ارزیابی معادله نفوذ آب درخاک به روشهای آبیاری نواری و استوانه دوگانه

شاهرخ زندپارسا و علیرضاسپاسخواه*

چکیده :

برای طراحی آبیاری نواری و کرتی معادله سرعت نفوذ آب در خاک بایستی موجود باشد که ممکنست از روش استوانه دوگانه بدست آید. دراثر فرآیندنفوذ آب در خاک ، آب جایگزین هوا میگردد وهوا باید به طریقی از ستون خاک خارج گردد . به علت موانع ایجاد شده بر سر راه خروج هوا از ستون خاک ، در جلوی جبهه نفوذ ، هوا متراکم شده و فشار آن بیشتر از فشار آتمسفر میگردد. در اثراین فرآیند سرعت نفوذ آب درخاک کاهش می یابد . همچنین بعلت وجود درز ، ترک و شکاف در خاک مزرعه در لحظات اولیه تماس آب با خاک ، آب سریعا" به داخل این منافذ نفوذ کرده و سرعت نفوذ اولیه زیادی را نشان میدهد.

در اندازهگیری نفوذپذیری خاک با استوانههای دوگانه ، هوای جلوی جبهه نفوذ آب در خاک براحتی خارج می شود ولی درحین آبیاری چون عملا"سطح زیادی از زمین را آب فرامیگیرد ، هوای موجود در خاک حبس شده و در اثر فشار ناشی از حبس شدن آن ، سرعت نفوذ کمتر از

---

* بترتیب مربی و استاد بخش آبیاری دانشگاه شیراز

مقادیر اندازه‌گیری شده از استوانه‌های دوگانه اندازه‌گیری میشود. از طرف دیگر غالبا" محل نصب استوانه های دوگانه فاقد درز ، ترک یا شکاف است بنابراین پدیده نفوذ سریع اولیه آب در مزرعه اندازه‌گیری نمی‌شود .

در این مقاله راجع به حبس شدن هوا در جلوی جبهه نفوذ آب ، شکافهای موجود در خاک مزرعه و اثرات آنها بر روی نفوذپذیری خاک بحث شده و روش اصلاح معادله سرعت نفوذ حاصله از روش استوانه دوگانه ارائه میگردد.

مقدمه :

وقتی که آب در یک سطح بزرگ در روی زمین جمع می شود ، برای نفوذ یک حجم مشخص آب درخاک لازم است تا یک حجم مساوی هوا از خلل و فرجهای خاک تخلیه گردد تا جای آب با هوا تعویض شود. درصورتی که هوا نتواند براحتی از ستون خاک تخلیه گردد، فشار آن افزایش یافته و بیشتر از فشار آتمسفر می گردد. حبس شدن هوا در جلوی جبهه نفوذ آب در خاک روی سرعت نفوذ آن اثر می گذارد . با حبس شدن هوا در جلوی جبهه پیشرفت نفوذ آب درخاک ، فشار هوای حبس شده بیشتر از فشار آتمسفر می گردد و این عمل باعث کاهش نیروی محرکه جریان آب به داخل خاک شده و در نتیجه سرعت نفوذ کاهش می یابد.

باور[1] (۱۹۳۷) گفته بود که " جریان آب در خاک در داخل خلل و فرجهای بزرگتر ممکن است متاثر از مقاومت هوای خاک باشد و اگر شدت بارندگی کم باشد و برخی از خلل و فرجها با هوای آزاد در تماس باشند ، آنگاه درفشار هوای خاک تغییری حاصل نمی‌شود. اما اگر آب به طور کم و بیش یکنواخت از تمامی خلل و فرجها به سمت پائین حرکت نماید، فشار هوای خاک افزایش می یابد و از سرعت نفوذ کاسته می گردد."

بسیاری ازمحققان برای بررسی این فرآیند روی نمونه‌های آزمایشگاهی

1- Baver

تحقیق نموده که این نمونه‌ها عموما" شامل یک ستون استوانه‌ای بوده که بابستن انتهای آن شرایط خروج آزادانه هوا از بین می‌رود. پاورز[1] (۱۹۳۴) نشان داد که درصورت باز نبودن انتهای استوانه حاوی خاک ،سرعت نفوذ آب در خاک کاهش می یابد. هورتن[2] (۱۹۴۰) مشاهده کرد که در نمونه‌های آزمایشگاهی فشار هوای معادل ۲/۵ سانتیمتر در زیر جبهه نفوذ، سرعت نفوذنهائی آب در خاک را به نصف تقلیل می‌دهد. پک [3] (۱۹۶۵) نشان داد که سرعت نفوذ آب در استوانه‌های با انتهای بسته به مراتب کمتر از استوانه‌های با انتهای باز است و با زیادشدن طول نمونه‌ها ، سرعت نفوذ آب به خاک بیشتر می‌گردد. آدریان و فرانزینی[4] (۱۹۶۶) با استفاده از قانون دارسی معادله‌ای را برای نفوذ آب در خاک در حالت حبس شدن هوا ارائه داده و نشان دادند که باحبس‌شدن هوا در جلوی جبهه نفوذ ، از سرعت آب در خاک کاسته می گردد. فری و پالمر[5] (۱۹۴۰) در تحقیقات با نمونه‌های آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌هائی که انتهای آنها بسته است ، درابتدای تماس آب با خاک ، آب تحت اثرنیروی ثقل و مکش خاک سریعا" وارد خاک شده و در نتیجه باعث متراکم شدن هوا در زیر جبهه نفوذ می‌گردد. باتداوم نفوذ آب به خاک فشار هوای حبس شده بیشترمی‌گردد تا درنهایت حرکت آب ناشی ازنیروی ثقل متوقف شده و جبهه رطوبتی فقط تحت تاثیر مکش شدید خاک به آرامی جلو می‌رود. درنهایت وقتی فشار هوای حبس شده به حد مشخصی رسید، مقداری از هوای حبس شده از میان خلل و فرجهای خاک آزاد شده و به سطح خاک می‌آید. درنتیجه این فرآیند از فشارهوای حبس شده درزیرجبهه رطوبتی کاسته شده و یکباره شدت نفوذ آب به خاک زیاد می‌شود. در کارهای محققین دیگر نیزاین پدیده‌دیده شده‌است (پک ۱۹۶۵[3] ،آدریان وفرانزینی۱۹۶۶[5] ،کولیس وباند ۱۹۸۱[6]). درحقیقت زمانی حبابهای هوابه سمت بالا حرکت می‌کنند که فشار هوای حبس شده در زیر جبهه نفوذ برابر فشار آب درکمترین عمق

1-Powers
2- Horton
3- Peck
4- Free & Palme
5- Aderian & Franzini
6- Collis & Bond

منطقه اشباع خاک به اضافه فشار نقطه ورود هوا (air entry) گردد.

درمطالعات آزمایشگاهی بر روی ستونهای خاک با دانه‌بندی و طولهای مختلف مشاهده شد که بابستن انتهای استوانه‌ها ، فشار هوا در جلوی جبهه نفوذ زیاد می گردد. در ستونهای کوتاه نسبت به ستونهای بلندتر ، فشار هواسریعتر افزایش می یافت ولی مقدار آن کمتر بود. همچنین در خاکهای درشت دانه‌تر ، فشار هوا سریعتر افزایش یافته ولی حداکثر آن از خاکهای ریز دانه کمتر بود.

برخی از محققان نتایج آزمایشگاهی را به شرایط مزرعه تعمیم داده و غالب آنها بیان داشته اند که برای صحت این امر و جلوگیری از فرار جانبی هوا خاک ، باید سطح خیس شده در مزرعه به اندازه کافی بزرگ باشد. همچنین برای جلوگیری از خروج هوا لازم است تا آب به اندازه کافی در سطح زمین پخش شود. در آبیاری کرتی و نواری یا در آبیاری بارانی باشدت پاشش زیاد، فشار هوای خاک افزایش می یابد ولی در آبیاری شیاری یا آبیاری بارانی با شدت پاشش کم ، فشار هوای حبس شده صفر یا ناچیز می باشد.

دیکسون و لیندن[1] (۱۹۷۲) برای اولین بار در شرایط مزرعه اثرات هوای حبس شده بر نفوذپذیری خاک را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در نقاط مختلف نوار مورد آزمایش ، فشار هوای حبس شده در زیر جبهه نفوذ را اندازه‌گیری نموده و نتیجه گرفتند که فشار هوای حبس شده در مرکز نوار به سمت پائین دست و طرفین نوار کاهش می یافت . ایشان حداکثر فشار هوای حبس شده را برابر ۱۹ سانتی‌متر اندازه‌گیری نموده و نشان دادند که مقدار نفوذ آب به خاک به یک سوم مقداری که در آن هوا در زیر جبهه نفوذ حبس نشده بود تقلیل یافت .

به طورکلی در شرایط مزرعه بعلت غیرقابل کنترل بودن بسیاری از پارامترهای موثر بر نفوذ آب به خاک ، مانند وجود درز ، ترک و شکاف ریشه گیاهان ، تغییرات مکانی شرایط خاک ، عمق لایه غیرقابل نفوذ ، عمق سطح ایستابی ، وجود زهکشهای زیرزمینی و ... ، ارزیابی وضعیت نفوذ

1- Dixon & Linden

آب به خاک بسیار مشکل تر از شرایط آزمایشگاه است و دراین زمینه کارهای کمتری صورت گرفته است . یکی از پارامترهائی که روی فرآیند نفوذ آب به خاک اثر زیادی می گذارد وجود درز ، ترک ، شکاف و خلل و فرجهای بزرگ در شرایط مزرعه است که وقتی آب در سطح مزرعه پخش می‌شود مقدار قابل توجهی از آن در لحظات اولیه بداخل این منافذ نفوذ می کند(پاندی[1] ۱۹۸۵). معمولا" در آبیاری سطحی نفوذپذیری خاک با استفاده ازاستوانه دوگانه اندازه‌گیری می‌شود. بعلت اینکه‌اندازه‌گیری در سطح کوچکی انجام می شود هوای جلوی جبهه پیشرفت آب به خاک براحتی به طرفین جریان می یابد. همچنین بعلت کوچکی سطح این وسائل ، سعی می شود تا در جائی نصب شوند که در خاک سوراخ یا شکافی وجود نداشته باشد. بنابراین در استفاده از این وسائل پدیده نفوذ سریع آب در ابتدای اندازه گیری مشخص نمی شود. در نتیجه ، استفاده از این وسائل در اندازه گیری نفوذ آب به خاک میتواند خطای زیادی را دربرداشته باشد.

در این مقاله منحنی نفوذ آب به خاک که با استفاده از استوانه دوگانه و هیدرولیک جریان در کل نوار بدست آمده ، مقایسه و اثرات حبس هوا و نفوذ سریع در درز و شکافها در لحظات اولیه برای نوار مورد آزمایش تشریح شده است .

روش تحقیق :

در یک نوار با عرض ۵/۵ متر و طول ۱۰۰ متر بابافت لوم سیلتی (Silty Loam) و پوشیده از علفهای هرز که رطوبت وزنی خاک درعمقهای ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتیمتر به ترتیب برابر ۷/۴ و ۱۳/۶ درصد بوده در سه نقطه ابتدا ، وسط و انتهای نوار بااستوانه دوگانه نفوذ آب در خاک اندازه گیری گردید. سپس جریان آبی بادبی ثابت ۰/۰۰۶۱۵ متر مکعب در ثانیه و به مدت ۸۲ دقیقه به نوار وارد گردید. جبهه پیشرفت آب و

1- Pandy

عمق آن در نوار توسط اشلهائی که در فواصل ۵متری از طول نوار نصب شده بودند مرتبا" اندازه گیری شد. در نتیجه در هر زمان آب ذخیره شده در سطح نوار و آب نفوذ یافته در خاک قابل محاسبه بوده است .

نتایج و بحث :

در طرحهای آبیاری زهکشی غالبا" معادله نفوذ تجمعی آب در خاک توسط معادله کستیاکف [1] به شرح زیر بیان میشود :

$$Z = kt^a \qquad (1)$$

که در آن Z عمق آب نفوذ یافته ، t زمان از ابتدای تماس آب با خاک و K و a ضرائب ثابتی هستند که بسته به نوع خاک تغییر میکنند. نتایج اندازه گیری نفوذپذیری که توسط استوانه دوگانه انجام شده در شکل (۱) نشان داده شده است. معادلات نفوذ تجمعی آب در خاک براساس رابطه کستیاکف و با استفاده از رگراسیون و حداقل مجذوراختلافات در سه محل از نوار به شرح زیر محاسبه شده‌اند :

(۲) $Z = 0.59t^{0.49}$ $(R^2 = 0.98^{**})$: ابتدای نوار

(۳) $Z = 0.69t^{0.45}$ $(R^2 = 0.99^{**})$: وسط نوار

(۴) $Z = 1.00t^{0.31}$ $(R^2 = 0.99^{**})$: انتهای نوار

مطابق شکل (۱) برای کل نوار ، معادله بهترین خطی را که نمایشگر همه نقاط اندازه گیری است ، می توان به صورت زیر بیان نمود :

(۵) $Z = 0.725t^{0.42}$ $(R^2 = 0.96^{**})$: کل نوار

1-Kostiakof

** در سطح ۹۹٪ معنی دار می باشد .

همچنین با استفاده از نتایج اندازه گیری عمق آب ، پیشروی و عقب نشینی جبهه آب در طول نوار ، معادله نفوذ تجمعی آب درخاک برای کل نوار به شرح زیر بدست آمد(پارساوهمکاران ۱۳۶۸):

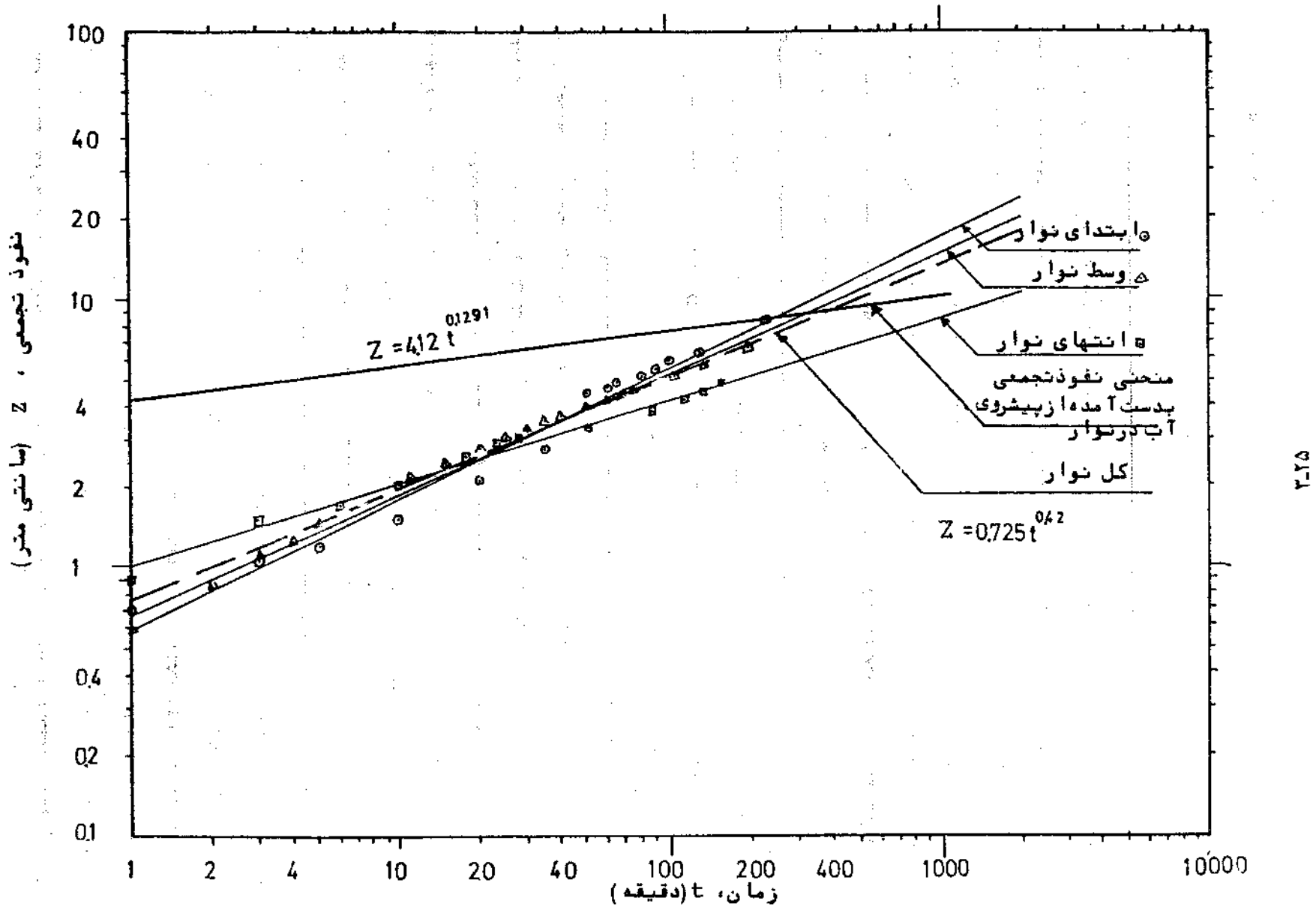
$$Z = 4.12t^{0.1291} \quad (R^2=0.98^{**}) \qquad (۶)$$

مقایسه معادلات نفوذ حاصله از استوانه دوگانه و پیشروی آب درنوار:

باتوجه به اینکه نفوذپذیری از عوامل مهم در طراحی سیستمهای آبیاری زهکشی است ، بنابراین ، تعیین نسبتا" دقیق ضرائب معادله آن از اهمیت خاص برخوردار است . معمولا" در یک نوار نفوذپذیری آب در خاک با استفاده از استوانه دوگانه اندازه گیری می شود، چون در این روش اندازه گیری نفوذ آب در خاک فقط درسطح بسیار کوچکی از مزرعه انجام می گیرد، لذا دقت آن کم میباشد. همانطور که در شکل شماره (۱) دیده می شود بین ضرائب معادله نفوذ که با روش استوانه دوگانه برای کل نوار تعیین گردیده و روشی که باتوجه به پیشرفت جبهه آب در نوار بدست آمده تفاوتهای زیادی به چشم می خورد و مبین این نکته است که تنها با استفاده ازاستوانه دوگانه نمی توان معادله نفوذ آب در خاک را برای نوار بدست آورد.

در روشهای استوانه دوگانه و پیشروی جبهه آب در طول نوار ، مقدار k به ترتیب برابر ۰/۷۲۵ و ۴/۱۲ (cm/min^a) و مقدار a به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۱۲۹۱ بدست آمده که دلایل این تفاوتها را می توان به صورت زیر بیان نمود:

همانطور که در شکل شماره (۱) ملاحظه میشود، شیب منحنی نفوذ تجمعی که از پیشروی آب در نوار محاسبه شده است کمتر از شیب منحنی نفوذ تجمعی بدست آمده از روش استوانه دوگانه می باشد. این امر باعث می‌گردد تا ازسرعت نفوذ در هنگام آبیاری نواری با شدت بیشتری کاسته گردد، یعنی برای کل نوار سرعت نفوذ آب در خاک کمتر از سرعت نفوذ اندازه گیری شده از استوانه دوگانه است . در روش استوانه دوگانه خاک اطراف استوانه ها درحین اندازه گیری خشک بوده و باحرکت عمودی آب



شکل ۳-۲۵ مقایسه ضرائب معادله نفوذ حاصل ازآزمایش با استوانه دوگانه وپیشروی آب درنوار

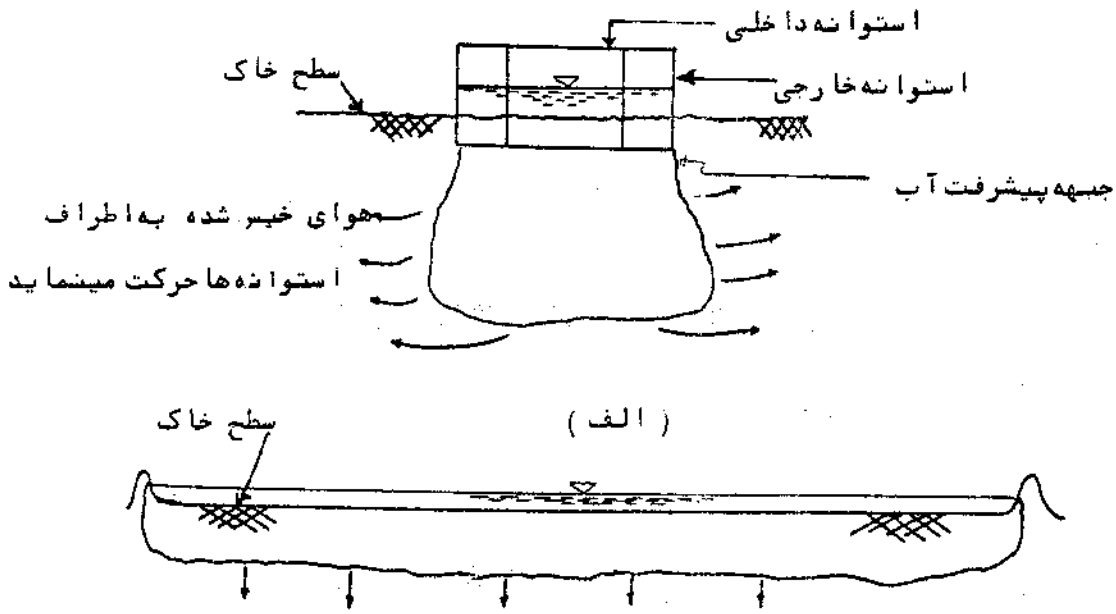
در میان استوانه ها ، هوای موجود در خلل و فرج خاک می تواند بسهولت به اطراف استوانه ها جریان یابد. در نتیجه جریان هوا در زیر جبهه نفوذ آب مقاومت کمتری در برابر جریان آب ایجاد میکند. این موضوع در شکل شماره (۲) نشان داده شده است .

درتحقیقات روی نمونه های آزمایشگاهی نیز این روند را می توان مشاهده نمود. مثلا" پک [1] (۱۹۶۵) در آزمایش نفوذپذیری روی نمونه‌های آزمایشگاهی نتایج مشابهی را بدست آورده که در شکل شماره (۳) نشان داده شده است . درحالتی که انتهای نمونه بسته است ، شیب منحنی نفوذتجمعی به مراتب کمتر از حالتی است که انتهای آن باز بوده و هوا براحتی می توانست از آن تخلیه گردد. ایشان برای سایر حالات و طولهای مختلف نمونه‌ها نتایج مشابهی را بدست آورد. در تحقیقات رات و همکاران [2] (۱۹۷۴) نیز میتوان این موضوع را استنباط کرد که در همه آزمایشهای انجام گرفته بر روی نوارها (جهت مدلهای آبیاری سطحی) ، شیب منحنی نفوذ تجمعی بدست آمده از روش استوانه دوگانه بیشتر از شیب واقعی منحنی نفوذ تجمعی بوده است .

همچنین با بررسی معادلات بدست آمده برای کل نوار (معادله ۶) و استوانه دوگانه (معادله ۵) مشخص میگردد که در معادله نفوذ حاصل از پیشروی آب در نوار ، مقدار نفوذاولیه آب در خاک بیشتر است. یعنی در لحظات اولیه تماس آب با سطح خاک ، آب سریعا" وارد درز ، ترک ، شکاف و سوراخهای درشت خاک می گردد. چون سطح استوانه دوگانه کوچک بوده و معمولا" در جائی نصب میشود که سوراخ یا شکافی در سطح خاک وجود ندارد، لذا پدیده نفوذ سریع آب در ابتدای اندازه‌گیری کمتر اتفاق می افتد ولی سطح نوار مملو از ترک و شکاف بوده و آب سریعا" به داخل این منافذ نفوذ می نماید. در نتیجه باعث می شود که در لحظات اولیه مقدارآب نفوذ یافته در کل نوار بیشتر از مقدار آب نفوذ یافته

1- Peck

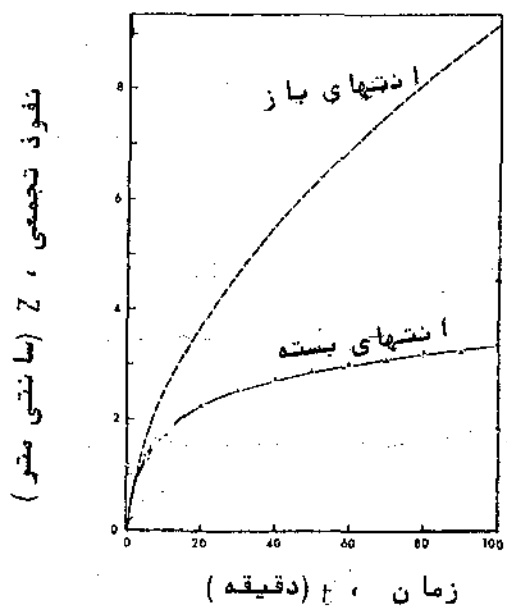
2- Roth et al.



با حرکت آب به پائین هوا بیشتر محبوس شده و مقاومت در برابر حرکت آب بیشتر میشود.

(ب)

شکل ۲ مقایسه چگونگی نفوذ آب در خاک در استوانه دوگانه (الف) و نوار (ب) .



شکل ۳ـ منحنی نفوذ تجمعی آب درخاک دراستوانه با انتهای باز و بسته (پک[1]، ۱۹۶۵)

۱– Peck

در استوانه دوگانه باشد. این موضوع بخوبی در تحقیقات پاندی [1] (۱۹۸۵) نشان داده شده است . در این تحقیقات آزمایشهائی برای تعیین معادلات نفوذی در یک خاک رسی - سیلتی ترک دار و بدون ترک انجام گرفته که نتایج آن در شکل شماره (۴) نشان داده شده است . در حالتی که خاک دارای ترک و شکاف است ، در لحظات اولیه مقداری از آب بداخل این ترک و شکافها نفوذ می کند که باعث افزایش نفوذ آب در ابتدای اندازه گیری می گردد. در این اندازه‌گیری مقدار نفوذ اولیه معادل چهارسانتی متر بدست آمده است . همچنین در همه آزمایشهای رات و همکاران (۱۹۷۴) مقدار ضریب k در معادله (۱) برای کل نوار بیشتر از مقدار بدست آمده از روش استوانه دوگانه بوده است.

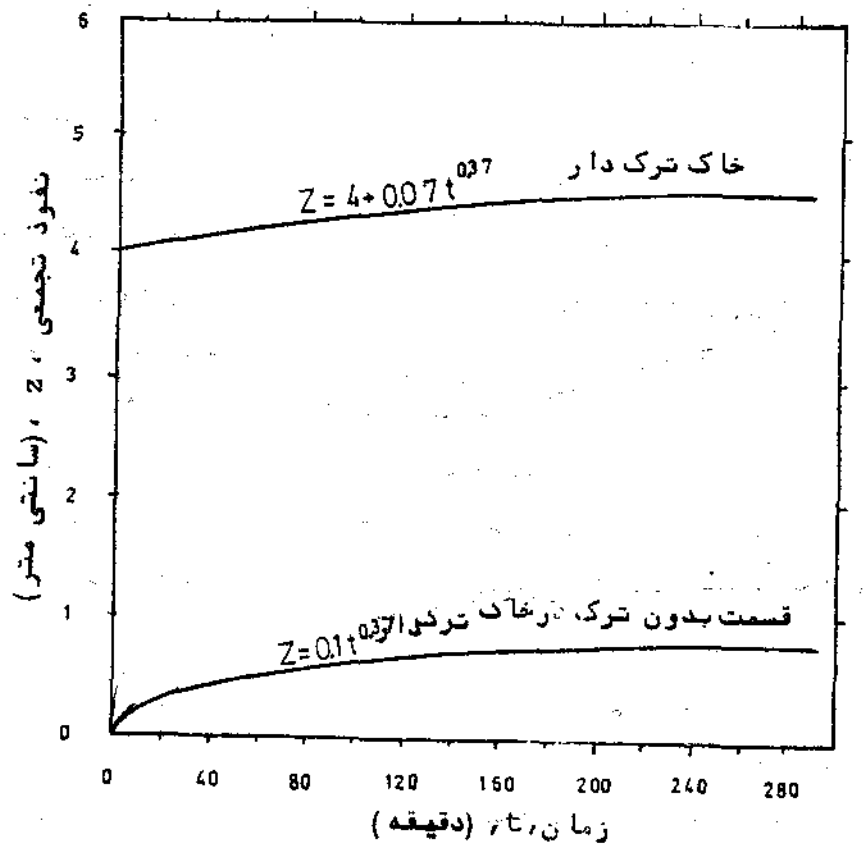
باتوجه به موارد فوق مشخص می شود که اندازه‌گیری نفوذپذیری با استوانه دوگانه می تواند خطای زیادی را باعث شود و معادلات بدست آمده از این روش می تواند معرف خوبی برای یک مزرعه باشد. درصورت استفاده از روش استوانه دوگانه لازم است که در کاربرد معادلات بدست آمده برای مزرعه تصحیحاتی را انجام داد. اگر معادله نفوذتجمعی بدست آمده از استوانه دوگانه و کل نوار به ترتیب به صورت زیر نوشته شوند :

$$Z_1 = k_1 t^{a1} \quad : \text{استوانه دوگانه} \qquad (۷)$$

$$Z_2 = K_2 t^{a2} = A + K_1 t^{a1} - Bt \quad : \text{کل نوار} \qquad (۸)$$

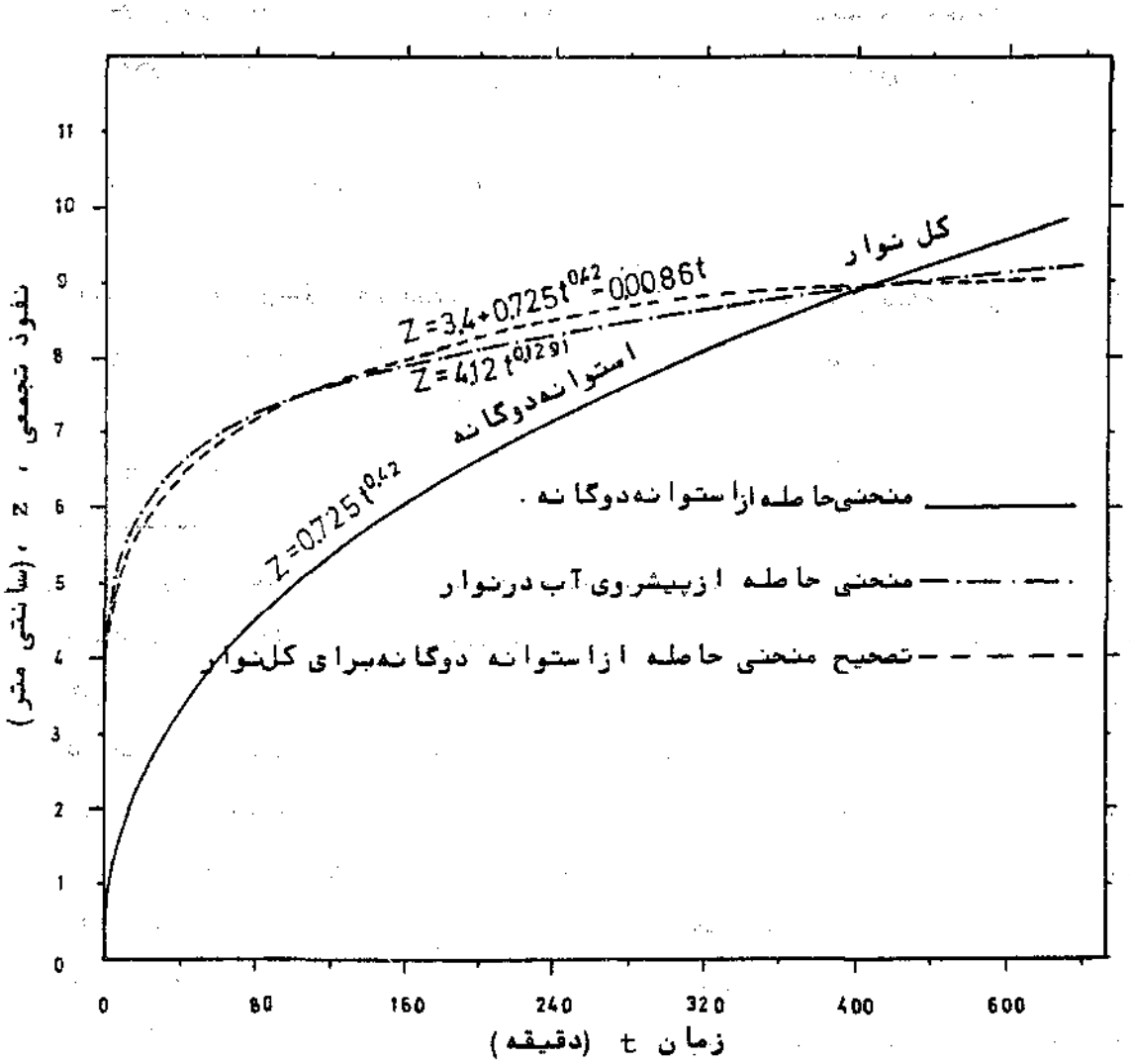
می توان آنها را به همدیگر ارتباط داد. در معادله (۸) جمله A را برای نفوذ اولیه در ترک و شکافها و جمله Bt را برای کاهش نفوذ آب به علت اثر حبس هوا در زیر جبهه نفوذ می توان درنظر گرفت . با استفاده از نتایج این تحقیق مقادیر A و B به ترتیب برابر ۳/۴ سانتی تر و ۰/۰۰۸۶ سانتی متربردقیقه محاسبه شده (پارسا و همکاران ، ۱۳۶۸) و همانطور که از شکل (۵) پیداست معادله نفوذ تجمعی در کل نوار را

1- Pandey



شکل ۴ـ اثر ترک و شکاف بر نفوذ پذیری خاک (پاندی[1] ۱۹۸۵)

1- Pandey



شکل ۵ ـ مقایسه منحنی های نفوذ تجمعی حاصله از استوانه دوگانه ، پیشروی آب در نوار و منحنی نفوذ تجمعی که با در نظرگرفتن اثر ترک و شکاف خاک و هوای محبوس زیر جبهه نفوذ در نوار ، از استوانه دوگانه بدست آمده است .

می‌توان براساس معادله بدست آمده از استوانه دوگانه و تصحیحات مربوط به محبوس شدن هوا و درزو ترک خاک به صورت زیر بیان داشت :

$$Z_2 = 3.4 + 0.725t^{0.42} - 00086t \qquad (9)$$

همانطور که درشکل (۵) دیده می شود منحنی نفوذتجمعی حاصل از نوار از آنچه که از معادله (۹) بدست آمده تطابق بسیار خوبی دارد.

نتیجه گیری :

دراین تحقیق مشخص شد که فقط با استفاده از نتایج اندازه گیری نفوذ آب به خاک با استفاده از استوانه دوگانه نمی توان وضعیت نفوذ آب به خاک را در سطح مزرعه پیش بینی نمود. پارامترهای حبس هوا درزیر جبهه نفوذ آب به خاک و نفوذ سریع آب در درز ، ترک و شکافها از عواملی هستند که باعث خطا در تعیین معادلات نفوذپذیری با استوانه دوگانه میگردند. چون غالبا" در آبیاری نواری یا حوضچه ای ، معادلات نفوذ با استفاده از استوانه دوگانه بدست می آیند، بنابراین جهت کاربرد نتایج آنهادر مزرعه لازم است تا این معادلات براساس شرایط خاک تصحیح و تعدیل گردند. البته در صورتیکه معادلات نفوذ برای طراحی آبیاری نواری یا حوضچه ای از روش نوار بدست آیدنیازی به تصحیح ندارد.

منابع مورد استفاده :

1- Aderian, D.D., and J.B. Franzini. 1966. Impedance to infiltration by pressure buid-up ahead of the wetting front. J. Geoph. Res. 71(24): 5857-5862.

2- Baver, L.D. 1937. Soil characteristics influencing the movement and balance of soil moisture. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 7:431-437.

3- Collis, N.G., and W.J. Bond. 1981. Ponded infiltration into simple soil systems: 2. Pore air pressures ahead of and behind the wetting front. Soil Sci. 131(5) 263-270.

4- Dixon, R.M., and D.R.Linden. 1972. Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc 36:948-953.

5- Free, G.R., and V.J. Palmer. 1940. Interrelationship of infiltration, air movement and pore size in graded silica sand. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 5:390-398.

6- Horton, R.E.1940 . An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 5:399-417.

7- Pandey, R.S. 1985. Effect of cracks on infiltration behaviour in salt affected soils. Indian Soc. Soil Sci. 33:137-140.

8- Peck, A.J. 1965. Moisture profile development and air

compression during water uptake by bounded prous bodies: 3. Vertical columns. Soil Sci. 100(1): 44-51.

9- Powers, W.L. 1934. Soil water movement as affected by confined air. J. Agr. Res. 49:1125-1133.

10- Roth, R.L., D.W.Fonken, D.D. Fangmeier, and K.T. Atchison. 1974. Data for border irrigation models. Trans. ASAE. 17(1):157-161.

۱۱ - پارسا ، ش . ز.ع. ر. سپاسخواه ، و م . محمودیان شوشتری. ۱۳۶۸. کاربرد هیدرولیک جریان سطحی آب برای تعیین ضرائب نفوذ پذیری خاک و منحنی پیشروی آب در نوار . گزارش پژوهش شماره ۹. انتشارات دانشگاه شیراز.