساله مشاهده نموده‌اند.

زهکشی کنترل شده توأم با آبیاری زمینی، باعث هدر رفت مقدار بیشتری از علف کش توسط رواناب سطحی نسبت به زهکشی زیرزمینی می‌گردد. زهکشی کنترل شده رواناب سطحی را افزایش و مقدار زه آب زهکش زیرزمینی را کاهش داده است و لذا تفاوت معنی‌داری در کل هدررفت علف کش‌ها مشاهده نشده است (گینور و همکاران، ۲۰۰۱). بورین و همکاران(۲۰۰۱) مشاهده نمودند که در مقایسه با زهکشی معمول، زهکشی کنترل شده همراه با آبیاری زیرزمینی، زه آب بیشتری ایجاد می‌کند اما در عین حال به علت تامین پیوسته آب قابل دسترس، بر مقدار تبخیر و تعرق می‌افزاید. کارایی مصرف آب (نسبت تبخیر و تعرق به کل آب افزوده شده) در زهکشی کنترل شده همراه با آبیاری زیرزمینی، حدود ۷۹ درصد (کمتر از مقدار ۸۸ درصد برای زهکشی معمول) است. با وجود زه آب بیشتر، هدر رفت نیترات در زهکشی کنترل شده تقریباً نصف زهکشی معمول بوده است. زهکشی کنترل شده همراه آبیاری زیرزمینی با عمق سطح ایستابی متغیر، مقدار هدر رفت ازت را ۶۳ درصد کاهش می‌دهد، در حالیکه تثبیت سطح ایستابی در عمق ۶۰ سانتی متر (که عملاً در مزرعه دشوار است) ۴۶ درصد از هدر رفت ازت می‌کاهد. این تفاوت ممکن است به علت کاهش زه آب در تیمار سطح ایستابی متغیر باشد. همچنین، استفاده از مرداب یا زهکشی کنترل شده همراه با آبیاری زیرزمینی منجر به کاهش EC زه آب شده است. علت این امر به شستشوی بیشتر در لایسیمتر نسبت داده می‌شود. در واقع حجم آب ورودی به

مرداب سه برابر و کاهش EC پنج برابر بوده است. در تیمارهای زهکشی کنترل شده همراه با آبیاری زمینی، کاهش EC حدود چهار برابر بوده در حالیکه حجم آب ورودی دو برابر بوده است (بورین و همکاران، ۲۰۰۱).

باچه چی و همکاران (۲۰۰۸) با تعیین کارایی آبشویی (Fir) و زهکشی طبیعی (Gn) و استفاده از برنامه *SaltMod* واندازه‌گیری‌های مزرعه ای، اثرات دراز مدت زهکشی کنترل شده بر شوری خاک و راندمان آبیاری را بررسی نموده‌اند.اندازه‌گیری‌ها شامل مقدار آب ورودی به کرت آزمایشی در طول فصل رشد؛ حجم زه آب در خروجی زهکش؛ کنترل هر روزه سطح ایستابی در شش نقطه از کرت؛ میانگین شوری خاک در هر فصل در عمق ریشه در بهار و پاییز در شش نقطه بوده و عامل فرضی کنترل زهکشی (Frd) در شبیه سازی مدل از صفر تا یک و ضریب عکس العمل زهکشی از ۰/۰۰۸ تا صفر در نظر گرفته شده است. نتایج نشانگر آن بوده است که در یک دوره ده ساله شبیه سازی مدل، با فرض Frd کمتر از ۰/۷۵ تغییرات معنی‌داری در شوری ناحیه ریشه ایجاد نمی‌شود اما افزایش معنی‌داری در شوری محیط ریشه در Frd بزرگتر از ۰/۷۵ مشاهده شده است. افزایش شوری در حدی است که به رشد گیاهان (به جز گیاهان مقاوم تر به شوری مانند پنبه و جو) آسیب می‌رساند. در صورت استفاده از آب شور در آبیاری، مقدار شوری محیط ریشه افزایش می‌یابد. در شبیه سازی با مدل، کارایی و کفایت مصرف آب به ترتیب ۱۱ و ۳۸/۵ درصد افزایش یافته است. هنگامی‌که عامل کنترل زهکشی به ۰/۵ رسید، مقدار زه آب از ۰/۱۳۵ به ۰/۱۲۵ متر کاهش یافته است، بدون آنکه شوری در محیط ریشه افزایش یافته باشد. با فرض مقدار ۰/۷۵ برای عامل کنترل زهکشی، حجم زه آب در طول فصل آبیاری از ۰/۱۳۵ به ۰/۰۵ متر می‌رسد اما در عین حال شوری محیط ریشه از ۲/۱۷ به ۳ $dSm\text{-}1$ افزایش یافته است (باچه چی و همکاران، ۲۰۰۸).

در مورد عمق مناسب سطح ایستابی، صفوت و ریتزما (۱۹۹۰) اظهار داشته‌اند که ثبیت میانگین فصلی عمق سطح ایستابی در ۰/۸ متر، برای تولید گیاهان زراعی کفایت می‌کند. در نظر گرفتن این عمق باعث کاهش قابل توجه هزینه‌های اجرای زهکشی می‌شود. رائو و همکاران (۱۹۹۰) نیز میانگین عمق مناسب سطح ایستابی در فصل رشد را برای اصلاح خاک‌های شور در حدود ۰/۸ متر دانسته‌اند.

نوری و همکاران (۱۳۸۶) در یک آزمایش لایسیمتری، بهبود کیفیت زه آب را با کنترل سطح ایستابی و آبیاری زیرزمینی در کرج گزارش نموده‌اند. آنان مشاهده کردند که حجم زه آب، غلظت ازت نیتراتی و هدایت الکتریکی زه آب در تیمارهای کنترل سطح ایستابی (۳۰، ۵۰، ۷۰ سانتی متر) به طور

معنی‌داری نسبت به زهکشی آزاد کاهش یافته است. در تیمارهای سطح ایستابی ۳۰ و ۵۰ سانتی متر به ترتیب، تلفات ازت نیتراتی ۹۰ و ۸۲ درصد و حجم زه آب ۵۰ و ۴۱ درصد نسبت به زهکشی آزاد کاهش یافت. بیشترین افزایش هدایت الکتریکی زه آب، در قسمت اشباع زیر ناحیه توسعه ریشه مشاهده گردید.

۳-٦-۳-۵ امکان پذیری

در سطح جهان، حوضه‌های آبریز رودخانه‌های مهم در مناطق خشک و نیمه خشک معمولاً مسطح و حاصلخیزند و در عین حال با محدودیت منابع آب مواجه بوده و کشاورزی فاریاب در آنها رایج است. در این مناطق مسایل مربوط به شرایط ماندابی و شوری و راندمان پایین آبیاری، احداث زهکش را ضروری ساخته است. بنابراین به طور کلی می‌توان چنین دشت‌هایی را برای کاربرد روش زهکشی کنترل شده مناسب دانست. از سوی دیگر، نقشه مناطق در معرض بحران آب و مناطق دارای بیشترین وسعت اراضی فاریاب در سطح جهان تقریباً بر هم منطبق است و در قاره آسیا و آفریقا شامل کشورهای لیبی، اسرائیل، فلسطین، اردن، سوریه، عراق، عربستان سعودی، یمن، عمان، کشورهای حاشیه خلیج فارس، ایران، پاکستان، هندوستان و چین می‌گردد. از میان آنها، کشورهایی که دارای سیستم زهکشی قابل توجه بوده و نسبت اراضی زهکشی شده به اراضی فاریاب ($D:I$) در آنها بالاتر از ده درصد است را می‌توان برای اجرای زهکشی کنترل شده مناسب دانست، که شامل مصر، اسرائیل، عراق، بحرین، سوریه، چین، پاکستان و هندوستان می‌گردد. در مناطق دیگر جهان، کشورهای مکزیک، برزیل، سنگال، موریتانی، الجزایر، تونس، اوگاندا، اتیوپی، یونان، آلبانی، رومانی، ترکیه، قبرس، ازبکستان، ترکمنستان، تاجیکستان، قرقیزستان، استرالیا نیز دارای پتانسیل اجرای زهکشی کنترل شده محسوب می‌شوند (ابوت و همکاران، ۲۰۰۲).

در ایران، از گذشته و هم اکنون انواعی از زهکشی کنترل شده مورد استفاده بوده است که بستن خروجی زهکش توسط کشاورزان در سیستان و مغان و فارس و آبیاری جزر و مدی در نخیلات آبادان از آن جمله می‌باشد (اکرم و اکرم، ۱۳۸۳). اگرچه نسبت اراضی زهکشی شده به اراضی فاریاب در ایران کمتر از ده درصد است و لذا دارای پتانسیل زهکشی کنترل شده محسوب نمی‌گردد، اما باید به این نکته توجه نمود که قسمت عمده زهکش‌های احداث شده و در حال طراحی و اجرای کشور در استان خوزستان قرار دارد و این استان دارای پتانسیل قابل توجهی برای اجرای سیستم‌های زهکشی کنترل شده می‌باشد. همچنین، اراضی پست حاشیه دریای خزر و اراضی شالیزاری در صورت احداث زهکش،

قابلیت اجرای زهکشی کنترل شده و لذا امکان کشت دوم و کاهش هدر رفت آب و عناصر غذایی و آلاینده‌ها را دارند (اکرم و اکرم، ۱۳۸۳).

هزینه‌های اولیه اجرای زهکشی کنترل شده بیشتر از سیستم‌های زهکشی رایج است؛ اما این روش دارای قابلیت افزایش محصول و کاهش نوسان‌های مقدار محصول در سال‌های مختلف و کاهش هزینه‌های نگهداری سیستم نسبت به سیستم‌های جداگانه آبیاری و زهکشی می‌باشد. بازگشت هزینه‌های اجرای سیستم بستگی به ارزش محصول، مقدار افزایش محصول ناشی از کاهش تنش‌های خشکی و افزایش یکنواختی توزیع رطوبت در خاک و هزینه نصب تجهیزات کنترل زهکشی دارد. علاوه بر هزینه اولیه اجرای سیستم، زمان لازم برای مدیریت آن باید مورد توجه قرار گیرد. با توجه به آنکه مدیریت صحیح سیستم در زهکشی کنترل شده حایز اهمیت بیشتری نسبت به زهکشی معمول است، اتوماسیون سیستم می‌تواند آن را از نظر اقتصادی توجیه پذیر سازد (بانک جهانی، ۲۰۰۵).

۳-۶-۳-۶ *طراحی و اجرا*

پارامترهای طراحی و بهره برداری از زهکشی کنترل شده هم جنبه‌های سازه ای و هم جنبه‌های مدیریتی را در بر می‌گیرند. برای مثال در مورد مکان،اندازه و نوع سرریزها، ارتفاع سرریز و نحوه بهره برداری از آن (شامل ارتفاع فصلی سرریز، برنامه‌ریزی در مورد واکنش به بارندگی، دوره‌های خشک، آلاینده‌ها و...) باید از پیش، تصمیم گیری شود. ابزار کنترل زه آب (مانند خروجی‌های زهکشی) و مدیریت آنها نیز باید در نظر گرفته شود. همه این ابزار باید متناسب با رژیم آبی (سطحی و زیرزمینی) مورد انتظار طراحی و مدیریت شوند. در ارزیابی زهکشی کنترل شده، تغییرات سطح ایستابی و رطوبت خاک در زمان و مکان، کیفیت آب و زه آب، مقدار هدر رفت عناصر غذایی، نمک‌ها، آفت کش‌ها و علف کش‌ها از خاک می‌بایست در نظر گرفته شود (ولوتمان و یانسن، ۲۰۰۳).

همانگونه که قبلا تاکید شد، در حال حاضر معیارهای طراحی مورد قبول عام برای سیستم زهکشی کنترل شده نه در مناطق مرطوب و نه در مناطق خشک وجود ندارد (باچه چی و همکاران، ۲۰۰۸). حد لازم زهکشی نیز به عواملی مانند مدت و شدت بارندگی، ویژگی‌های فیزیکی خاک، دمای هوا و خاک، نوع و مرحله رشد گیاه بستگی دارد. بنابراین، طراحی و مدیریت زهکشی وابسته به منطقه مورد نظر است و اقلیم، ویژگی‌های خاک و نیازهای گیاه باید در مورد آن در نظر گرفته شود. حد بحرانی

که تعیین کننده مقدار بهینه زهکشی در همه مناطق و شرایط مختلف باشد عملاً وجود ندارد (اوانز و فوزی، ۱۹۹۹).

مبنای طراحی در سیستم‌های معمول زهکشی خارج کردن مستمر و حداکثر زه آب از نیمرخ خاک است که در مناطق خشک می‌تواند باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی و افزایش شوری زه آب و منابع آب سطحی و زیرزمینی گردد. یکی از روش‌های جایگزین برای بهبود مدیریت آبیاری و زهکشی اجرای زهکشی کنترل شده است. در این سیستم، خاک باید تا حد امکان مسطح باشد. در این صورت، با کارگذاری تعداداندکی از سازه‌های کنترل سطح ایستابی می‌توان مناطق وسیعی را تحت پوشش این سیستم مدیریت نمود. با کنترل سطح ایستابی در نزدیکی سطح خاک، مدیریت انعطاف پذیری بر سطح ایستابی در اعماق مختلف خاک امکان پذیر شده و مدیریت شوری خاک و جذب آب توسط گیاه نیز تسهیل می‌گردد. همچنین در این حالت، نفوذ عمقی و هدر رفت آب به زیر ناحیه ریشه کاهش یافته و امکان صعود مویینه ای رطوبت همزمان با افزایش تبخیر و تعرق و لذا تامین بخشی از نیاز آبی گیاه فراهم می‌گردد. خطوط جریان در این سیستم کم عمق تر از سیتم‌های معمول و به سطح خاک نزدیک تر است که در صورت کم بودن شوری خاک سطحی، مزیتی دیگر برای سیستم زهکشی کنترل شده است و منجر به بهبود کیفیت و کاهش حجم زه آب می‌گردد. کارکرد صحیح سیستم، مستلزم تلفیق طراحی دقیق زهکشی کنترل شده توام با افزایش کارایی آبیاری است (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).

هدف طراحی سیستم زهکشی زیر سطحی معمول، تثبیت عمق سطح ایستابی در میان زهکش‌های فرعی با در نظر گرفتن ضریب زهکشی (حداکثر عمق زه آب که در ۲۴ ساعت باید تخلیه شود) می‌باشد. در مناطق خشک، معیار مهم دیگر عبارت است از کنترل تجمع املاح در اثر صعود مویینه ای در ناحیه توسعه ریشه، به گونه ای که عمق سطح ایستابی در جایی قرار گیرد که احتمال حرکت رو به بالای رطوبت و املاح به حداقل برسد. این عمق بسته به عمق توسعه ریشه، معمولا ۱/۱ تا ۱/۵ متر در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که این عمق سطح ایستابی ضمن تامین اکسیژن مورد نیاز ریشه‌ها، حرکت آب و املاح را از سطح ایستابی کم عمق به ناحیه ریشه و سطح خاک کاهش می‌دهد. جنبه مهم دیگر مرتبط با مدیریت تلفیقی سطح ایستابی، تولید محصول و کیفیت زه آب، قابلیت تردد در مزرعه است. با مدیریت صحیح زهکشی و پرهیز از خاک ورزی در شرایط مرطوب (که منجر به تخریب ساختمان خاک می‌گردد) می‌توان پس از بارندگی، زودتر اقدام به خاک ورزی نمود. در کارولینای شمالی، کشاورزان دو روز پیش از خاک ورزی، سطح ایستابی را بین ۶۰ تا ۹۰ سانتی متر پایین می‌برند (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).

فاصله زهکش‌ها در سیستم زهکشی کنترل شده به منظور تامین ظرفیت زهکشی لازم برای قابلیت تردد و پیشگیری از صدمه دیدن گیاه هنگام بالا آوردن سطح ایستابی، نسبت به زهکش‌های معمول کمتر است. در چنین حالتی در صورت عدم پایش مناسب، ممکن است حجم زه آب و مقدار هدر رفت عناصر غذایی بیشتر از سیستم‌های معمول زهکشی باشد. در تعیین عمق و فاصله زهکش‌ها علاوه بر در نظر گرفتن ویژگی‌های مربوط به خاک و آب و نوع محصول، جنبه‌های اقتصادی نیز مورد توجه قرار می‌گیرند و معمولا عمق ۲/۴ متر در نظر گرفته می‌شود. برخی مطالعات انجام شده در مناطق خشک نشان داده است که در نظر گرفتن چنین عمقی اگرچه ممکن است با افزایش فاصله زهکش‌ها توجیه اقتصادی داشته باشد، اما می‌تواند به افزایش حجم و شوری زه آب منجر گردد. کاهش فاصله زهکش‌ها و افزایش ضریب زهکشی در مناطق مرطوب برای استفاده بهینه از بارندگی و آبیاری زیر زمینی، برای مناطق خشک که آبیاری زیرزمینی تنها در خاک‌های آلی آزموده شده، قابل توصیه نیست و مطالعه دقیق زمین شناسی و هیدرولوزیک و مدیریت تلفیقی آبیاری و زهکشی ضرورت دارد. با تجدید نظر در معیارهای طراحی معمول، در یک خاک لوم رسی می‌توان عمق زهکش را از ۲/۴ به ۱/۸ متر کاهش داد که منجر به کاهش عمق سطح ایستابی از ۱/۲ به ۰/۹ متر و کاهش فاصله زهکش‌ها از ۲۹۹ به ۲۲۸ متر می‌شود. در صورت افزایش راندمان آبیاری از ۶۰ به ۸۰ درصد، فاصله زهکش‌ها را می‌توان تقریبا دو برابر نمود. انتظار می‌رود با ایجاد چنین تغییراتی، حجم زه آب کاهش و کیفیت آن افزایش یابد (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).

۳-۶-۳-۷ مدیریت و پایش

سیستم زهکشی کنترل شده همراه با آبیاری زیرزمینی باید در طول فصل رشد قابلیت آبیاری و زهکشی را توأماً داشته باشد. به علت نامشخص بودن زمان و مقدار بارندگی، مدیریت سطح ایستابی به همراه حفاظت آب دشوار می‌شود. در صورتیکه جلوگیری از هدر رفت آب، کم اهمیت باشد، سطح ایستابی را می‌توان در یک عمق ثابت نگهداشت تا آب اضافی به طور طبیعی از خاک خارج شود. در باران‌های شدید یا طولانی، سیستم باید در حالت زهکشی آزاد تنظیم شود تا زه آب به سرعت خارج گردد. مدیریت سطح ایستابی در چنین سیستمی‌شامل سه تصمیم عمده می‌شود که در هر حال مستلزم پایش مداوم رطوبت خاک است:

۱- تعیین زمانی که باید ابزار کنترل سطح ایستابی را بالا یا پایین برد.
۲- تعیین ارتفاعی که سرریزها باید در ابزار کنترل داشته باشد.
۳- تعیین زمانی که افزودن آب مورد نیاز است.

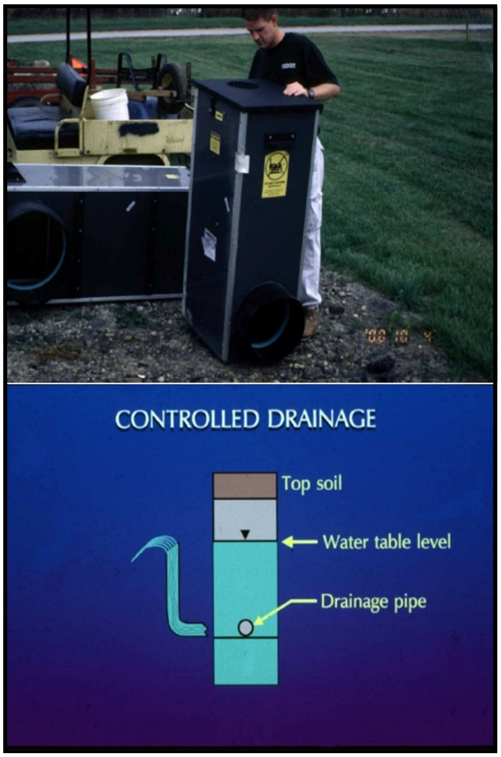
در مناطقی که امکان آبیاری تکمیلی وجود ندارد یا قیمت آب گران است، زهکشی کنترل شده را می‌توان به تنهایی اعمال نمود. برای حفظ مقدار بیشتری از آب موجود، بهتر است سطح ایستابی بلافاصله پس از کاشت بالا آورده شود. عمق سطح ایستابی باید در حدی باشد که محیط ریشه اشباع نماند و توسعه ریشه محدود نگردد. نصب سیستم شناور در ابزار کنترل از این خطر می‌کاهد. سطح ایستابی باید در گیاهان با ریشه سطحی یا خاک شنی بالاتر نگهداشته شود. در صورت امکان، ثبت داده‌های دقیق مدیریت سیستم طی چند سال برای تنظیم بهتر ابزار کنترل می‌تواند مفید باشد. این داده‌ها شامل سطح کنترل، حد تنش‌های خشکی و ماندابی گیاه و داده‌های هواشناسی می‌گردد.

یکی از جنبه‌های مدیریتی زهکشی کنترل شده پاسخ به سؤالی دشوار در مورد عمق سطح ایستابی مناسب با در نظر گرفتن وجوه متعدد و گاه پیچیده مسئله است. در مناطق مرطوب، این عمق بسته به مقدار بارندگی، تبخیر و تعرق و حجم زه آب ممکن است در هر روز، متفاوت باشد. مشاهده شده است که با توجه به نوع، لایه بندی و ویزگی‌های هیدرولیکی خاک؛ شرایط اقلیمیو همچنین نوع گیاه و چگونگی توسعه ریشه آن، عمق سطح ایستابی می‌تواند بین ۱۵ تا ۶۰ سانتی متر تنظیم شود. در خاک‌های لوم شنی کارولینای شمالی با حدود ۱۰۰۰ میلی متر بارندگی، سطح ایستابی در حدود ۳۰ سانتی متری در نظر گرفته شده است. اغلب گیاهان نوسان ۱۵ سانتی متری سطح ایستابی را در کوتاه مدت (کمتر از ۲۴ ساعت) در عمق ۳۰ تا ۹۰ سانتی متری خاک تحمل می‌کنند (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).

در صورتی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح خاک تنظیم شود، حجم زه آب و لذا اتلاف عناصر غذایی کاهش می‌یابد. اما چنین وضعیتی ممکن است ناشی از افزایش دنیتریفیکاسیون و اتلاف ازت در فصل رشد باشد که اگرچه از نظر زیست محیطی مطلوب است اما به کاهش محصول می‌انجامد. با افزایش سطح ایستابی تا حد امکان، غلظت نیترات در زه آب کاهش می‌یابد اما در عین حال، اتلاف فسفر به واسطه افزایش رواناب سطحی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، اگرچه حجم کل زهاب ممکن است کاهش یابد، اما مقدار حداکثر جریان در کوتاه مدت افزایش می‌یابد که می‌تواند به انتقال املاح به سطح خاک منجر شود. افزون بر این، سطح ایستابی کم عمق می‌تواند باعث ایجاد محدودیت در گسترش ریشه گیاه و در نتیجه کاهش تبخیر و تعرق و جذب عناصر غذایی و لذا کاهش مقدار محصول

در عین افزایش تلفات عناصر غذایی توسط زه آب خروجی گردد. بنابر این، راهبردهای افزایش محصول در عین حال می‌توانند منجر به بهبود کیفیت زه آب گردند.

ارتفاع تنظیم سرریز یا هر ابزار کنترلی دیگر (شکل ۲۵) به تناوب کشت، مرحله رشد گیاه و گسترش ریشه، مقدار بارندگی، شرایط آب وهوایی در هر فصل زراعی، مقدار تبخیر و تعرق، قابلیت تردد در سطح مزرعه و حتی برخی پیشامدهای خاص مانند توفان یا وقوع خشکسالی دارد. در برخی موارد ممکن است افزودن آب به سیستم نیز ضرورت یابد. تعیین دقیق میزان بالا یا پایین آوردن سطح ایستابی مستلزم بررسی در شرایط کنترل شده تحقیقاتی در مزارع دارای سیستم زهکشی زیر زمینی مجهز به ابزار کنترل سطح ایستابی می‌باشد. در هر حال، تغییر ارتفاع سرریز بهتر است تدریجی (کمتر از ۱۵ سانتی متر در هر ۱۲ ساعت) بوده و به سرعت و به دفعات متوالی صورت نگیرد (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۲۵- روش کنترل سطح ایستابی و نمونه‌ای از یک دستگاه پیش ساخته آن (اکرم و همکاران، ۱۳۸۷)

در فصل بارندگی، سرریز در نزدیکی سطح خاک قرار می‌گیرد تا حجم زه آب خروجی به طور ناگهانی افزایش نیابد. پس از آن لازم است سرریز به آهستگی (۱۵ سانتی متر در روز) پایین آورده شود تا نیمرخ خاک بتدریج و یکنواخت تخلیه شده و ظرفیت نگهداری آب آن برای بارندگی بعدی به حد کفایت برسد. با اتخاذ این راهبرد، حجم زه آب خروجی از کناره‌های مزرعه تقریبا نصف می‌شود. در عین حال ضرورت مدیریت ویژه سیستم در خارج از فصل رشد، می‌تواند از جمله دشواری‌های این راهبرد باشد.

عمق سطح ایستابی در مزرعه، لزوما با تغییر ارتفاع سرریز هم زمان نیست و ممکن است با سطح آب در خروجی زهکش یا ارتفاع سرریز متفاوت باشد. اگر چه از دیدگاه تولید محصول، سطح ایستابی در مزرعه باید متناسب با نیازها و شرایط گیاه تنظیم شود اما از ضرورت بهبود کیفیت زه آب نباید غافل شد. شاخص‌های چنین مدیریت ویژه ای ممکن است مستقیما قابل مشاهده نباشد و واکنش سطح ایستابی در مزرعه نیز کاملا با تنظیم ابزار کنترل زهکش همزمان نگردد. زمان واکنش حتی ممکن است تا چند روز به طول انجامد. برای مثال، در طول تابستان، سطح ایستابی مزرعه گاهی بیش از ۶۰ سانتی متر افت می‌کند. در چنین شرایطی، اغلب خاک‌ها توان نگهداری ۲۵ تا ۵۰ سانتی متر آب را دارند و در صورت بارش شدید و توفانی امکان ایجاد رواناب سطحی و افزایش ناگهانی حجم زه آب وجود دارد. با توجه به حجم زه آب خروجی، ممکن است تصور شود که خاک مزرعه کاملا اشباع شده است در حالی که پس از بازپخش رطوبت در نیمرخ خاک، سطح ایستابی ممکن است تنها ۳۵ سانتی متر بالا بیاید که برای تامین نیاز آبی اغلب گیاهان کفایت نمی‌کند (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶).

به طور کلی، با فرض مدیریت بهینه سایر عوامل تولید، مدیریت و پایش زهکشی کنترل شده باید در تمام طول سال اعمال شود و تنها به فصل زراعی محدود نگردد. به عبارت دیگر، حتی پس از برداشت محصول، سطح ایستابی در خارج از فصل رشد گیاه باید در عمق ۲۵ تا ۴۰ سانتی متری سطح خاک تنظیم شود (آیارز و همکاران، ۲۰۰۶). بررسی مزرعه ای درازمدت یا کاربرد مدل‌های شبیه سازی مناسب تجمع املاح برای کاربرد پایدار سیستم‌های زهکشی کنترل شده ضرورت دارد. کاهش احتمال شوری خاک با اعمال شیوه‌های مدیریتی همچون بهبود راندمان آبیاری، آبیاری پیش از کاشت، آبیاری زمستانه و در دوره خواب گیاه و در نظر گرفتن برخه آبشویی در آبیاری در طول فصل رشد امکان پذیر است. بارندگی در فصل آیش نیز به مدیریت شوری خاک یاری می‌رساند.

ابزار پایش سطح ایستابی می‌تواند شامل لوله‌های سوراخداری باشد که در وسط خطوط زهکشی به صورت عمودی نصب می‌گردد. در خاک‌های با هدایت هیدرولیکی کمتر از ۲۵ میلی متر در ساعت، از لوله‌های به قطر حداکثر۴۰ میلی متر و در خاک‌های با نفوذ پذیری بیشتر، از لوله‌های به قطر

بیش از ۱۵۰ میلی متر می‌توان استفاده نمود. در مقطع زیرین و در طول لوله، در هر ۵۰ میلی متر دو سوراخ ۳ میلی متری باید وجود داشته باشد. در حین فصل رشد، طول لوله‌ها تا حداقل ۳۰ سانتی متری زیر سطح ایستابی مطلوب و ۱۵ سانتی متری سطح خاک را می‌بایست پوشش دهد. پایش سطح ایستابی باید در ساعات مشخصی از روز و ترجیحا صبح زود و پیش از متاثر شدن از تبخیر و تعرق صورت پذیرد (استاندارد مهندسی کشاورزی آمریکا، ۲۰۰۶).

در هر سایت، یکسال پس از نصب تجهیزات زهکشی کنترل شده، چاهک‌های مشاهده ای و تانسیومترها برای تعیین رابطه سطح ایستابی و مقدار رطوبت قابل دسترس گیاه باید نصب شوند. پایش غیر اتوماتیک مستلزم سرکشی هر روزه سیستم و مدیریت پمپاژ یا ابزار کنترل سطح ایستابی است. معمولاً تغییرات سطح ایستابی روی لوله‌های زهکش سریع تر از فاصله میان خطوط زهکش است. توصیه می‌شود چاهک‌های مشاهده ای در میان خطوط زهکش برای هر نوع خاک و هر ابزار کنترل سطح آب تعبیه گردد. چاهک‌های مشاهده ای برای تعیین زمان تغییر سطح ایستابی ناشی از مدیریت خاص و پایش وضع موجود ضرورت دارد. این چاهک‌ها در فصل رشد باید حداقل هفته ای یکبار بازدید شوند (وزارت کشاورزی و غذای بریتیش کلمبیا، ۱۹۹۸).

۳-۷ مراجع

اکرم. م.، ف.تاجیک و س.اکرم. ۱۳۸۷. زهکشی کنترل شده؛ راهکاری مناسب از دیدگاه محیط زیست بمنظور بهبود کارآیی آبیاری وافزایش بهره‌وری مصرف آب. مجموعه مقالات پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست.

اکرم، مجتبی و سینا اکرم. ۱۳۸۳. زهکشی کنترل شده، کورسویی برای بهبود راندمان آبیاری در اراضی زهکشی شده ایران. مجموعه مقالات سومین کارگاه فنی زهکشی.

نوری، ح، ع. لیاقت، ح. فرداد، و م. چایی چی. ۱۳۸۶. بهبود کیفیت آب زهکشی با استفاده از مدیریت سطح ایستابی در یک منطقه نیمه خشک ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران، سال اول- شماره یک. صفحه ۴۸-۴۱.

AbdelDaiem, S., J. Hoevenaars, P. P. Mollinga, W. Scheumann, R. Slootweg, and F. VanSteenbergen. 2005. Agricultural drainage: Towards an integrated approach. Irrigation and Drainage Systems, 19:71-87.

AbdelDaiem, S., J. Hoevenaars, P.P. Mollinga, W. Scheumann, R. Slootweg, and F. VanSteenbergen. 2003. Agricultural drainage: Towards an integrated approach. 9th International drainage workshop. Utrecht, Netherlands.

AbdelDaiem, S. 2000. Drainage experiences in arid and semi-arid regions. 8th International drainage workshop. New Delhi, India.

Abbott, C. L., P. Lawrence, G. R. Pearce, and S. Abdel Gawad. 2002. Review of the potential for controlled drainage around the world. DFID, KAR Project R7133. Report OD 146, HR Wallingford, UK.

Abu-Sharar, T.M., F.T. Bingham, and J.D. Rhoades. 1986. Stability of soil aggregates as affected by electrolyte concentration and composition. Soil Sci. Soc. Amer. J. 51: 309-314.

Adams, R.E.W., Brown , Jr., and T. P. Culbert. 1981. Radar mapping, archeology, and ancient Maya land use. Science 213: 1457-1463.

Ardakanian, R. 2003. Integrated drainage and irrigation in arid and semi - arid regions. 9th International drainage workshop. Utrecht, Netherlands.

ASABE. 2006. Design, installation and operation of water table management systems for subirrigation /controlled drainage in humid regions. ASABE standards, ASAE EP 479, 1990 (R2005).

Ayars, J.E., E.W. Christen and J.W. Hornbuckle. 2006. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. Agricultural Water Management: 128-139.

Bahceci, I., R. Cakir, A. S. Nacar, and P. Bahceci. 2008. Estimating the effect of controlled drainage on soil salinity and irrigation efficiency in the Harran plain using SaltMod., Turk J. Agric. For., 32:101-109.

Bettany, E., A.V. Blackmore, and F.J. Hingston. 1964. Aspects of the hydrological cycle and related salinity in the Belka Valley, Western Australia. Aust. J. Soil Res. 2: 187-210.

Borin, M., G. Bonaiti, and L. Giardini. 2001. Controlled drainage and wetland to reduce agricultural pollution: A lysimetric study. J. Environ. Qual. 30:1330-1340.

British Colombia ministry of agriculture and food. 1998. Controlled drainage/Subirrigation, drainage fact sheet, No..564.000-1

Clark, A. M., A.C. Armstrong, R. J. Parkinson , and I. Reid. 1988. Field drainage and land management, a comparison of four long term field trials. Agric. Water Management 14: 113-124.

Conacher, P., and P. Dearden. 1988. Soil conservation integrated with road construction-A reality after 200 years. Aust. J. Soil Water Conserv. 1(1): 17-23.

Cooper, R.L., and N.R. Fausey. 1987. Unpublished data.

Doering, E.J. and F.M. Sandoval. 1976. Hydrology of saline seeps in the Northern Great Plains. Trans. ASAE 19(5): 856-861,865.

DeWrachien, D. and R. Feddes, 2003. Drainage development in a changing environment: Overview and challenges. 9th International Drainage workshop. Utrecht, Netherlands.

DeWrachien, D. 2001. Irrigation and drainage: Trends and challenges for the 21st century. Proceedings of the 19th European regional conference on sustainable use of land and water. Brno, Czech Republic.

Dregne, H.M., M. Kasass, and B. Razanov. 1991. A new assessment of the world status of desertification. Desertification Control Bulletin 20: 6-18.

Evans, R.O. and Fausey, N. R. 1999. Effects of inadequate drainage on crop growth and yield. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (eds.), Agricultural drainage. pp. 13-54.

Evans, R., Skaggs, W., and Gilliam, J. W., 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. J. Irrig. & Drain., July/August 1995.

Fausey, N.R. and R. Lal. 1990. Soil wetness and anaerobiosis. In: Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). Advances in soil science, Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Fausey, N.R.1987.Impact of cultural practices on drainage of clay soils. pp.288-292. In : Drainage design and management. Proc. Fifth Natl. Drainage Symp., Amer. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.

Fausey , N.R.., G.S.Taylor, and G.O.Schwab. 1986. Subsurface drainage studies in a fine textured soil with impaired permeability. Trans. ASAE 29: 1650-1653.

Francis, P.B.,and R.M. Cruse.1982. Soil water matric potential effects on aggregate stability. Soil Sci. Soc. Amer. J. 47: 578-581.

Fredrick, K.D., D.C. Major, and E.Z. Stakhiv. 1997. Water resources planning principles and evaluation criteria for climate change. Climatic Change 37.

Gaynor, J. D. et al. 2001. Tillage, intercrop, and controlled drainage – Subirrigation Influence Atrazine, Metribuzin, and Metolachlor Loss, J. Environ. Qual., 30:561-572.

Gumbs, F.A. 1982. Soil and water management features in Trinidad and Guyana.Trop. Agric.(Trinidad) 59(2): 76-81.

Hundal, S.S., G.O. Schwab, and G.S. Taylor. 1976. Drainage system effect on physical properties of a lakebed clay soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 40: 300-305.

Kimball, B.A., P.J. LaMorte, L. Pinter, G.W. Wale, and R.L. Garcia. 1993. Effects of free air CO2 enrichment on the energy balance and evapo-transpiration. Proceeding of the annual meeting of the American Agronomy Society. Washington D.C., USA.

Lal, R. and G.S. Taylor. 1969. Drainage and nutrient effects in a field lysimeter study: I. Corn yield and soil condition. Soil Sci. Soc. Amer. J. 33: 937-941.

Lal, R. and G.S. Taylor. 1970. Drainage and nutrient effects in a field lysimeter study: II. Mineral uptake by corn. Soil Sci. Soc. Amer. J. 34: 345-248.

McGuiness, J.L., and L.L. Harrold. 1971. Reforestation influences on small watershed stream flow. Water Resource Res. 7(3): 845-852.

Ochs,W. 2003. Investments in water logging and salinity control, In: Agricultural investment source book, World Bank.

Oldman, L.R., V.N.P. VanEnglen, and J.H.M. Pulls. 1991. The extent of Human-induced soil degradation. In: World map of the status of Human-induced soil degradation, An Explanatory Note. International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen, Netherland.

Parsons, J. E., R.W. Skaggs, and E.W. Doty. 1990. Simulation of controlled drainage in open – ditch drainage systems. Agric. Water Manage. 18:301-316.

Patrick, W.H.., Jr. and R.E Henderson. 1981. Reduction and reoxidation cycles of manganese and iron in flooded soil and in water solution. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45: 855-859.

Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24: 29-96.

Rao, K.V.G.K., P.S. Kumbhare, S.K. Kamra and R.J. Oosterbaan. 1990. Reclamation of waterlogged saline alluvial soils in India by subsurface drainage. In: Symposium on land drainage for salinity control in arid and semi-arid regions, Vol. 2. Drainage Research Institute, Cairo. Pp.17-25.

Reid, I., and R. J. Parkinson. 1984. The wetting and drying of a grazed and ungrazed soil. J. Soil Sci. 35: 607-614.

Safwat Abdel-Dayem and H.P. Ritzema. 1990. Verification of drainage design criteria in the Nile Delta, Egypt. Irrigation and Drainage Systems: 4, 2, pp. 117-131.

Scheumann, W. and C. Freisem. 2001. The forgotten factor: Drainage, its role for sustainable agriculture, German Development Institute, Bonn.

Scotter, D. R., and D.J. Horne. 1985. The effect of mole drainage on soil temperatures under pastures. J. Soil Sci. 36: 319-327.

Sharam, P.K. and S. K. DeDatta. 1985. Puddling influence on soil , rice development, and yield. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49: 1451-1457.

Skaggs, R.W. 1999. Water table management: Subirrigation and controlled drainage. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (eds.), Agricultural drainage. pp. 695- 718.

Smedema, L. K., 2000. Global drainage needs and challenges: The role of drainage in today,s world. Eighth ICID International Drainage workshop, New Delhi, India.

Smedema, L. K., S. AbdelDaiem, and W.J. Ochs. 2000. Drainage and agricultural development. Irrigation and Drainage Systems, 14: 223-235.

Soppe, R.W.O., J.E. Ayars, E.W. Christen and P.J. Shouse. 2003. Irrigation management to optimize controlled Drainage in a semi-arid area. 9th international drainage workshop, Utrecht, Netherland.

Steenhuis, T.S., and M.F. Water. 1987. Will drainage increase spring soil temperatures in cool and humid climates? Trans. ASAE 29(6): 1641-1645,1649.

Steinhardt, R., and B. D. Trafford. 1974. Some effects of sub-surface drainage and ploughing on the structure and compactability of a clay soil. J. Soil Sci. 25:138-152.

Tennessee Valley Authority. 1962. Reforstation and erosion control influences upon the hydrology of the Pine Tree Branch Watershed, 1941-1960. TV A, Knoxville, TN.

U.S.Department of agriculture, Economic Research Service. 1987. Farm drainage in the United States: History status and prospects, G. A. Pavelis(ed.). Misc. Publ. No. 1455.

Vlotman, W. F. and H. C. Jansen. 2003. Controlled drainage for integrated water management. 9th International drainage workshop Utrecht, The Netherlands.

Wahba, M. A. S., M. A. El-Ganainy, and M. H. Amer. 2003. Water table management for irrigation water Saving. 9th international drainage workshop, Utrecht, The Netherlands.

Weaver, M.M. 1964. History of tile drainage. M.M. Weaver, Waterloo, NY.

White House-Department of Interior Panel on Waterlogging and salinity in West Pakistan. 1964. Report of Land and Water Development in the Indus Plain.

World Bank. 2005. Investing in controlled drainage: Innovation profile 5.2, In: Shaping the future of water for agriculture, A sourcebook for Investment in agricultural water management, the World Bank, Washington.

World Bank. 2002. Reaching the rural poor. World Bank staff edition, Agriculture and rural development, ARD of World Bank, Washington DC.

فصل چهارم

ضرورت اقدام: اولویت‌های تحقیق و توسعه

فهم اصول و فرایندهای مربوط به سیستم‌های تقویت کننده بخش زنده خاک، پیش نیاز مهم توانایی تولید غذا، خوراک دام و پوشاک برای جمعیت جهان و حفظ موقعیت سالم محیط زیست جهانی می‌باشد (لعل و استوارت، ۱۹۹۰). از آنجایی که مشکل فروسایی خاک بسیار پیچیده است، دستیابی به منابع اطلاعات مربوطه به صورت منطقی و سازمان یافته حایز اهمیت می‌باشد.

٤-١- شناسایی و ارزیابی منابع

آماده کردن فهرست دقیق و قابل اصلاح از منابع پایه و امکانات تولیدی آن، وظیفه ای فوری است. ارزیابی واقع بینانه منابع خاک و مشخص کردن امکانات بالقوه و محدودیت‌های آنها حایز اهمیت است و تعیین مشخصات (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) کامل تر منابع خاک ضرورت تام دارد. گر چه روش‌های سنتی ارزیابی منابع خاک را می‌توان به کار برد، اما استفاده از آنها زمان بر بوده و مستلزم وجود انبوه نیروی انسانی متخصص است. خاکشناسان باید بکوشند تا روش‌های جدیدی مانند سنجش از دور را به کار گیرند. سنجش از دور فرصت بی همتایی را برای ارزیابی پوشش گیاهی، آب و منابع خاک و تغییرات زمانی و مکانی آنها فراهم می نماید (استس و کوزنتینو، ۱۹۸۹؛ پاول و همکاران، ۱۹۸۹).

داده‌های انبوه سنجش از دور را می‌توان با استفاده از *GIS* تفسیر نمود. *GIS* ترکیبی از سخت افزار و نرم افزار کامپیوتری است که به ویژه برای آماده سازی، نمایش، و تفسیر پدیده‌های مربوط به سطح زمین طراحی شده است (ریسر و ایورسون، ۱۹۸۹). داده‌های سنجش از دور مناسب برای ارزیابی

منابع خاک و کیفیت آنها از منابع گوناگونی از جمله تصاویر *MSS*[1] و *TM*[2] ماهواره لندست، تصاویر ماهواره‌های *NOAA-AVHRR , EOS, HIRIS, SPOT* و*MODIS* قابل دستیابی می‌باشد. پیش از کاربرد روش‌های سودمند سنجش از دور بایستی روش‌های واسنجی و ارزیابی نتایج آن، متناسب با اهداف مورد نظر و با مطالعه صحرایی بسط یافته باشد. بسط روش‌ها می‌تواند با همکاری گروهی متخصصان خاکشناس، جغرافی دان، اکولوژیست چشم‌اندازها، پردازشگر تصاویر و تحلیل‌گر منطقه مورد مطالعه صورت پذیرد. جنبه مهم دیگر بسط روش‌های جدید، به برآورد و تعمیم نتایج محلی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی مربوط می‌شود. برآورد دقیق مقیاس صحیح برای این کار، بزرگترین مشکلی است که باید با ترکیب تکنیک‌های مدل سازی مقیاس، مطالعات صحرایی و سنجش از دور مرتفع شود.

٤-۲- تفکیک گمان‌ها از حقایق

علی‌رغم شدت فراگیر و توجه جهانی، فروسایی خاک هنوز بیش از آنکه جوهر علمی، دقیق و قابل‌اندازه‌گیری یافته باشد، به صورت بیانی تبلیغی و کیفی باقی مانده است. خاکشناسان و دانشمندان علوم گیاهی باید با همکاری یکدیگر، حدود بحرانی متغیرهای خاک را که موجب اختلال در رشد محصولات زراعی یا به مخاطره‌انداختن بی بازگشت کیفیت محیط زیست می‌شود، تعیین نمایند. بلاتکلیفی میان گمان‌ها و حقایق با این بیان که «محدودیت‌های تولید رفع شده و علیرغم احتمال شدت یافتن فروسایی خاک، مقدار محصول بالایی به دست می‌آید» نمود بیشتری می‌یابد. در حقیقت، تولید غذا در مقیاس جهانی در سه تا پنج دهه گذشته جهش قابل توجهی یافته است اما در عین حال، گزارش‌هایی از فرسایش آبی و بادی شدید، بیابان زایی، تراکم و سخت شدن خاک، لاتریتی شدن، شرایط ماندابی و شوری، آبشویی و اسیدی شدن وجود دارد. جامعه علمی می‌تواند صورت مسئله را بیان و شبیه سازی کند اما واقعیت آن است که میزان محصول به دست آمده توسط کاربرد فناوری‌های جدید، با فروسایی و تخریب گسترده منابع خاک جهان همراه بوده است.

تفکیک گمان‌ها از حقایق مستلزم تحقیقات بلند مدت روی گروه‌های بزرگ خاک جهان برای ارائه حدود بحرانی ویژگی‌های خاک می‌باشد. تنها با آگاهی از این حدود بحرانی است که خاکشناسان می‌توانند تفسیر قابل قبولی از وضعیت منابع و ارزیابی شرایط بالقوه و بالفعل آن ارائه نمایند. ارزیابی

1- Multi Spectral Scanner
2- Thematic Mapper

شدت فروسایی خاک و محیط زیست در اثر کاربرد نادرست اراضی یا حفاظت منابع از طریق روش‌های اصلاح مناسب نیز مشروط به این آگاهی است. برخی موارد مجهول نیز وجود دارند که بی درنگ باید مورد توجه قرار گیرند. برای مثال، ما سرعت تشکیل خاک جدید را نمی دانیم و نمی‌توانیم با دقت، حد قابل اغماض هدر رفت خاک را محاسبه نماییم. همچنین، صفات ساختمانی یک خاک را به دشواری می‌توان با استفاده از یک پارامتر واحد به صورت کمّی بیان نمود. تعیین اثر اقتصادی و زیست محیطی تراکم خاک، فرسایش، شوری، اسیدی شدن و... نیز کار آسانی نیست. یک حلقه رابط مهم ولی ضعیف در این موضوع، ناآگاهی از سهم فرایندهای فروسایی خاک در «اثر گلخانه ای» است. در حال حاضر، تخمین قابل قبولی از مقدار ذخیره کربن در قسمت‌های هوموسی شده مواد آلی خاک و سرعت تجزیه آنها و انتشار CO_2 به اتمسفر وجود ندارد.

٤-۳- بازیابی حاصلخیزی اراضی تخریب شده

جامعه جهانی باید برای حرکت به سوی مدیریت مهم‌ترین منبع زیربنایی – خاک – قواعد رفتاری سختی را بپذیرد. از آنجایی که با دستورالعمل‌های اجباری به ندرت توفیق حاصل می‌شود، برنامه ریزان باید استفاده از روش‌های مثبت و تشویقی را برای کاربرد درست اراضی موجود و بهبود حاصلخیزی در زمین‌هایی که به علت سوء مدیریت قبلی رها شده است، مورد توجه قرار دهند. سیاست بلندمدت مدیریت، بر مبنای حفظ، پایدارسازی و افزایش حاصلخیزی خاک برای استفاده و رفاه انسانی قرار دارد. برای تامین غذا و پوشاک حدود ۱۰ تا ۱۱ میلیارد جمعیت ساکن کره زمین، ما چاره ای جز اصلاح خاک‌های تخریب شده نداریم.

برنامه ریزی و اجرای روش‌های قانونی، دشوار است. افزون بر این، ابزارهای قانونی نمی‌توانند به تنهایی موفقیت آمیز باشند. آغاز فرایندهای فروسایی خاک مانند حرکت گلوله برف از ارتفاع است. این فرایندها خودبخود ادامه می یابند و به مرزهای قانونی، سیاسی، ملی یا جغرافیایی محدود نمی شوند. سیاست‌های دولتی برای برنامه ریزی‌های پیشگیرانه یا اصلاح کاربری اراضی ضرورت دارد. «سیاست جهانی خاک» توسط *UNEP* در سال ۱۹۸۲ تنظیم شده است. این سیاست بر مبنای منشور و اعلامیه سازمان ملل متحد بایستی توسط تمامی ملت‌ها پذیرفته شده و مورد احترام قرار گیرد. جامعه جهانی می‌تواند پذیرش این سیاست‌ها را به واسطه ایجاد انگیزه، آموزش و سایر ابزار انسانی تسهیل نماید.

ابزارهای اضطراری مانند تحریم سیاسی و اقتصادی علیه متخلفان می‌تواند آخرین راه اجرای سیاست‌های مذکور محسوب گردد.

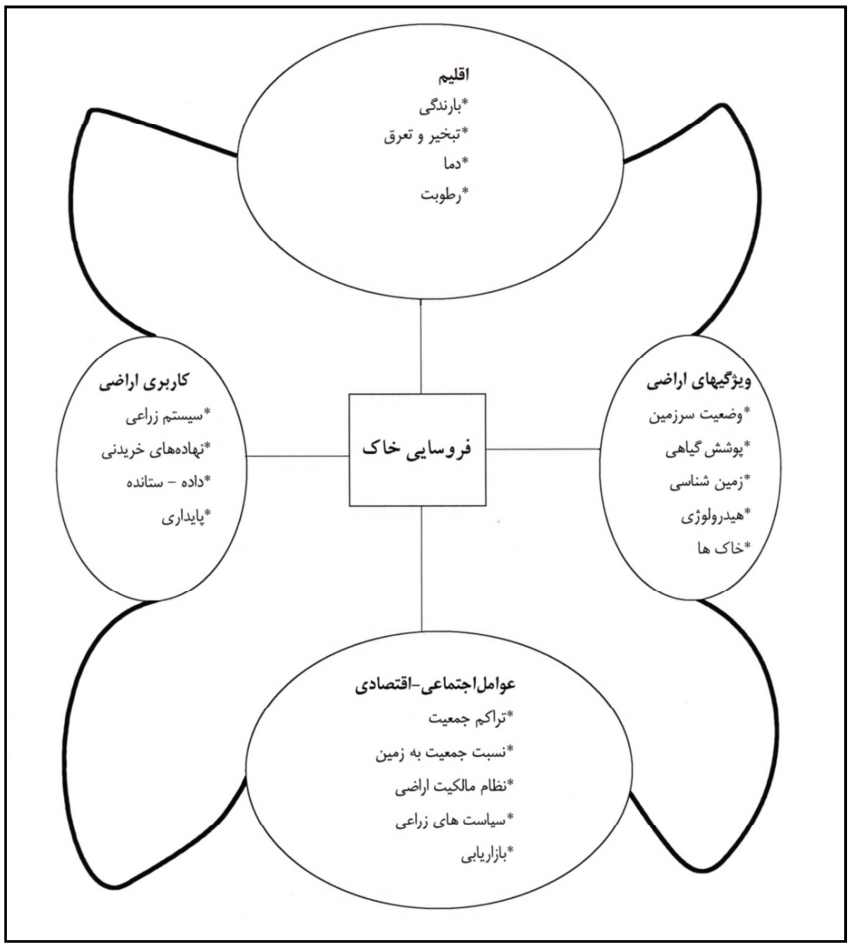
استفاده از سیاست‌های تحدیدی/ پیشگیرانه و ابزارهای قانونی به ویژه برای اراضی حساس و زیست بوم‌های آسیب پذیر الزامی است. مناطقی که از نظر بوم شناختی حساس‌اند، از نظر سیاسی نیز حساسیت دارند و شامل جنگل‌های بارانی حاره، اراضی شیبدار، *Sahel* آفریقایی و مناطق خشک و نیمه خشک مستعد بیابان زایی، می‌گردند. جلوگیری از کاربری اراضی در چنین مناطقی باید با مشاوره نهادهای منطقه ای/ ملی صورت پذیرد. در چنین برنامه ریزی بایستی اقلیم، منطقه، ویژگی‌های ذاتی خاک و عوامل اجتماعی– اقتصادی و فرهنگی در نظر گرفته شود.

جامعه جهانی باید قادر به تامین هزینه‌های چنین برنامه‌های پیشگیرانه/ تحدیدی باشد. نه تنها برخی اراضی باید از گردونه تولید خارج گردد بلکه اراضی دیگری نیز باید با فناوری‌های حفاظتی و با حداقل برداشت به کار گرفته شود. این کار الزامی است، زیرا چنین ابزارهای پیشگیرانه ای اغلب در مناطقی ضرورت می یابند که پیوسته دچار بحران‌های غذایی و دارای اقتصادهای فقیر هستند. برخی از مناطقی که از نظر بوم شناختی حساس‌اند و نیاز مبرم به چنین سیاست‌هایی دارند شامل کشورهایی مانند اتیوپی، نپال،هائیتی، آمریکای مرکزی و حوزه‌اند، کشورهای ساحلی آفریقا و زیست بوم هیمالیا – تبت، می‌گردد. در این کشورها، کشاورزان از نتایج بلند مدت عملیاتی که باعث فروسایی و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود باخبرند اما در عین حال، روش‌های نامناسب را نومیدانه پذیرفته‌اند. در این گونه موارد، جامعه جهانی بایستی برای نجات میراث مشترک و محیط زیست جهانی مداخله کند.

٤-٤- راه‌های همیاری

فروسایی خاک، پدیده ای پیچیده است (شکل ۲۶) که با اثر متقابل قوی میان عوامل اجتماعی– اقتصادی و زیستی– فیزیکی به پیش می‌رود؛ افزایش جمعیت، اقتصاد متزلزل و سیاست‌های زراعی نامناسب انرژی پیشروی آن را تامین می‌کند؛ و عدم تناسب خاک و اقلیم نامساعد آن را تشدید می‌نماید. باید بدانیم که چنین مشکل پیچیده ای راه حل سریع و آسانی ندارد. اگر چه خاکشناسان نقش مهمی در کاستن از مشکل و تغییر جهت فرایند آن ایفا می کنند اما نمی‌توانند به تنهایی این وظیفه کلان را انجام دهند. آنان به هر گونه کمک قابل دستیابی از سایر متخصصان نیاز دارند و باید برای فهم مشکل به سوی سایر نهادها دست یاری دراز کنند.

خاکشناسان باید با اقلیم شناسان، آب شناسان، زمین شناسان و زیست بوم شناسان در فهم فرایندهای اساسی مانند موازنه آب و انرژی، چرخه عناصر اصلی مانند کربن، نیتروژن، فسفر، گوگرد و همچنین با متخصصین زراعت، مهندسان کشاورزی و اقتصاد دانان برای ابداع سیستم‌های کشاورزی مولد، سودآور و پایدار همکاری نمایند. همچنین، آگاهی از ساختار اجتماعی و سیاسی که روند فروسایی خاک‌ها را به واسطه کاربری نادرست اراضی تقویت کرده و بحران دائمی ایجاد می‌کند، الزامی‌است.
این سفارش طولانی شد اما ازین پس، جامعه علمی‌نمی‌تواند غافلانه از فروسایی خاک صرف نظر کند.



شکل ۲۶- وابستگی‌های متقابل فروسایی خاک به عوامل زیستی و اجتماعی- اقتصادی (لعل و استوارت، ۱۹۹۰)

٤-٥- نتیجه‌گیری

جهان، ظرفیت تامین غذا برای خود را دارد و این امری امکان پذیر است، مشروط بر آنکه روند فروسایی خاک معکوس شده و خاک‌های تخریب شده اصلاح گردد. در این راستا، باید یک گروه کاری شامل متخصصان مختلف برای ارزیابی منابع خاک و شناسایی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های آن ایجاد گردد. همچنین، فرایندها، علت‌ها و عوامل فروسایی خاک و حدود بحرانی متغیرهای خاک را که در ورای آنها اساساً بارآوری خاک تنزل می‌کند، باید شناسایی شود و روش‌هایی برای بازیابی حاصلخیزی خاک‌های تخریب شده ابداع گردد. نوآوری‌های فناورانه نه تنها بایستی منجر به افزایش محصول شوند، بلکه باید بر استانداردهای کیفی محیط زیست نیز منطبق باشند. جامعه جهانی باید یک سیاست مدیریت واحد را توسعه دهد. این امر، به ویژه وقتی درست به نظر می‌آید که با زیست بوم‌های حساس و ناپایدار سر و کار داشته باشیم. گروه کاری شامل چندین تخصص، باید سیاست‌هایی برای مدیریت منابع پیشنهاد نمایند که لزوماً در مراحل بعد با عنایت به انگیزه‌های اقتصادی اصلاح و تکمیل خواهد شد.

٤-٦ مراجع

Estes, J. E., and M. J. Cosentino. 1989. Remote sensing of vegetation. pp. 75-112. In: M.B.Rambler, L. Marguis, and R. Fester (eds.), Global ecology: Towards a science of the biosphere. Academic press, NY.

Lal, R. and B.A. Stewart (eds.). 1990. Soil degradation. Advances in soil science,Vol. 11. Springer-Verlag, New York, USA.

Moore, B., M. P. Gildea, C. J. Vorosmarty, D. L. Skole, J. M. Melillo, B. J. Peterson, E. B. Rastertter, P. A. Steudler. 1989. BiogeoChemical cycles. pp.113-142. In: M. B. Rambler, L. Margulis, and R. Gester (eds.), Flobal ecology: Towards a science of the biosphere. Academic press, NY.

Paul, C. K., M. L. Imboff, D. G. Moore, and A. M. sellman. 1989, Remote sensing of environmental change in the developing world. In: D. B. Botkin, M. F. Caswell, J. E. Estes, and A. A. Orio (eds.), Changing the global environment: perspectives on human development. Academic press. NY.

Risser, P. G, and L. R. Iverson. 1989. Geographic information systems and the natural resources issue at the state level. pp. 203-212. In: D. B. Botkin, M. F. Caswell, J. E. Estes, and A. A. Orio (eds.), Changing the global environment: perspectives on human development. Academic press. NY.

UNEP. 1982. World soil policy. UNEP, Nairobi, Kenya.

واژه نامه انگلیسی به فارسی

Best Management Practices (BMP)	عملیات مدیریتی بهینه
Compactability	تراکم‌پذیری
Controlled drainage	زهکشی کنترل شده
Controlled traffic	تردد کنترل شده
Critical water content (CWC)	رطوبت بحرانی
Desirable degree of compaction (DDC)	درجه تراکم مطلوب برای رشد ریشه گیاه
Dry bulk density (DBD)	جرم مخصوص ظاهری خشک
Eutrophication	افزایش عناصر غذایی همراه با کمبود اکسیژن
Geographic Information System (GIS)	سامانه اطلاعات جغرافیایی
Growth limiting bulk density (GLBD)	**مقدار محدود کننده یا حد بحرانی جرم مخصوص ظاهری برای رشد ریشه**
Hard pan	سخت کفه شخم
Hardsetting soils	خاک‌های سخت شونده
Hillside seepage	نشت گرده ای
Integrated water management (IWM)	مدیریت یکپارچه آب
Lower plastic limit (LPL)	حد پایینی خمیری
Maximum dry bulk density (MBD)	حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک (در آزمایش تراکم پراکتور)
Optimum water content	رطوبت بهینه (در آزمایش تراکم پراکتور)
Penetration resistance (PR)	مقاومت به فروروی
Perched shallow water table	سطح ایستابی کم عمق آویزان
Persistent effect of residual compaction	اثر دیرپای تراکم پس ماند
Puddling	شفته شدن یا گلخرابی
Root rot	پوسیدگی ریشه
Soil compaction	تراکم خاک
Soil degradation	فروسایی خاک، تخریب خاک
Soil scape	نمای خاک
Soil wetness and anaerobiosis	شرایط ماندابی و بی‌هوازی خاک
Susceptibility to Compaction	حساسیت به تراکم

Trafficability	قابلیت تردد
Upper plastic limit (UPL)	حد بالایی خمیری
Workability	قابلیت کار بر روی خاک

واژه نامه فارسی به انگلیسی

اثر دیرپای تراکم پس ماند	*Persistent effect of residual compaction*
افزایش عناصر غذایی همراه با کمبود اکسیژن	*Eutrophication*
پوسیدگی ریشه	*Root rot*
تراکم‌پذیری	*Compactability*
تراکم خاک	*Soil compaction*
تردد کنترل شده	*Controlled traffic*
جرم مخصوص ظاهری خشک	*Dry bulk density (DBD)*
حد بالایی خمیری	*Upper plastic limit (UPL)*
حد بحرانی یا مقدار محدود کننده جرم مخصوص ظاهری برای رشد ریشه	*Growth limiting bulk density (GLBD)*
حد پایینی خمیری	*Lower plastic limit (LPL)*
حداکثر جرم مخصوص ظاهری خشک (در آزمایش تراکم پراکتور)	*Maximum dry bulk density (MBD)*
حساسیت به تراکم	*Susceptibility to Compaction*
خاک‌های سخت شونده	*Hardsetting soils*
درجه تراکم مطلوب برای رشد ریشه گیاه	*Desirable degree of compaction (DDC)*
رطوبت بحرانی	*Critical water content (CWC)*
رطوبت بهینه (در آزمایش تراکم پراکتور)	*Optimum water content*
زهکشی کنترل شده	*Controlled drainage*
سامانه اطلاعات جغرافیایی	*Geographic Information System (GIS)*
سخت کفه شخم	*Hard pan*
سطح ایستابی کم عمق آویزان	*Perched shallow water table*
شرایط ماندابی و بی‌هوازی خاک	*Soil wetness and anaerobiosis*
شفته شدن یا گلخرابی	*Puddling*
عملیات مدیریتی بهینه	*Best Management Practices (BMP)*
فروسایی خاک، تخریب خاک	*Soil degradation*
قابلیت تردد	*Trafficability*
قابلیت کار بر روی خاک	*Workability*
مدیریت یکپارچه آب	*Integrated water management (IWM)*

Penetration resistance (PR)	مقاومت به فروروی
Hillside seepage	نشت گرده ای
Soil scape	نمای خاک

Soil Degradation: A World Wide Chalenge

Fouad Tajik
2012