

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی سه نوع پشم‌سنگ در مقایسه با کاه گندم و خاک اره به عنوان بسترهای رشد گلخانه‌ای

چکیده

از آنجا که افزایش سریع جمعیت، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را برای تولید منابع غذایی مناسب و اقتصادی ایجاد می‌کند، سیستم‌های تولید گلخانه‌ای کشت بدون خاک مورد توجه قرار گرفته است. اجزای بسترهای رشد مورد استفاده در باغبانی عمدتاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و به‌ویژه توانایی آن‌ها برای تأمین کافی آب و اکسیژن برای ریشه‌ها انتخاب می‌شوند. این پژوهش برای بررسی امکان استفاده از برخی از بقایای کشاورزی (خاک اره و کاه گندم) و سه نوع پشم‌سنگ (خام، حلاجی‌شده و حلاجی-سرنده) به‌عنوان جایگزینی برای بسترهای رشد تجاری رایج و گران مانند کوکوپیت و پیت انجام شد. ویژگی‌های هیدرولیکی، تهویه‌ای و شیمیایی متعددی شامل آب به آسانی قابل دسترس (EAW)، هوا پس از آبیاری (AIR)، گنجایش نگهداشت آب (WHC)، گنجایش بافري آب (WBC)، مقدار رطوبت اشباع (θ_s)، چگالی ظاهری (BD)، تخلخل کل (TP)، زمان نفوذ قطره آب (WDPT)، pH و رسانایی الکتریکی (EC) در بسترهای مورد بررسی اندازه‌گیری و امتیازدهی شدند. پشم‌سنگ خام ذرات درشت‌تری نسبت به پشم‌سنگ‌های حلاجی‌شده داشت که سبب شد آب خود را سریع‌تر از دست بدهد. فرآوری پشم‌سنگ خام سبب کاهش مقدار رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع به دلیل کاهش اندازه ذرات شد. چهار بستر مورد بررسی، خیلی خوب و یک بستر خوب ارزیابی شدند. بیش‌ترین و کم‌ترین امتیاز به‌ترتیب برای دو بستر خاک اره (۳۴) و پشم‌سنگ حلاجی‌شده (۳۰) بدست آمد. بسترهای رشد مورد بررسی با مقادیر زیاد TP، EAW و WHC و مقادیر کم BD، EC و WDPT در کشت‌های گلخانه‌ای به صورت منفرد یا در ترکیب با سایر بسترهای رایج دیگر قابل استفاده خواهند بود.

کلیدواژه‌ها: پشم‌سنگ خام، خاک اره، کاه گندم، آب به آسانی قابل دسترس، هوا پس از آبیاری، زمان نفوذ قطره آب.

مقدمه

در دهه‌های گذشته تغییر قابل توجهی در رویکرد کشاورزی در مقیاس جهانی ایجاد شده است. از آنجا که افزایش سریع جمعیت، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را برای تولید منابع غذایی مناسب و اقتصادی ایجاد می‌کند، سیستم‌های تولید گلخانه‌ای کشت بدون خاک مورد توجه قرار گرفته است (۱۰). نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند، هرچند این نسبت در کشورهای توسعه‌یافته به ۹۰ درصد نیز می‌رسد؛ بنابراین الگوهای مصرف مواد غذایی تغییر کرده است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، جمعیت انسان‌ها روی کره زمین به حدود ۹/۶ میلیارد می‌رسد که با این جمعیت به فناوری‌های کشاورزی مناسب برای تأمین غذای انسان‌ها و توجه به محیط زیست نیاز است (۱۶).

کشت متداول خاکی و کشاورزی در فضای باز (مزرعه و باغ) دارای مشکلات متعددی از جمله بیماری‌های خاکزاد، کاهش ذخیره مواد آلی خاک در اثر کشت‌های متوالی، عدم امکان کشت برخی از محصولات، عدم کنترل دقیق عناصر غذایی، عدم کنترل علف‌های هرز، کاهش کارایی مصرف آب و عدم کنترل شرایط محیطی نوری و دمایی است (۱۲). استفاده از بسترهای رشد مزایای فراوانی مانند کنترل مصرف آب و کود، تولید محصول در تمام فصل‌های سال، کنترل عوامل موثر در تولید و در نتیجه افزایش کیفیت محصولات دارد (۱۳، ۲۴). یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های گلخانه‌داران، انتخاب بستر رشد مناسب است. در گلخانه‌های گیاهان بومی یک منطقه، می‌توان از خاک آن منطقه به عنوان بخشی از بستر رشد استفاده کرد، اما معمولاً بستر رشد از موادی مانند کمپوست و یا پیت تشکیل شده است (۱۱). با توجه به شرایط اقلیمی و بحران آب در ایران و جهان، توسعه کشت‌های گلخانه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. از طرف دیگر به دلیل قیمت زیاد مواد مورد استفاده در بسترهای رشد و هزینه‌ی زیاد برای وارد کردن آن‌ها، خودکفاشدن در زمینه‌ی تولید موادی جایگزین در عرصه‌ی کشاورزی و کشت‌های گلخانه‌ای بسیار مهم است.

انتخاب بستر رشد به نوع گیاه، مدیریت آبیاری، شرایط آب و هوایی، اندازه‌ی گلدان و شرایط اقتصادی و فنی بستگی دارد. در انتخاب بستر رشد، ویژگی‌های شیمیایی مانند مقدار کافی عناصر غذایی، CEC زیاد، EC و تجزیه کم بستر در طول دوره کشت، گنجایش بافری زیاد و امکان تثبیت pH مهم و ضروری هستند. از ویژگی‌های فیزیکی مهم در انتخاب بستر رشد می‌توان به فراهمی آب و نگهداشت آب زیاد، تهویه مناسب و توزیع اندازه‌ی منافذ مناسب اشاره کرد (۲۲).

اجزای بسترهای رشد مورد استفاده در باغبانی عمدتاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و به‌ویژه توانایی آن‌ها برای تأمین کافی آب و اکسیژن برای ریشه‌ها انتخاب می‌شوند. بسترها باید متخلخل باشند و آب را با نیروهای کمی نگه‌دارند تا گیاهان بتوانند به آسانی آب را جذب کرده و کمبود اکسیژن کم‌تری تجربه کنند (۲۲). در صورت نبود واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیک، عملکرد بستر عمدتاً به ویژگی‌های فیزیکی آن بستگی دارد (۲۱). چون نمی‌توان ویژگی‌های فیزیکی یک بستر را در طول دوره کشت تغییر داد؛ بنابراین پیش از شروع کشت، باید بستر رشد مناسبی انتخاب شود (۳۰). یک بستر رشد دارای ویژگی‌های فیزیکی بهینه مانند گنجایش نگهداشت آب (Water holding capacity, WHC) زیاد، چگالی ظاهری (BD) کم، و مقدار هوا پس از آبیاری (Air after irrigation, AIR) مطلوب است. همچنین برای کاربردی بودن، بستر باید پایدار و ارزان باشد (۱۷). یک بستر رشد مناسب دارای سه کارکرد است: ۱) تأمین مواد مغذی معدنی برای ریشه گیاه، ۲) حمایت مکانیکی از ریشه گیاه و ۳) دارای منافذ بزرگ‌تر از

۳۰ میکرون برای تبادل اکسیژن (تنفس ریشه) و کوچک‌تر از ۳۰ میکرون برای ذخیره آب (۲۸، ۳۳). یک بستر رشد بهینه باید ۸۵ درصد حجمی تخلخل کل (Total porosity, TP)، ۳۰-۱۰ درصد حجمی AIR، ۳۰-۲۰ درصد حجمی آب به آسانی در دسترس (Easily available water, EAW) و ۱۰-۴ درصد حجمی گنجایش بافری آب (Water buffering capacity, WBC) داشته باشد (۲۳).

اجزای بسترهای رشد مخلوط، اغلب با توجه به ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها از مواد آلی و معدنی انتخاب می‌شوند؛ به گونه‌ای که بتوانند یکدیگر را تکمیل کرده و بهترین شرایط را برای رشد و تولید محصول مهیا کنند. به عنوان مثال، بسترهایی مانند پیت (Peat) و کمپوست، اغلب ذرات درشت لازم برای هوادهی مناسب را ندارند و با بسترهایی مانند ماسه و پرلیت (Perlite) مخلوط می‌شوند (۳۱). در مقایسه با اجزای معدنی، اجزای آلی دارای ویژگی‌های فیزیکی متمایزی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به محتوای کربن آلی و فیبر زیاد، BD کم، ماهیت سست، نگهداشت آب زیاد، هوادهی و مقاومت مکانیکی کم اشاره کرد (۶). با این حال، انتخاب مناسب‌ترین بستر رشد برای یک محصول معین، در بسیاری از موارد هنوز به آزمایش‌های پرهزینه گلخانه‌ای و آزمون و خطا متکی است (۲۲).

بسترهای رشد معدنی رایج شامل پرلیت، ماسه، زئولیت، پشم‌سنگ، ورمیکولیت، سنگ‌توف (تفاله معدنی) و پومیس (سنگ پا) هستند و بسترهای آلی شامل خاک اره، پوست درخت کاج، کمپوست، پیت ماس، الیاف نارگیل و پوسته‌ی شلتوک برنج هستند. بسترهای آلی دارای وزن کم، گنجایش نگهداشت آب زیاد، مقاومت زیاد در برابر تراکم، CEC مناسب و حاوی مقدار قابل توجهی مواد و عناصر غذایی هستند. مخلوط‌های مختلفی از بسترهای آلی و غیرآلی نیز برای کاربردهای مختلف باغبانی استفاده می‌شوند (۲۲).

پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از مواد آلی و معدنی به عنوان بستر رشد انجام شده است. بنی‌طالبی و همکاران (۲) در پژوهشی ۲۵ بستر رشد منفرد شامل مواد آلی، مواد معدنی و بیوجارهای تولیدشده از بقایای آلی را مورد بررسی قرار دادند. در بین بسترهای آلی و معدنی به ترتیب بیش‌ترین مقدار رطوبت اشباع برای کوکوپیت و پشم‌سنگ مشاهده شد. پشم‌سنگ تقریباً ۴۰ درصد از آب خود را تا مکش ماتریک ۱۰ hPa از دست داد. آوانگ و همکاران (۱) پنج بستر رشد مخلوط بر پایه کوکوپیت را مورد بررسی قرار دادند که عبارت بودند از: (۱) ۱۰۰ درصد کوکوپیت، (۲) ۷۰ درصد کوکوپیت : ۳۰ درصد پوسته شلتوک برنج سوخته‌شده، (۳) ۴۰

درصد کوکوپیت : ۶۰ درصد الیاف کنفی (Kenaf core fiber)، ۴) ۷۰ درصد کوکوپیت : ۳۰ درصد الیاف کنفی، و ۵) ۷۰ درصد کوکوپیت : ۳۰ درصد پرلیت. نتایج آن‌ها نشان داد که آب قابل دسترس (مقدار آب آزاد شده در محدوده مکش ماتریک ۱ تا ۱ hPa) در بسترهای رشد باهم تفاوت معنی‌دار داشت. بیش‌ترین مقادیر آب قابل دسترس در تیمارهای کوکوپیت و مخلوط ۷۰ درصد کوکوپیت : ۳۰ درصد پوسته شلتوک برنج سوخته‌شده به دست آمد. از آنجایی که مقادیر TP در بین بسترها تفاوت معنی‌داری نداشت، بنابراین آب قابل دسترس زیاد این دو بستر رشد به دلیل فراوانی قابل توجه منافذ ریز آن‌ها بود. تیمارهای حاوی الیاف کنفی گنجایش نگهداشت آب کم‌تری داشتند، که علت آن فراوانی زیاد منافذ درشت بود. سامبو و همکاران (۲۶) گزارش دادند که بسترهای رشد حاوی پوسته شلتوک برنج آسیاب‌شده با اندازه ذرات کوچک، منافذ ریز و آب قابل دسترس زیادی داشتند. ریچاردز و همکاران (۲۵) با بررسی مخلوط‌هایی از پوست درخت کاج : شن و پیت : شن دریافتند که حذف تمام ذرات با اندازه بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر باعث بهبود نگهداشت آب، بدون ایجاد مشکل تهویه می‌شود. کارمونا و همکاران (۵) ویژگی‌های هیدرولیکی چند بستر رشد بر پایه باقی‌مانده‌ی چوب‌پنبه صنعتی تازه و کمپوست شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که وقتی بقایای چوب پنبه به مدت ۷ ماه کمپوست شد، تغییرات مهمی در ویژگی‌های هیدرولیکی این ماده رخ داد. در اثر کمپوست‌سازی، نگهداشت آب در مکش ماتریک hPa ۵ به طور قابل توجهی از ۴۵ به ۵۴ درصد حجمی افزایش یافت، اگرچه این افزایش لزوماً منجر به افزایش آب قابل دسترس برای گیاهان نشد.

پشم‌سنگ ماده‌ای خنثی و از جنس سنگ بوده و در عایق‌کاری و صنایع مهندسی استفاده می‌شود. تخلخل این ماده زیاد بوده و چگونگی آب‌دهی آن مشابه شن (آب‌دهی سریع با کاهش پتانسیل ماتریک) است. از این ماده هم به صورت جدا و هم در ترکیب با بسترهای رشد دیگر می‌توان استفاده نمود (۱۱). بر اساس آمار وزارت کشاورزی ایران (۱۴۰۱)، حدود ۵/۳ میلیون هکتار از زمین‌های کشور به کشت گندم اختصاص یافته است و سالانه مقادیر زیادی بقایای گندم (کاه گندم) بدون استفاده بهینه از بین می‌رود. همچنین مقادیر زیادی خاک اره (Sawdust) نیز در کشور تولید می‌شود. ارزیابی مواد مختلف از جمله باقی‌مانده‌های کشاورزی می‌تواند داده‌های خوبی برای تولیدکنندگان گلخانه فراهم کند تا بسترهای برتر بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی انتخاب و پیشنهاد شوند (۲). بنابراین، هدف از انجام این پژوهش: ۱) بررسی کیفیت فیزیکی و شیمیایی پنج بستر رشد شامل سه نوع بستر معدنی (پشم‌سنگ) و دو بستر آلی (کاه گندم و خاک اره)، و ۲) امتیازبندی کیفیت بسترهای رشد بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و

هیدرولیکی آنها بود. همچنین در این پژوهش ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی متعددی مانند منحنی نگهداشت آب (Water retention curve)، هدایت هیدرولیکی (Hydraulic conductivity) و آب‌گریزی (Water repellency) در بسترهای رشد مورد بررسی قرار گرفت که در پژوهش‌های پیشین کمتر به آنها توجه شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری از بسترهای مورد بررسی در سال ۱۳۹۹ در استان اصفهان انجام شد. اطلاعات مربوط به نمونه‌برداری از بسترهای استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش سه نوع پشم‌سنگ از شرکت پشم‌سنگ اسپادانا اصفهان نمونه‌برداری شد. مواد اولیه برای تولید پشم‌سنگ، سنگ آتشفشانی بازالت از خانواده سنگ‌های آذرین است که در کشور به وفور یافت می‌شود. پشم‌سنگ نوع اول (پشم‌سنگ خام) که مستقیماً پس از تولید، بدون افزودن هر نوع ماده پیوندی به طور فله‌ای بسته‌بندی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع دیگر محصولات پشم‌سنگ با تغییرات بر روی این محصول به دست می‌آید. پس از آن‌که پشم‌سنگ خام تولید شد، با استفاده از دستگاه حلاجی صنعتی فراوری می‌شود (پشم‌سنگ حلاجی‌شده). این محصول پس از تولید با دستگاه مخصوص سرند می‌گردد (پشم‌سنگ حلاجی-سرندشده) که باعث جدا شدن ناخالصی از جمله گُک می‌شود. نمونه‌های بقایای کاه گندم و خاک اره درخت صنوبر نیز از اصفهان تهیه شدند.

جدول ۱. مکان نمونه‌برداری بسترهای رشد مورد بررسی

نماد	مکان تهیه نمونه	اندازه ذرات (mm)	بستر رشد
Rw 1	شرکت پشم‌سنگ اسپادانا-اصفهان	-	پشم‌سنگ نوع ۱
Rw 2	شرکت پشم‌سنگ اسپادانا-اصفهان	-	پشم‌سنگ نوع ۲
Rw 3	شرکت پشم‌سنگ اسپادانا-اصفهان	-	پشم‌سنگ نوع ۳
Ws	اصفهان	<۲	کاه گندم
Sd	اصفهان	<۲	خاک اره درخت صنوبر

Rw 1: پشم‌سنگ خام، Rw 2: پشم‌سنگ حلاجی‌شده، Rw 3: پشم‌سنگ حلاجی-سرندشده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره. نکته: با توجه به ماهیت الیافی پشم‌سنگ اندازه‌گیری اندازه ذرات آن امکان‌پذیر نیست.

اندازه‌گیری pH و EC در بسترهای رشد

مقادیر pH و EC بسترهای رشد در عصاره نسبت حجمی ۱:۱/۵ آب مقطر: بستر رشد و به کمک دستگاه‌های pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد. برای این منظور ابتدا نمونه بستر رشد تحت مکش ماتریک ۳۲ hPa در دستگاه جعبه شن قرار داده شد و سپس درون دو سیلندر که بر روی یکدیگر قرار گرفته بودند، ریخته شد. ارتفاع و قطر سیلندر پایینی به ترتیب ۴/۵ و ۵/۳ سانتی‌متر (حجم تقریباً ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) بود. مواد ریخته‌شده به مدت ۱۰ ثانیه تحت فشار محوری ۱۰ kPa فشرده شد، سپس به کمک یک تیغ تیز مواد در سیلندر رویی از سیلندر زیری جدا شد و محتوای سیلندر زیری با ۱/۵ برابر حجم این سیلندر با آب در یک ظرف آزمایشگاهی با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر ترکیب شد و به مدت ۱۵ دقیقه بر روی دستگاه شیکر قرار داده شد. در نهایت اجازه داده شد تا سوسپانسیون به مدت یک ساعت بر روی یک سطح صاف در حالت سکون قرار گیرد. سپس سوسپانسیون حاصله با کاغذ صافی صاف شده و مقادیر EC و pH آن اندازه‌گیری شد (۲۲).

اندازه‌گیری چگالی ظاهری (BD)، چگالی حقیقی (PD) و تخلخل کل (TP) بسترهای رشد

چگالی ظاهری (BD) بسترهای رشد با استفاده از یک ظرف با حجم یک لیتر و نسبت ارتفاع به قطر بین ۰/۹ : ۱ تا ۱ : ۱ اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بستر در یک سیلندر استیل قرار داده شده و با استفاده از دستگاه تک‌محوری تحت فشار محوری محصور برابر ۹ hPa بارگذاری شدند (۲۲). پس از متراکم‌نمودن نمونه‌ها، حجم آن‌ها محاسبه شده و از نسبت جرم (M_s) به حجم نمونه (V_t) مقدار چگالی ظاهری (BD) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$BD = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

چگالی حقیقی (PD) همه بسترها با روش نفت سفید (Kerosene method) اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه آون-خشک وزن شده، در درون پیکنومتر ریخته شده و حجم مواد خشک‌شده با استفاده از جابجایی حجم توسط نفت سفید تعیین شد (۱۴). تخلخل کل (TP) بسترهای رشد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TP = 1 - \frac{BD}{PD} \quad (2)$$

اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی و آب‌گریزی بسترهای رشد

منحنی نگهداشت آب (WRC) بسترهای رشد با استفاده از دستگاه‌های جعبه‌ی شن و صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در سیلندرهای استیل با قطر ۵/۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر ریخته شده و به منظور جلوگیری از حبس حباب‌های هوا از زیر اشباع شدند. سپس نمونه‌ها در مکش ماتریک ۳۲ hPa در دستگاه جعبه‌ی شن قرار گرفته و پس از رسیدن به تعادل در این مکش، تحت فشار محوری محصور ۲۰ kPa قرار گرفته و نمونه‌ها مجدداً از کف اشباع شدند (۲۲). مکش‌های ماتریک ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از دستگاه‌های جعبه‌ی شن و صفحه فشاری بر نمونه‌ها اعمال شده و پس از رسیدن به تعادل، رطوبت آن‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. در نهایت به داده‌های WRC، معادله ون‌گنوختن-کوسوگی برازش داده شد:

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \leq h_{cVG} \quad (۳)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + m \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m} \quad h > h_{cVG} \quad (۴)$$

که در این معادله، θ مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک h ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، θ_r و θ_s به ترتیب بیانگر مقدار رطوبت باقی‌مانده و مقدار رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) هستند. پارامتر m با شیب ناحیه دوم منحنی WRC ارتباط دارد. h_{0VG} مکش ماتریک در نقطه عطف (hPa) و h_{cVG} مکش ورود هوا (hPa) است (۱۸). برای برازش معادله ون‌گنوختن-کوسوگی بر داده‌های WRC و بهینه‌سازی پارامترهای مدل از ابزار Solver در برنامه MS Excel استفاده شد. همچنین منحنی توزیع اندازه منافذ بسترهای رشد با استفاده از منحنی نگهداشت آب آن‌ها استخراج شد؛ برای این کار قدر مطلق مشتق اول ($d\theta/dh$) معادله ون‌گنوختن-کوسوگی (تابع توزیع اندازه منافذ) به صورت زیر استفاده شد:

$$\frac{d\theta}{dh} = 0 \quad h \leq h_{cVG} \quad (۵)$$

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r)m^2}{(1-m)(h_{0VG} - h_{cVG})} \cdot \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{\frac{m}{1-m}} \cdot \left[1 + m \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m-1} \quad h > h_{cVG} \quad (۶)$$

درصد حجمی هوا پس از آبیاری (AIR)، آب به آسانی قابل دسترس (EAW) و گنجایش بافری آب (WBC) براساس تعاریف ارائه‌شده‌ی زیر نیز محاسبه شد. در این تعاریف، AIR بیانگر تفاضل بین رطوبت اشباع و مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۰ hPa، EAW، بیانگر مقدار آب آزادشده از بستر رشد در دامنه‌ی مکش ماتریک ۱۰ تا ۵۰ hPa (معمولاً بین ۹۰-۷۵٪ مقدار کل

آب قابل دسترس)، WBC برابر با مقدار آب آزاد شده از بستر در دامنه‌ی مکش ماتریک ۵۰ تا ۱۰۰ hPa و WHC گنجایش نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰ hPa است (۹):

$$AIR = \theta_0 - \theta_{10} \quad (۷)$$

$$EAW = \theta_{10} - \theta_{50} \quad (۸)$$

$$WBC = \theta_{50} - \theta_{100} \quad (۹)$$

$$WHC = \theta_{10} \quad (۱۰)$$

که در این روابط θ_0 ، θ_{10} ، θ_{50} و θ_{100} به ترتیب بیانگر مقادیر رطوبت در مکش‌های ماتریک صفر (رطوبت اشباع)، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال بر حسب $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ هستند.

آب‌گریزی بسترهای رشد با استفاده از آزمایش نفوذ قطره آب (Water drop penetration time, WDPT) تعیین شد. برای این منظور با قطره‌چکان سه قطره آب بر روی سطح بسترهای رشد که پیش از این در دمای ۶۰ درجه سلسیوس آون-خشک شده بودند قرار داده شد و زمان نفوذ هر قطره آب به درون نمونه یادداشت شد. میانگین حسابی زمان‌های ثبت شده برای سه قطره آب به عنوان پایداری آب‌گریزی (Water repellency persistence) بسترهای رشد در نظر گرفته شد (۲۲).

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) بسترها به روش بار ثابت اندازه‌گیری شده و به کمک معادله داریسی محاسبه شد:

$$J_w = K_s \frac{dH}{dz} \quad (۱۱)$$

که در این معادله، J_w شدت جریان آب عبوری از نمونه (cm s^{-1})، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s^{-1}) و $\frac{dH}{dz}$ گرادیان هیدرولیکی اعمال شده بر دو سر نمونه است. برای اندازه‌گیری K_s ابتدا نمونه‌ها درون سیلندرهای استیل با قطر ۵/۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر ریخته شدند. نمونه‌ها به آهستگی از کف اشباع شده و در مکش ماتریک ۱۰۰ hPa در دستگاه جعبه شن-کائولین قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها دوباره از کف اشباع شده و K_s آن‌ها اندازه‌گیری شد (۳۲). تغییرات حجم آب خروجی از نمونه با زمان، اندازه‌گیری شد و زمانی که جریان ماندگار حاصل شد، شدت جریان (J_w) از تقسیم حجم آب خروجی بر سطح مقطع نمونه و زمان، محاسبه شد.

چارچوب امتیازدهی برای ارزیابی بسترهای رشد

به منظور ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده بسترهای رشد، شاخص‌ها و ویژگی‌های EAW، AIR (۲۷)،

EC (۳۰) و WDPT (۷) با گروه‌بندی پنج کلاسی بررسی شدند (جدول ۲)، در حالی که برای شاخص‌ها و ویژگی‌های K_s ، pH، TP،

BD و WBC از گروه‌بندی سه کلاسی استفاده شد (۲۲). در نهایت پس از محاسبه مجموع امتیازهای بدست‌آمده از جداول ۲ و ۳،

امتیازدهی کلی برای ۵ بستر رشد براساس جدول ۴ انجام شد. در این گروه‌بندی، بسترهای رشد با مجموع امتیاز بیش‌تر از ۳۱ به

عنوان بستر خیلی خوب و بسترهای با مجموع امتیاز کوچک‌تر یا برابر ۱۳ به عنوان بسترهای نامطلوب ارزیابی می‌شوند.

جدول ۲. معیارهای امتیازدهی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد با گروه‌بندی پنج کلاسی (۷، ۲۳، ۲۷، ۳۳)

ویژگی	امتیاز				
	۱	۲	۳	۴	۵
AIR (%v/v)	<۲	۲-۵	۵-۸	۸-۱۰	>۱۰
EAW (%v/v)	<۱۲	۱۲-۱۶	۱۶-۲۰	۲۰-۲۴	>۲۴
WDPT (s)	آب‌گریزی خیلی شدید	آب‌گریزی شدید	آب‌گریزی زیاد	آب‌گریزی ضعیف	آب‌دوست
EC (dS m ⁻¹)	>۴	۳-۴	۲/۵-۳	۱/۲-۲/۵	۰-۱/۲

AIR: هوا پس از آبیاری، EAW: آب به آسانی قابل دسترس، WDPT: زمان نفوذ قطره آب، EC: رسانایی الکتریکی

جدول ۳. معیارهای امتیازدهی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد با گروه‌بندی سه کلاسی (۲۳).

ویژگی	امتیاز		
	۱	۲	۳
pH	>۶/۵	<۵/۳	۵/۳-۶/۵
BD (Mg cm ⁻³)	>۰/۷	۰/۳-۰/۷	<۰/۳
TP (%v/v)	<۵۰	۵۰-۸۵	>۸۵
WBC (%v/v)	>۱۰ و <۴	۴-۱۰	-
K_s (cm h ⁻¹)	>۳۶۰۰ و <۳۶	۳۶-۱۸۰ و ۱۸۰۰-۳۶۰۰	۱۸۰-۱۸۰۰

BD: چگالی ظاهری، TP: تخلخل کل، WBC: گنجایش بافری آب و K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع.

جدول ۴. گروه‌بندی کلی بسترهای رشد بر اساس مجموع امتیازهای مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (۳).

کلاس	مجموع امتیازها
خیلی خوب	≥ 31
خوب	۳۰-۲۶

۲۵-۲۰

متوسط

۱۹-۱۴

رضایت بخش

≤ ۱۳

نامطلوب

Very good: خیلی خوب، Good: خوب، Medium: متوسط، Satisfactory: رضایت بخش و Non-satisfactory: نامطلوب.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس برای بررسی اثر نوع بستر رشد بر ویژگی‌ها و پارامترهای مختلف مورد بررسی بر اساس طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری و رسم نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزارهای MS Excel، Sigma Plot 12.3 و SAS 9.6 انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد

در جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی شاخص‌ها و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بین بسترهای رشد تفاوت معنی‌دار داشتند ($p < 0.05$).

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در بسترهای رشد مورد بررسی

منابع	درجه	میانگین مربعات										
		WBC	WHC	AIR	EAW	K _s	WDPT	TP	PD	BD	EC	pH
خطا	آزادی											
بستر	۴	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۲**	۰/۱۲۱**	۲۳۹۹۶/۷**	۶۶/۸**	۶۹/۷**	۲/۰۹**	۰/۰۴**	۰/۱۴**	۰/۴۹**
رشد												
خطا	۱۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۱۱۳/۷	۰/۰۰۰۱	۰/۶۸۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۹
ضریب	-	۶/۸۲	۲/۲۵	۱۳/۷	۳/۴۹	۵/۰۵	۲۹/۶	۰/۹۴	۴/۳۹	۶/۸۴	۹/۵۰	۱/۵۷
تغییرات												

** بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است. EC: رسانایی الکتریکی، BD: چگالی ظاهری، PD: چگالی حقیقی، TP: تخلخل کل، WDPT: زمان نفوذ قطره آب، K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع، EAW: آب به آسانی قابل دسترس، AIR: هوا پس از آبیاری، WHC: گنجایش نگهداشت آب، WBC: گنجایش بافری آب.

مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بین بسترهای رشد در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر pH در بسترهای رشد در دامنه ۵/۲۷-۶/۳۵ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار pH مربوط به بستر کاه گندم و کم‌ترین مقدار آن مربوط به بستر پشم‌سنگ خام بود (جدول ۶). مقادیر pH دو بستر آلی با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (۲) در بسترهای مشابه هم‌خوانی دارد. مقدار pH بهینه بسترهای

رشد برای جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در حدود ۶ است (۱). بنابراین استفاده از بسترهای رشد مورد بررسی برای کشت، از نظر pH محدودیتی ایجاد نمی‌کند. با این حال گلخانه‌داران می‌توانند به آسانی pH بسترهای رشد را در هنگام استفاده با تنظیم pH محلول غذایی کنترل کنند.

مقادیر EC بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه ۰/۸۳-۰/۲۶ dS/m متغیر بود (جدول ۶). بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر EC به ترتیب مربوط به کاه گندم و پشم‌سنگ حلاجی‌سرنده شده بود که قابل مقایسه با مقادیر ارائه‌شده توسط بنی‌طالبی و همکاران (۲) در بسترهای مشابه بود. برای بسترهای رشد مقدار EC اولیه بهینه در محدوده ۰/۴-۱/۵ dS/m گزارش شده است (۱). در این پژوهش، EC همه‌ی بسترها کم‌تر از ۱/۵ dS/m بوده که از لحاظ شوری برای استفاده از این بسترها محدودیتی ایجاد نمی‌کند. از بسترهای رایج مورد استفاده در کشت‌های گلخانه‌ای می‌توان به کوکوپیت اشاره کرد. مقادیر pH و EC کوکوپیت در پژوهش‌های پیشین به ترتیب ۵/۶ و ۰/۵۹ dS/m⁻¹ گزارش شده است (۲). بسترهای مورد بررسی در این پژوهش از نظر این دو ویژگی تفاوت چندانی با بستر رایج کوکوپیت ندارند (جدول ۶).

جدول ۶. مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی در بسترهای رشد مورد بررسی

بستر رشد	pH (-)	EC dS m ⁻¹	BD Mg m ⁻³	PD Mg m ⁻³	TP %v/v	EAW	AIR cm ³ cm ⁻³	WHC	WBC	K _s cm h ⁻¹	WDPT (s)
Rw 1	۵/۲۷d	۰/۳۸c	۰/۰۷۹d	۱/۳۳c	۹۴/۰a	۰/۷۷۸a	۰/۱۴۷a	۰/۸۲۲a	۰/۰۲۲d	۳۲۸/۸a	<۱c
Rw 2	۶/۰۷b	۰/۵۰b	۰/۳۶۸a	۲/۷۳a	۸۶/۵c	۰/۴۰۶b	۰/۰۹۷b	۰/۷۹۷ab	۰/۲۶۸b	۲۴۸/۱ b	<۱c
Rw 3	۵/۹۴b	۰/۲۶d	۰/۲۸۰b	۲/۴۴b	۸۸/۶b	۰/۴۳۰b	۰/۰۷۰c	۰/۸۲۸a	۰/۲۹۰a	۱۴۶/۳ c	<۱c
Sd	۵/۷۳c	۰/۴۱c	۰/۱۵۲c	۱/۲۰c	۸۷/۲c	۰/۳۳۴c	۰/۱۰۳b	۰/۷۶۷b	۰/۰۴۸c	۲۳۰/۰ b	۱۲a
Ws	۶/۳۵a	۰/۸۳a	۰/۱۵۸c	۰/۸۱۲d	۸۰/۵d	۰/۲۵۶d	۰/۱۰۵b	۰/۷۰۰c	۰/۰۳۲c	۱۰۰/۶d	۶b

حروف متفاوت در هر ستون بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است. Rw 1: پشم‌سنگ خام، Rw 2: پشم‌سنگ حلاجی‌شده، Rw 3: پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره؛ EC: رسانایی الکتریکی، BD: چگالی ظاهری، PD: چگالی حقیقی، TP: تخلخل کل، EAW: آب به آسانی قابل دسترس، AIR: هوا پس از آبیاری، WHC: گنجایش نگهداشت آب، WBC: گنجایش بافری آب، K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع، WDPT: زمان نفوذ قطره آب.

مقادیر BD بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه ۰/۷۹-۰/۳۶۸ Mg m⁻³ متغیر بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر BD به ترتیب مربوط به بسترهای پشم‌سنگ حلاجی‌شده و پشم‌سنگ خام بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد وجود گُک سنگین در پشم‌سنگ حلاجی-شده سبب BD زیاد این بستر نسبت به سایر بسترها شده است. مقادیر BD در بسترهای آلی در دامنه ۰/۰۵ تا ۰/۳۰ Mg m⁻³ گزارش

شده است (۲۳). بسیاری از تولیدکنندگان بسترهای رشد مایل‌اند بسترهایی با BD کم‌تر از 0.3 Mg m^{-3} عرضه کنند (۸). تمامی بسترهای رشد مورد بررسی به جز پشم‌سنگ حلاجی‌شده دارای BD کم‌تر از 0.3 Mg m^{-3} بودند. مقادیر BD کم بسترهای رشد گلخانه‌ای در زمان آبیاری می‌تواند از تهویه ضعیف جلوگیری کند. علاوه بر این جابه‌جایی بسترهای رشد با وزن سبک آسان‌تر است. هرچند که مقادیر بسیار کم BD بستر رشد نیز مطلوب نبوده و نمی‌تواند حمایت مکانیکی لازم و مکان استقرار مناسبی برای ریشه گیاه فراهم کند.

مقادیر PD بسترهای رشد در دامنه 0.812 تا 2.73 Mg m^{-3} متغیر بوده (جدول ۶) که به ترتیب مربوط به کاه گندم و پشم سنگ حلاجی‌شده بود. بنی‌طالبی و همکاران (۲) نیز مقدار PD برابر 2.78 Mg m^{-3} را برای پشم‌سنگ گزارش کردند. مقادیر TP در دامنه $0.5/0.94-80\%$ متغیر بود و بیش‌ترین مقدار TP در بستر پشم‌سنگ خام مشاهده شد. مقادیر TP تمامی بسترهای مورد بررسی از 80% درصد حجمی بیش‌تر بوده (جدول ۶) که با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (۲) همخوانی دارد. آن‌ها مقدار TP برای بستر رایج کوکوپیت را $91/3\%$ گزارش کردند.

منحنی نگهداشت آب بسترهای رشد

داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی نگهداشت آب (WRC) و برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی بر آن در شکل ۱-الف ارائه شده است. مدل ون‌گنوختن-کوسوگی به خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده برازش یافته است (جدول ۶، $R^2=0.993-0.999$) که نشان از کارایی آن برای مدل‌سازی نگهداشت آب در بسترهای رشد بدون خاک دارد. از دلایل برتری این مدل نسبت به مدل رایج ون‌گنوختن، مفهوم فیزیکی سه پارامتر آن در رابطه با مکش ورود هوا، مکش در نقطه عطف و شیب منحنی نگهداشت آب است (۱۸).

در شکل ۱-ب منحنی توزیع اندازه منافذ بسترهای رشد ترسیم شده است. مکش ماتریک در نقطه اوج این منحنی برابر h_{0VG} بوده که نظیر فراوان‌ترین گروه منافذ است. بزرگ‌ترین h_{0VG} مربوط به بستر پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده است. این بستر رشد ذرات ریزتری نسبت به بسترهای دیگر دارد. به نظر می‌رسد با حلاجی و سرنده‌شدن منافذ ریز این بستر افزایش یافته است. بستر پشم‌سنگ خام دارای منافذ درشت بیش‌تری نسبت به بسترهای دیگر است که منحنی مشخصه رطوبتی آن نیز این یافته را تأیید می‌کند. منحنی مشخصه رطوبتی این بستر رشد دارای بیش‌ترین شیب بوده که نشان‌دهنده‌ی اندازه ذرات درشت آن است. بنابراین در کل تفاوت در

توزیع اندازه منافذ (شکل ۱-ب) باعث تفاوت‌های مشاهده‌شده در منحنی نگهداشت آب بسترها شده است. منحنی نگهداشت آب بسترهای رشد به شدت تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات و منافذ آن‌ها است (۲۲). منحنی نگهداشت آب پشم‌سنگ حلاجی‌شده تفاوت چندانی با پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده نداشت. به نظر می‌رسد که وجود گُک با اندازه درشت (فعالیت فیزیکی-شیمیایی کم) تأثیر چندانی بر نگهداشت آب بستر پشم‌سنگ حلاجی‌شده نداشته است (شکل ۱-الف).

نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در جدول ۷ ارائه شده است. مقادیر رطوبت اشباع (θ_s) بسترهای رشد در دامنه‌ی $0/961 - 0/800 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار θ_s مربوط به پشم‌سنگ خام بود که به BD کم این بستر مرتبط است. کم‌ترین مقدار θ_s مربوط به بستر کاه گندم بود. این یافته‌ها با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (۲) و آوانگ و همکاران (۱) در بسترهای مشابه هم‌خوانی دارد. بنی‌طالبی و همکاران (۲) مقدار θ_s بستر رشد کوکوپیت را $0/897 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ گزارش کردند. به طور کلی مقادیر کم BD این بسترها سبب θ_s زیاد در آن‌ها شده است. با افزایش مکش ماتریک تا 50 hPa پشم‌سنگ حلاجی‌شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده تقریباً 56 درصد حجمی و پشم‌سنگ خام تقریباً 96 درصد حجمی از آب خود را از دست دادند (شکل ۱-الف). این یافته بدین صورت تفسیر می‌شود که پشم‌سنگ خام ذرات (منافذ) درشت‌تری نسبت به پشم‌سنگ‌های حلاجی‌شده (خردشده و با منافذ ریز) دارد (شکل ۱-ب) که در مکش‌های ماتریک کم بخش زیادی از آب خود را از دست می‌دهند.

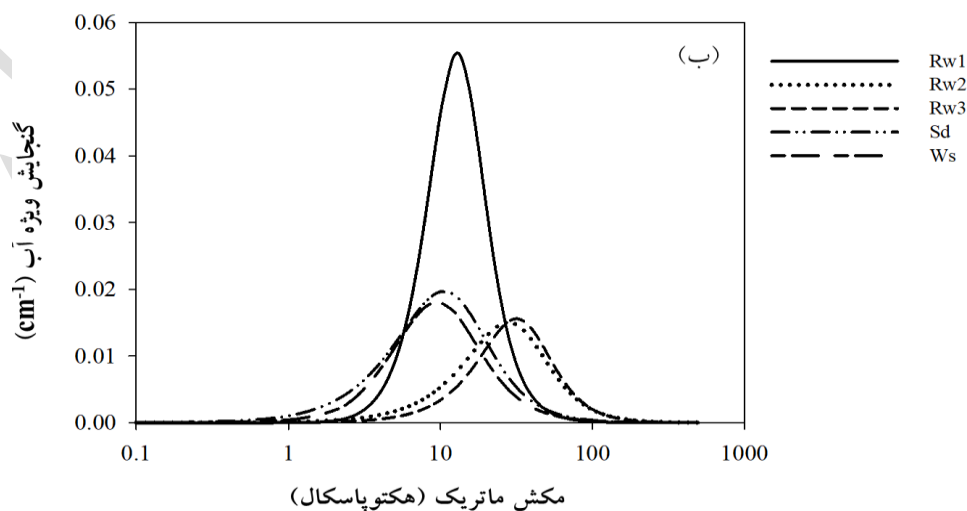
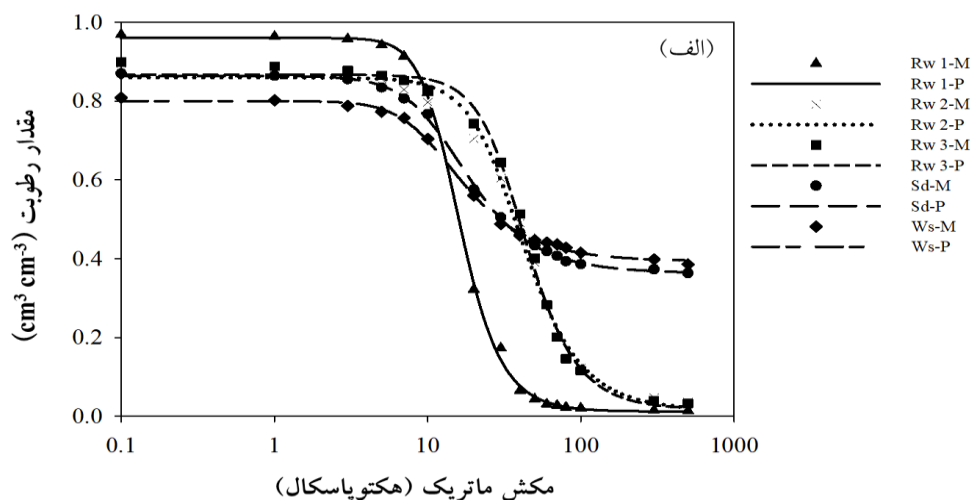
جدول ۷. مقایسه میانگین پارامترهای برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در بسترهای رشد مورد بررسی

بستر رشد	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	m	$h_{cVG} (\text{hPa})$	$h_{0VG} (\text{hPa})$	R^2
Rw 1	$0/013c$	$0/961a$	$0/713a$	$1a$	$13c$	$0/999$
Rw 2	$0/015c$	$0/860b$	$0/637c$	$0/0b$	$30b$	$0/993$
Rw 3	$0/017c$	$0/867b$	$0/671b$	$0/0b$	$32a$	$0/996$
Sd	$0/363b$	$0/864b$	$0/589d$	$0/3ab$	$10d$	$0/999$
Ws	$0/393a$	$0/800c$	$0/570d$	$1/1a$	$9d$	$0/999$

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال $0/05$ است. RW 1: پشم‌سنگ خام، RW 2: پشم‌سنگ حلاجی‌شده، RW 3: پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره؛ h_{0VG} ، h_{cVG} ، m و θ_r پارامترهای برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی و به ترتیب بیانگر شیب منحنی نگهداشت آب، مکش ورود هوا، مکش ماتریک در نقطه عطف، مقدار رطوبت اشباع و مقدار رطوبت باقی‌مانده است.

مقادیر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) بسترهای رشد در دامنه‌ی $0/393 - 0/013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار θ_r مربوط به کاه گندم بود که به فراوانی زیاد منافذ ریز و آب جذب‌سطحی‌شده قابل توجه آن می‌تواند مرتبط باشد (۲، ۳). کم‌ترین مقدار θ_r در بین بسترهای رشد مربوط به سه بستر پشم‌سنگ بود. به طور کلی پشم‌سنگ بخش زیادی از آب خود را در مکش‌های ماتریک کم

از دست می‌دهد (۲). تفاوت قابل توجه بین پشم‌سنگ حلاجی‌شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده با پشم‌سنگ خام در چگونگی آب‌دهی با افزایش مکش ماتریک (خشک‌شدن) است. پشم‌سنگ خام عمده آب خود را تا مکش ماتریک 50 hPa از دست داده در صورتی که پشم‌سنگ حلاجی‌شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده تا مکش ماتریک 100 hPa بخش قابل توجهی از آب خود را آزاد می‌کند (شکل ۱-الف).



شکل ۱- منحنی‌های نگهداشت آب (الف) و تابع توزیع اندازه منافذ (ب) بسترهای رشد مورد بررسی؛ 1: Rw؛ پشم‌سنگ خام، 2: Rw؛ پشم‌سنگ حلاجی‌شده، 3: Rw؛ پشم‌سنگ حلاجی-سرنده‌شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره، حرف M بیانگر داده‌های اندازه‌گیری شده و حرف P بیانگر برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی است. پارامتر m با شیب ناحیه دوم منحنی WRC ارتباط دارد به طوری که با افزایش m شیب

ناحیه غیراشباع شدن این منحنی بیش تر می شود. مقدار پارامتر m بین صفر و یک متغیر است (۱۸). تغییرات پارامتر m بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه $0/719 - 0/570$ بود. بیش ترین مقدار m مربوط به بستر پشم سنگ خام بود (جدول ۷). این بستر ۹۶ درصد از آب خود را تا مکش ماتریک hPa ۵۰ از دست داد (شکل ۱) که تاییدی برای مقدار m زیاد آن است. بنی طالبی و همکاران (۲) نیز با استفاده از مدل ون گنوختن، مقدار n (شیب ناحیه دوم) بزرگی را برای پشم سنگ گزارش کردند.

پارامتر h_{cVG} برابر مکشی است که اولین حباب های هوا وارد بستر رشد شده و اولین قطرات آب از آن خارج می شود؛ بنابراین h_{cVG} مرتبط با عکس قطر موثر بزرگ ترین منافذ است. با کاهش اندازه ذرات، حجم کل منافذ (تخلخل کل و رطوبت اشباع) افزایش یافته، منافذ ریزتر شده و در نتیجه h_{cVG} افزایش می یابد. بسترهای رشد مورد بررسی دارای مقدار h_{cVG} صفر یا نزدیک به صفر بودند که نشان دهنده وجود منافذ درشت در تمامی آنها است. پارامتر h_{0VG} برابر با مکش در نقطه عطف منحنی WRC (مکش نظیر فراوان ترین گروه منافذ) است به طوری که با افزایش h_{0VG} منحنی نگهداشت آب به سمت راست جابجا می شود. دامنه ی تغییرات میانگین این پارامتر بین ۹ تا hPa ۳۲ و به ترتیب مربوط به بسترهای کاه گندم و پشم سنگ حلاجی-سرنده شده بود. پشم سنگ خام با ذرات و منافذ درشت تری نسبت به پشم سنگ های حلاجی شده (خرد شده و با منافذ ریز) دارای h_{0VG} کوچک تری بود (۱۳) در برابر ۳۰ و hPa ۳۲). بنابراین به نظر می رسد در کل فراوری (حلاجی) پشم سنگ خام سبب کاهش نگهداشت آب بیشینه (رطوبت اشباع)، جابجایی توزیع منافذ به سوی مکش های بیشتر یا اندازه های منافذ ریزتر (شکل ۱-ب) و کاهش نرخ آب دهی (کاهش شیب منحنی WRC) آن شده است. افزایش فراوانی منافذ ریز از نظر نگهداشت آب مفید بوده اما احتمالاً از نظر هوادهی و پخشیدگی اکسیژن برای رشد گیاه مشکل ایجاد می کند. به نظر می رسد این موضوع نیاز به بررسی بیش تر در پژوهش های بعدی دارد.

شاخص های نگهداشت آب و تهویه بسترهای رشد

مقادیر EAW در دامنه $0/256$ تا $0/778 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود (جدول ۶). بنی طالبی و همکاران (۲) مقدار EAW کوکویت را برابر $0/328 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ گزارش کردند. به نظر می رسد بسترهای مورد بررسی از نظر شاخص EAW می توانند جایگزین مناسبی برای بستر رایج کوکویت باشند. بیش ترین مقدار EAW مربوط به بستر پشم سنگ خام بوده در حالی که این بستر دارای گنجایش بافری کمی بود ($0/022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). علت EAW کم تر دو بستر پشم سنگ حلاجی شده و پشم سنگ حلاجی-سرنده شده نسبت به پشم سنگ خام، فراوانی منافذ ریز این دو بستر پس از حلاجی می تواند باشد. به این صورت که منافذ ریز این دو بستر باعث کاهش

آب‌دهی با افزایش مکش ماتریک تا ۵۰ hPa شده‌اند. کم‌ترین مقدار EAW مربوط به بستر کاه گندم بود. ذرات با اندازه‌ی مختلف بر توزیع اندازه‌ی منافذ اثر گذاشته و بر تعادل و فراهمی آب و هوا بسته به مقدار رطوبت بسترهای رشد اثر می‌گذارند (۱۵). بستر رشد بهینه باید دارای مقدار EAW در دامنه‌ی $0/20-0/30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ باشد. بنابراین برای افزایش مقدار EAW در بسترهای ترکیبی می‌توان از بسترهای مورد بررسی در این پژوهش استفاده کرد.

یک بستر رشد بهینه باید $0/10-0/30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ هوا پس از آبیاری (AIR) داشته باشد (۲۳). مقادیر AIR برای بسترهای رشد در دامنه $0/07-0/147 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار این ویژگی در بستر پشم‌سنگ خام مشاهده شد. به نظر می‌رسد منافذ درشت این بستر باعث مقدار AIR بیش‌تر آن نسبت به سایر بسترها شده است. کم‌ترین مقدار AIR مربوط به بستر پشم‌سنگ حلاجی-سرنده شده بود که علت آن به منافذ ریز آن پس از حلاجی و سرنده کردن مرتبط است. گنجایش نگهداشت آب (WHC) یک شاخص فیزیکی مهم بسترهای رشد است. مقدار این ویژگی بسته به نوع و اندازه‌ی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بستر رشد تغییر می‌کند (۲). دامنه‌ی تغییرات این ویژگی $0/70-0/828 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. در بین بسترهای مورد بررسی بیش‌ترین مقدار WHC متعلق به پشم‌سنگ حلاجی-سرنده شده بود که علت آن به منافذ ریز آن پس از حلاجی و سرنده کردن می‌تواند مرتبط باشد. تفاوت در مقدار WHC بسترهای رشد می‌تواند ناشی از متفاوت بودن تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ آن‌ها باشد (۴). کاهش مقدار WBC یک بستر می‌تواند منجر به کاهش سریع مقدار رطوبت و در نتیجه کاهش شدید هدایت هیدرولیکی غیراشباع با افزایش مکش ماتریک گردد (۲۲). با توجه به نتایج بدست آمده، تنها در بستر خاک اره مقدار WBC در حد بهینه ($0/04-0/10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بود (۲۳). بسترهای پشم‌سنگ حلاجی‌شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنده شده دارای WBC بیش‌تر از حد بهینه و بسترهای کاه گندم و پشم‌سنگ خام، مقادیر WBC کم‌تر از $0/04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ داشتند که با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (۲) در بسترهای مشابه همخوانی دارد.

آب‌گریزی بسترهای رشد

تأثیر مواد آلی بر آب‌گریزی بسترهای رشد به دلیل استفاده گسترده از آن‌ها مهم است. بسترهای آب‌گریز می‌توانند مشکلاتی ایجاد کنند زیرا پس از خشک‌شدن، به زمان طولانی برای خیس‌شدن مجدد نیاز دارند و ویژگی‌های فیزیکی بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۹، ۲۹). بخش‌های آب‌گریز بستر، شرایط مطلوبی برای انتقال آب به سوی ریشه گیاه نخواهند داشت، که ممکن است

منجر به کاهش رشد سیستم ریشه‌ای و عملکرد گیاه شود (۲۰). در این پژوهش تمام بسترهای مورد بررسی آب‌دوست بودند ($WDPT < 5s$) (جدول ۶) و از این نظر محدودیتی برای استفاده آن‌ها ایجاد نمی‌شود.

هدایت هیدرولیکی اشباع بسترهای رشد

بر اساس نتایج راویو و همکاران (۲۲)، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در بسترهای رشد گلخانه‌ای در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ برابر بیش‌تر از مقادیر آن در خاک‌ها ($4/17 - 4/04 \text{ cm h}^{-1}$) بوده که به دلیل فراوانی بیش‌تر ذرات و منافذ درشت در بسترهای رشد است. تمامی بسترهای رشد مورد بررسی دارای مقادیر K_s زیادی بودند. دامنه تغییرات K_s در تمامی بسترها نسبتاً زیاد (cm h^{-1}) بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر K_s به ترتیب مربوط به دو تیمار پشم‌سنگ خام و کاه گندم بود (جدول ۶). زیادبودن K_s در پشم‌سنگ خام به فراوانی منافذ درشت آن مربوط بوده و کم‌بودن مقدار K_s کاه گندم نسبت به سایر بسترهای رشد را می‌توان به منافذ ریز زیاد این بستر نسبت داد (۲). مقادیر K_s در سه بستر پشم‌سنگ در اثر حلاجی و سرندشدن (افزایش منافذ ریز) کاهش یافت (از $328/8$ به $146/2 \text{ cm h}^{-1}$).

ارزیابی و رتبه‌بندی کلی بسترهای رشد مورد بررسی

براساس سیستم گروه‌بندی (جداول ۲، ۳ و ۴) همه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده بررسی و امتیازدهی شدند (جدول ۸). مقادیر pH تمام بسترها به جز پشم‌سنگ خام در دامنه بهینه ($5/3 - 6/5$) بود (جدول ۶). بنابراین، این بسترها هنگام استفاده در گلخانه‌ها به آهک‌زنی یا تنظیم pH احتیاج ندارند. مقادیر EC برای تمام بسترهای مورد بررسی در دامنه بهینه بود (کم‌تر از $1/5 \text{ dS/m}$). مقادیر BD تمام بسترها به جز پشم‌سنگ حلاجی‌شده در دامنه بهینه ($< 0/3 \text{ Mg m}^{-3}$) بود. تخلخل کل تمام بسترهای رشد به جز کاه گندم بیش‌تر از ۸۵ درصد حجمی بود. مقادیر EAW برای پنج بستر در دامنه بهینه و بیش‌تر از $0/24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. نتایج AIR برای بسترها متفاوت بود. سه بستر دارای AIR بیش‌تر و دو بستر دارای مقدار کم‌تر از ۱۰ درصد حجمی بودند. مقدار AIR به شمار زیادی از عوامل مانند اندازه‌ی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بستر رشد، اندازه‌ی گلدان و تعداد دفعات آبیاری وابسته بوده و دامنه بهینه آن ۳۰-۱۰ درصد حجمی است (۲۳). از آنجایی که تمام بسترهای رشد آب‌دوست بودند، به نظر می‌رسد آب‌گریزی محدودیتی برای گلخانه‌داران در استفاده از این بسترهای رشد ایجاد نمی‌کند.

بر اساس ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده و سیستم امتیازدهی ذکرشده، ۴ بستر مورد بررسی، خیلی خوب و یک بستر خوب ارزیابی شدند (جدول ۸). بیش‌ترین و کم‌ترین امتیاز به‌ترتیب برای دو بستر خاک اره (۳۴) و پشم‌سنگ حلاجی‌شده (۳۰) بدست آمد. به طور کلی عمدتاً تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی (مانند AIR، WBC و K_s) سبب تغییر امتیاز و تمایز رتبه بسترهای رشد مورد بررسی شدند.

جدول ۸. امتیازدهی بسترهای رشد مورد بررسی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

بستر رشد	pH	EC	BD	TP	EAW	AIR	WBC	K_s	WDPT	مجموع امتیاز	ارزیابی
Rw 1	۲	۵	۳	۳	۵	۵	۱	۳	۵	۳۲	خیلی خوب
Rw 2	۳	۵	۲	۳	۵	۴	۱	۲	۵	۳۰	خوب
Rw 3	۳	۵	۳	۳	۵	۳	۱	۳	۵	۳۱	خیلی خوب
Sd	۳	۵	۳	۳	۵	۵	۲	۳	۵	۳۴	خیلی خوب
Ws	۳	۵	۳	۲	۵	۵	۱	۲	۵	۳۱	خیلی خوب

Rw 1: پشم‌سنگ خام، Rw 2: پشم‌سنگ حلاجی‌شده، Rw 3: پشم‌سنگ حلاجی-سرنده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره؛ EC: رسانایی الکتریکی، BD: چگالی ظاهری، TP: تخلخل کل، EAW: آب به آسانی قابل دسترس، AIR: هوا پس از آبیاری، WBC: گنجایش بافری آب، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، WDPT: زمان نفوذ قطره آب. Very good: خیلی خوب، Good: خوب.

نتیجه‌گیری

(۱) بسترهای رشد مورد بررسی با مقادیر زیاد تخلخل کل (TP)، آب به آسانی قابل دسترس (EAW) و گنجایش نگهداشت آب (WHC)، و مقادیر کم چگالی ظاهری (BD)، رسانایی الکتریکی (EC) و زمان نفوذ قطره آب (WDPT) در کشت‌های گلخانه‌ای به صورت منفرد یا در ترکیب با سایر بسترهای رایج دیگر قابل استفاده است.

(۲) نتایج نشان داد پشم‌سنگ خام ذرات درشت‌تری (و در نتیجه منافذ درشت‌تری) نسبت به پشم‌سنگ‌های حلاجی‌شده (خردشده و با منافذ ریز) دارد که در مکش‌های ماتریک کم آب خود را از دست می‌دهد. به طور کلی به نظر می‌رسد فراوری (حلاجی) پشم‌سنگ خام باعث کاهش نگهداشت آب بیشینه (رطوبت اشباع)، کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، جابجایی توزیع منافذ به سوی اندازه‌های ریزتر و کاهش نرخ آب‌دهی (کاهش شیب منحنی WRC) آن شده است. کاه گندم و خاک اره از ضایعات تولیدی در کشور محسوب می‌شوند که استفاده از آن‌ها در بسترهای رشد گلخانه‌ای گامی مهم در مدیریت ضایعات کشاورزی در طبیعت است.

۳) استفاده از بسترهای رشد مورد بررسی می‌تواند جایگزین مناسبی برای بسترهای گران‌قیمت و خارجی مانند پیت و کوکوپیت باشد. مقایسه این بسترها از نظر قیمت با بستر کوکوپیت به دلیل عدم ثبات قیمت‌ها در بازار دشوار است. اما با توجه به فراوانی این بسترها در کشور و همچنین واردات کوکوپیت از کشورهای خارجی (هند و سریلانکا) به نظر می‌رسد این بسترها ارزان‌تر از کوکوپیت باشند. البته ضروری است این بسترهای رشد در کشت‌های گلخانه‌ای به بوته آزمایش گذاشته شده و رشد و عملکرد گیاه در آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

1. Awang, Y., Shazmi Shahron, A., Rosli, B. M. and Selamat, A. 2009. Chemical and physical characteristics of cocopeat-based media mixtures and their effects on the growth and development of *Celosia cristata*. *American journal of agricultural and biological sciences*. 4: 63–71.
2. Banitalebi, G., Mosaddeghi, M. R. and Shariatmadari, H. 2019. Feasibility of agricultural residues and their biochars for plant growing media: Physical and hydraulic properties. *Waste Management*. 87: 577–589.
3. Banitalebi, G., Mosaddeghi, M. R. and Shariatmadari, H. 2021. Evaluation of physico-chemical properties of biochar-based mixtures for soilless growth media. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 23: 950–964.
4. Bunt, A. C. 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. 2nd Ed. Unwin Hyman Ltd., London, Springer, London.
5. Carmona, E., Ordovás, J., Moreno, M., Avilés, M., Aguado, M. and Ortega, M. 2003. Hydrological properties of cork container media. *Horticultural Science*. 38: 1235–1241.
6. Caron, J., Price, J. and Rochefort, L. 2015. Physical properties of organic soil: adapting mineral soil concepts to horticultural growing media and histosol characterization. *Vadose Zone Journal*. 14: 1539–1663.
7. Caron, J., Parent, L. E., Elrick, D. E., and Naasz, R. 2008. Physical properties of organic soils and growing media: Water and air storage and flow dynamics. pp.885–912. Carter, M. R. and Gregorich, E. G. (Eds.). In: Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
8. Cattivello, C. 2011. Factors affecting the swelling capacity of peat-based substrates. *Acta Horticulturae*. 1013: 123–130.
9. De Boodt, M. and Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates used in horticulture. *Acta Horticulturae*. 26: 37–44.
10. Deepagoda, T. K. K., Moldrup, P., Tuller, M., Pedersen, M., ChenLopezde J. C., Jonge, L. W., Kawamoto, K. and Komatsu, T. 2013. Gas diffusivity-based design and characterization of greenhouse growth substrates. *Vadose Zone Journal*. 12: 76–79.
11. Dumroese, R. K., Heiskanen, J., Englund, K. and Tervahauta, A. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass Bioenergy*. 35: 2018–2027.
12. Farran, I. and Mingo-Castel, A. M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research*. 83: 47–53.
13. Gartner, J. B., Still, S. M. and Klett, J. E. 1974. The use of bark waste as a substrate in horticulture. *Acta Horticulturae*. 37: 2003–2013.
14. Gupta, M., Yang, J. and Roy, C. 2002. Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. *Fuel*. 81: 1379–1384.
15. Huang, L. and Gu, M. 2019. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants—A review. *Horticulturae*. 5: 1–14.
16. Kadenyeka, M. V., Omutimba, D. and Harriet, N. 2013. Urban agriculture livelihoods and household food security: a case of Eldoret, Kenya. *Journal of Agriculture and Biological Science*. 8: 90–96.
17. Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A. and Weatherley, A. 2015. Pyrolysis of urban waste streams: Their potential use as horticultural media. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 112: 105–112.
18. Kosugi, K. I. 1994. Three- parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research*. 30: 891–901.

19. Michel, J. C., Riviere, L. M. and Bellon-Fontaine, M. N. 2001. Measurement of the wettability of organic materials in relation to water content by capillary rise method. *European journal of soil science*. 52: 459–467.
20. Naasz, R., Michel, J. C. and Charpentier, S. 2008. Water repellency of organic growing media related to hysteretic water retention properties. *European journal of soil science*. 59: 156–165.
21. Pokorny, F. and Wetzstein, H. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience*. 19: 447–449.
22. Raviv, M., J. and Lieth H. 2008. Significance of soilless culture in agriculture. pp. 1–11. Raviv, M. and Lieth, J. H. (Eds.). In: *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
23. Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., Medina, Sh. and Krasnovsky, A. 1999. The effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 124: 205–209.
24. Rezaee, L., Moosavi, A. A., Davatgar, N. and Shabanpor Shahrestani, M. 2017. Comparison of different soil water retention curve models for evaluation of soil quality index (S) in paddy soils. *Iranian Journal of Soil Research*. 31: 509–524.
25. Richards, D., Lane, M. and Beardsell, D. 1986. The influence of particle-size distribution in pinebark: sand: brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Scientia Horticulturae*. 29: 1–14.
26. Sambo, P., Sannazzaro, F. and Evans, M. R. 2008. Physical properties of ground fresh rice hulls and Sphagnum peat used for greenhouse root substrates. *HortTechnology*. 18: 384–388.
27. Schindler, U., Müller, L. and Eulenstein, F. 2016. Measurement and evaluation of the hydraulic properties of horticultural substrates. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62: 806–818.
28. Schjønning, P., Thomsen, I. K., Moldrup, P. and Christensen, B. T. 2003. Linking soil microbial activity to water- and air- phase contents and diffusivities. *Soil Science Society of America Journal*. Am. J. 67: 156–165.
29. Valat, B., Jouany C. and Riviere L. M. 1991. Characterization of the wetting properties of air-dried peats and composts. *Soil Science*. 152: 100–107.
30. Verdonck, O. and Demeyer, P. 2001. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Horticulturae*. 644: 99–101.
31. Wallach, R., 2008. Physical characteristics of soilless media. pp. 41–116. Raviv, M., Lieth, H. and Bar-Tal, A. (Eds.). In: *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier. The Netherlands, Amsterdam.
32. Wever, G., Nowak, J. S., Oliviera, O. M. D. and Winkel, A. 2004. Determination of hydraulic conductivity in growing media. *Acta Horticulturae*. 648: 135–143.
33. Wilkinson, K. M., Landis, T. D., Haase, D. L., Daley, B. F. and Dumroese, R. K. 2014. *Tropical Nursery Manual: A Guide to Starting and Operating a Nursery for Native and Traditional Plants*. Agriculture Handbook. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service.

Assessment of physical and hydraulic properties of three rockwool types in comparison with wheat straw and sawdust for greenhouse growth media

Author names:

Shahrokh Shahmansouri¹, Mohammad Reza Mosaddeghi^{2*}, Hossein Shariatmadari³

¹ Graduated MSc., Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology,

Email: nosratollah13755@gmail.com

² Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Email:

mosaddeghi@iut.ac.ir

³ Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Email:

shariat@iut.ac.ir

* Corresponding author

Abstract

Challenging issue of supplying economical and suitable food for growing population, has led to greater attention to greenhouse production systems of soilless culture. Components of growth media in horticulture are usually selected based on physical and chemical properties and their abilities in providing enough water and oxygen for roots. This study was conducted to investigate the feasibility of using some agricultural wastes (i.e., sawdust and wheat straw) and three rockwool types (i.e., raw, ground, ground and sieved) as substitutes for commercial greenhouse growing media such as cocopeat and perlite. Several hydraulic, aeration and chemical properties including easily available water (EAW), air after irrigation (AIR), water holding capacity (WHC), water buffering capacity (WBC), saturated water content (θ_s), bulk density (BD), total porosity (TP), water drop penetration time (WDPT), pH and electrical conductivity (EC) were measured and scored in the growth media. Raw rockwool had larger particles compared to ground rockwool, which resulted in its faster water release. Processing of the rockwool decreased the saturated water content and saturated hydraulic conductivity due to the decrease in particles size. Four growth media were scored as very good and one was scored as good. The highest and lowest scores belonged to sawdust (34) and ground rockwool (30), respectively. The studied growth media with high TP, EAW and WHC, and low BD, EC and WDPT can be used individually or in combination with other commercial substrates for greenhouse growth media.

Keywords: Raw rockwool, Sawdust, Wheat straw, Easily available water, Air after irrigation, Water holding capacity, Water drop penetration time.