

ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی سه نوع پشم‌سنگ در مقایسه با کاه گندم و خاک‌اره به‌عنوان بسترهای رشد گلخانه‌ای

شاهرخ شاهمنصوری، محمد رضا مصدقی* و حسین شریعتمداری^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۵)

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 اغلب 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 (خاک‌اره و کاه گندم) و سه نوع پشم‌سنگ (خام، حلاجی شده و حلاجی - سرنده شده) 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 بافری 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 حلاجی شده داشت که سبب شد آب خود را سریع‌تر از دست بدهد. فرآوری پشم‌سنگ خام سبب کاهش مقدار رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌دلیل کاهش اندازه ذرات شد. چهار بستر مورد بررسی خیلی خوب و یک بستر خوب ارزیابی شدند. بیشترین و کمترین امتیاز به‌ترتیب برای دو بستر خاک‌اره (۳۴) و پشم‌سنگ حلاجی شده (۳۰) به‌دست 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.

واژه‌های کلیدی: پشم‌سنگ خام، خاک‌اره، کاه گندم، آب به‌آسانی قابل دسترس، هوا پس از آبیاری، زمان نفوذ قطره آب

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mosaddeghi@iut.ac.ir

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 توسعه یافته 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 برسد 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 مؤثر 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 به‌عنوان 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، خودکفایش 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، اندازه 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 اغلب بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و به‌ویژه توانایی آنها برای تأمین آب و اکسیژن کافی برای ریشه‌ها انتخاب می‌شوند. بسترها باید متخلخل باشند و آب را با نیروهای کمی نگه دارند 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 اغلب 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 مناسب 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 ۴-۱۰ درصد حجمی گنجایش بافری آب (Water buffering capacity, WBC) داشته باشد (۲۳).

پوسته شلتوک برنج سوخته شده، 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 ۱۰ hPa) در بسترهای رشد باهم تفاوت معنی دار داشت. بیشترین مقادیر آب قابل دسترس در تیمارهای کوکوپیت و مخلوط ۷۰ درصد کوکوپیت : ۳۰ درصد پوسته شلتوک برنج سوخته شده به دست آمد. از آنجایی که مقادیر TP در بین بسترها تفاوت معنی داری 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 آسیاب شده 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 کمپوست‌شده را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که وقتی بقایای چوب‌پنبه به مدت ۷ ماه کمپوست شد، تغییرات مهمی در ویژگی‌های هیدرولیکی این ماده رخ داد. در اثر کمپوست‌سازی، نگهداشت آب در مکش ماتریک ۵ hPa به‌طور 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 منفرد و هم در ترکیب با بسترهای رشد دیگر

اجزای بسترهای رشد مخلوط، اغلب با توجه به ویژگی‌های فیزیکی آنها از مواد آلی و معدنی انتخاب می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که بتوانند یکدیگر را تکمیل کرده و بهترین شرایط را برای رشد و تولید محصول مهیا کنند. به‌عنوان 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 خاکاره، پوست درخت کاج، کمپوست، پیت‌ماس، 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 به‌عنوان بستر رشد انجام شده است. بنی‌طالبی و همکاران (۲) در پژوهشی ۲۵ بستر رشد منفرد شامل مواد آلی، مواد معدنی و بیوچارهای تولیدشده از بقایای آلی را مورد بررسی قرار دادند. در بین بسترهای آلی و معدنی به‌ترتیب 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

روی این محصول به دست می‌آید. پس از آنکه پشم‌سنگ خام تولید شد، با استفاده از دستگاه حلاجی صنعتی فراوری می‌شود (پشم‌سنگ حلاجی شده). این محصول پس از تولید با دستگاه مخصوص سرند می‌شود (پشم‌سنگ حلاجی سرند شده) که باعث جدا شدن ناخالصی از جمله گُک می‌شود. نمونه‌های بقایای کاه گندم و خاکاره درخت صنوبر نیز از اصفهان تهیه شدند.

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 ریخته شده 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

می‌توان استفاده کرد (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 خاکاره (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 خاکاره)، 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 استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش سه نوع پشم‌سنگ از شرکت پشم‌سنگ اسپادانای 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 به‌طور مستقیم پس از تولید، بدون افزودن هر نوع ماده پیوندی به‌طور فله‌ای بسته‌بندی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. انواع دیگر محصولات پشم‌سنگ با تغییرات بر

جدول ۱. مکان نمونه برداری بسترهای رشد مورد بررسی

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

Rw 1: پشم سنگ خام، Rw 2: پشم سنگ حلاجی شده، Rw 3: پشم سنگ حلاجی - سرند شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاکاره. نکته: با توجه به ماهیت الیافی پشم سنگ اندازه گیری اندازه ذرات آن امکان پذیر نیست.

و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از دستگاه های جعبه شن و صفحه فشاری بر نمونه ها اعمال شده و پس از رسیدن به تعادل، رطوبت آنها به روش وزنی اندازه گیری شد. در نهایت به داده های WRC، معادله ون گنوختن - کوسوگی برازش داده شد:

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \leq h_{cVG} \quad (3)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + m \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{1-m} \right]^{-m} \quad h > h_{cVG} \quad (4)$$

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 ون گنوختن - کوسوگی بر داده های WRC و بهینه سازی 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 ون گنوختن - کوسوگی (تابع توزیع اندازه منافذ) به کمک روابط ۵ و ۶ محاسبه شد:

$$\frac{d\theta}{dh} = 0 \quad h \leq h_{cVG} \quad (5)$$

متراکم کردن نمونه ها، حجم آنها محاسبه شده و از نسبت جرم (M_s) به حجم نمونه (V_t) مقدار چگالی ظاهری (BD) از رابطه ۱ محاسبه شد:

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

چگالی حقیقی (PD) همه بسترها با روش نفت سفید (Kerosene method) اندازه گیری شد. در این روش، نمونه آون - خشک وزن شده، در درون پیکنومتر ریخته شده و حجم مواد خشک شده با استفاده از جابجایی حجم توسط نفت سفید تعیین شد (۱۴). تخلخل کل (TP) بسترهای رشد با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

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

اندازه گیری ویژگی های هیدرولیکی و آب گریزی بسترهای رشد منحنی نگهداشت آب (WRC) بسترهای رشد با استفاده از دستگاه های جعبه شن و صفحه فشاری اندازه گیری شد. نمونه ها در سیلندرهای استیل با قطر ۵/۳ سانتی متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی متر ریخته شده و به منظور جلوگیری از حبس حباب های هوا از زیر اشباع شدند. سپس نمونه ها در مکش ماتریک ۳۲ hPa در دستگاه جعبه شن قرار گرفته و پس از رسیدن به تعادل در این مکش، تحت فشار محوری محصور ۲۰ kPa قرار گرفته و نمونه ها دوباره از کف اشباع شدند (۲۲). مکش های ماتریک ۵، ۳، ۱، ۷، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰

اندازه‌گیری شده و به کمک معادله داری محاسبه شد:

$$J_w = K_s \frac{dH}{dz} \quad (11)$$

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 اشباع‌شده و در مکش ماتریک ۱۰۰ hPa در دستگاه جعبه‌شن-کائولین قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها دوباره از کف اشباع‌شده 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

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده بسترهای رشد، شاخص‌ها و ویژگی‌های AIR، EAW (۲۷)، EC (۳۰) و WDPT (۷) با گروه‌بندی پنج کلاسی بررسی شدند (جدول ۲)، درحالی که برای شاخص‌ها و ویژگی‌های K_s ، pH، TP، BD و WBC از گروه‌بندی سه کلاسی استفاده شد (۲۲). درنهایت پس از محاسبه مجموع امتیازهای به‌دست‌آمده از جدول‌های 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 به‌عنوان بستر خیلی خوب و بسترهای با مجموع امتیاز کوچک‌تر یا برابر ۱۳ به‌عنوان بسترهای نامطلوب ارزیابی می‌شوند.

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

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r)m^2}{(1-m)(h_{0VG} - h_{cVG})} \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{\frac{m}{1-m}}$$

$$\left[1 + m \left(\frac{h - h_{cVG}}{h_{0VG} - h_{cVG}} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{m-1} \quad h > h_{cVG} \quad (6)$$

درصد حجمی هوا پس از آبیاری (AIR)، آب به آسانی قابل دسترس (EAW) و گنجایش بافری آب (WBC) براساس تعاریف ارائه شده 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 آزادشده از بستر در دامنه‌ی مکش ماتریک ۵۰ تا ۱۰۰ hPa و WHC گنجایش نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰ hPa است (۹):

$$AIR = \theta_0 - \theta_{10} \quad (7)$$

$$EAW = \theta_{10} - \theta_{50} \quad (8)$$

$$WBC = \theta_{50} - \theta_{100} \quad (9)$$

$$WHC = \theta_{10} \quad (10)$$

که در این روابط θ_0 ، θ_{10} ، θ_{50} و θ_{100} به‌ترتیب 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 به‌عنوان پایداری آب‌گریزی (Water repellency persistence) بسترهای رشد در نظر گرفته شد (۲۲).

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) بسترها به روش بار ثابت

جدول ۲. معیارهای امتیازدهی برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد با گروه بندی پنج کلاسی (۷، ۲۳، ۲۷ و 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)	آب گریزی خیلی شدید	آب گریزی شدید	آب گریزی زیاد	آب گریزی ضعیف	<۵۰ آب دوست
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 ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد با گروه بندی سه کلاسی (۲۳)

ویژگی	امتیاز		
	۱	۲	۳
pH	>۶/۵	<۵/۳	۵/۳-۶/۵
(Mg cm ⁻³) BD	>۰/۷	۰/۳-۰/۷	<۰/۳
(%v/v) TP	<۵۰	۵۰-۸۵	>۸۵
(%v/v) WBC	>۱۰ و <۴	۴-۱۰	-
(cm h ⁻¹) K _s	<۳۶ و >۳۶۰۰	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. گروه بندی کلی بسترهای رشد بر اساس مجموع امتیازهای مربوط به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی (۳)

کلاس	مجموع امتیازها
خیلی خوب	≥ ۳۱
خوب	۲۶-۳۰
متوسط	۲۰-۲۵
رضایت بخش	۱۴-۱۹
نامطلوب	≤ ۱۳

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد

در جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس ویژگی های فیزیکی و

احتمال ۵ درصد انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری و رسم نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم افزارهای MS Excel، Sigma Plot 12.3 و SAS 9.6 انجام شد.

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

میانگین مربعات											درجه آزادی	منابع خطا
WBC	WHC	AIR	EAW	K_s	WDPT	TP	PD	BD	EC	pH		
۰/۰۰۵**	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۲**	۰/۱۲۱**	۲۳۹۹۶/۷**	۶۶/۸**	۶۹/۷**	۲/۰۹**	۰/۰۴**	۰/۱۴**	۰/۴۹**	۴	بستر رشد
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۱۱۳/۷	۰/۰۰۰۱	۰/۶۸۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۹	۱۰	خطا
۶/۸۲	۲/۲۵	۱۳/۷	۳/۴۹	۵/۰۵	۲۹/۶	۰/۹۴	۴/۳۹	۶/۸۴	۹/۵۰	۱/۵۷	—	ضریب 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 و WBC: گنجایش بافری آب

۱/۵ 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 گزارش شده است (۲). بسترهای مورد بررسی در این پژوهش از نظر این دو ویژگی تفاوت چندانی با بستر رایج کوکوپیت ندارند (جدول ۶).

مقادیر BD بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه $0.368-0.79 \text{ Mg m}^{-3}$ متغیر بود. بیشترین و کمترین مقادیر BD به ترتیب مربوط به بسترهای پشم‌سنگ حلاجی شده و پشم‌سنگ خام بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد وجود کُک 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 0.30 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 حلاجی شده 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

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

مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بین بسترهای رشد در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر pH در بسترهای رشد در دامنه ۶/۳۵-۵/۲۷ 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 $0.83-0.26 \text{ dS/m}$ متغیر بود (جدول ۶). بیشترین و کمترین مقادیر EC به ترتیب مربوط به کاه گندم و پشم‌سنگ حلاجی سرند شده بود که قابل مقایسه با مقادیر ارائه شده توسط بنی‌طالبی و همکاران (۲) در بسترهای مشابه بود. برای بسترهای رشد مقدار EC اولیه بهینه در محدوده $1.5-0.4 \text{ dS/m}$ گزارش شده است (۱). در این پژوهش، EC همه بسترها کمتر از dS/m

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

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

حروف متفاوت در هر ستون بیانگر تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است. Rw 1: پشم سنگ خام، Rw 2: پشم سنگ حلاجی شده، Rw 3: پشم سنگ حلاجی - سرند شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاکاره؛ 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: هدایت هیدرولیکی اشباع، WDPT: زمان نفوذ قطره آب.

سه پارامتر آن در رابطه با مکش ورود هوا، مکش در نقطه عطف و شیب منحنی نگهداشت آب است (۱۸).

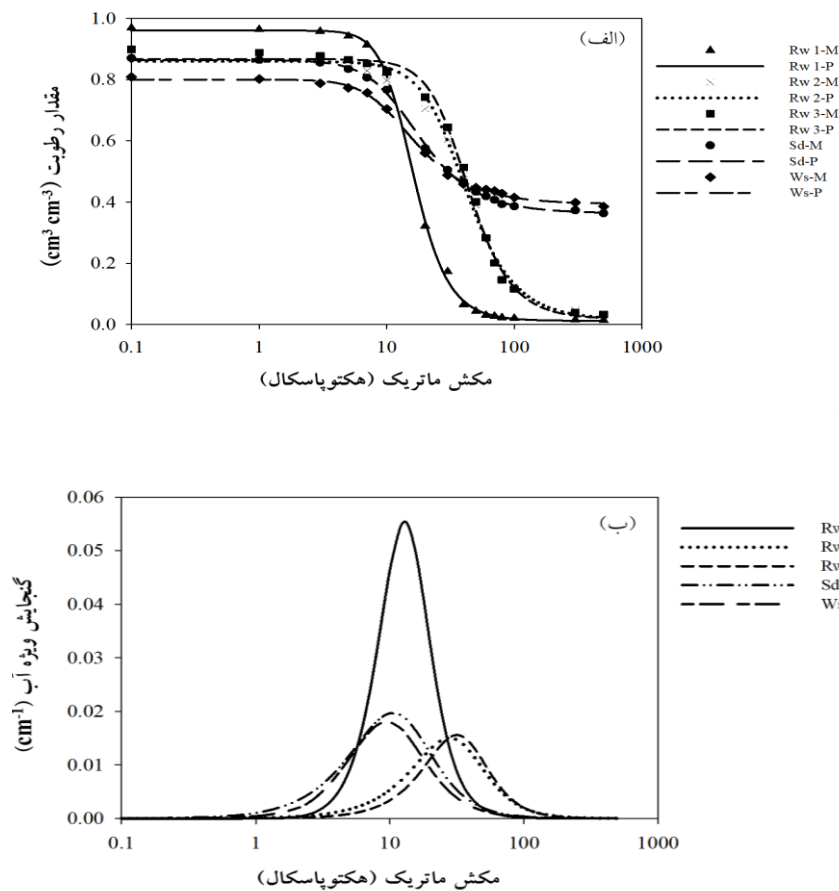
در شکل ۱- ب منحنی توزیع اندازه منافذ بسترهای رشد ترسیم شده است. مکش ماتریک در نقطه اوج این منحنی برابر h_{0VG} بوده که نظیر فراوان ترین گروه منافذ است. بزرگ ترین h_{0VG} مربوط به بستر پشم سنگ حلاجی - سرند شده است. این بستر رشد ذرات ریزتری نسبت به بسترهای دیگر دارد. به نظر می رسد با حلاجی و سرند شدن، منافذ ریز این بستر افزایش یافته است. بستر پشم سنگ خام دارای منافذ درشت بیشتری نسبت به بسترهای دیگر است که منحنی مشخصه رطوبتی آن نیز این یافته را تأیید می کند. منحنی مشخصه رطوبتی این بستر رشد دارای بیشترین شیب بوده که نشان دهنده ی اندازه ذرات درشت آن است. بنابراین، در کل تفاوت در توزیع اندازه منافذ (شکل ۱-ب) باعث تفاوت های مشاهده شده 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 پشم سنگ حلاجی شده تفاوت چندانی با پشم سنگ حلاجی - سرند شده نداشت. به نظر می رسد که وجود گُک با

برای ریشه گیاه فراهم کند.

مقادیر PD بسترهای رشد در دامنه ۰/۸۱۲ تا $۲/۷۳ \text{ Mg m}^{-3}$ متغیر بوده (جدول ۶) که به ترتیب مربوط به کاه گندم و پشم سنگ حلاجی شده بود. بنی طالبی و همکاران (۲) نیز مقدار PD برابر $۲/۷۸ \text{ Mg m}^{-3}$ را برای پشم سنگ گزارش کردند. مقادیر TP در دامنه $۸۰/۵-۹۴/۰ \text{ \% v/v}$ متغیر بود و بیشترین مقدار TP در بستر پشم سنگ خام مشاهده شد. مقادیر TP تمامی بسترهای مورد بررسی از ۸۰ درصد حجمی بیشتر بوده (جدول ۶) که با نتایج بنی طالبی و همکاران (۲) همخوانی دارد. آنها مقدار TP برای بستر رایج کوکوپیت را $۹۱/۳ \text{ \% v/v}$ گزارش کردند.

منحنی نگهداشت آب بسترهای رشد

داده های اندازه گیری شده منحنی نگهداشت آب (WRC) و برازش مدل ون گنوختن - کوسوگی بر آن در شکل ۱- الف ارائه شده است. مدل ون گنوختن - کوسوگی به خوبی بر داده های اندازه گیری شده برازش یافته است (جدول ۷، $R^2=۰/۹۹۳-۰/۹۹۹$) که نشان از کارایی آن برای مدل سازی نگهداشت آب در بسترهای رشد بدون خاک دارد. از دلایل برتری این مدل نسبت به مدل رایج ون گنوختن، مفهوم فیزیکی



شکل ۱. منحنی‌های نگهداشت آب (الف) و تابع توزیع اندازه منافذ (ب) بسترهای رشد مورد بررسی: Rw1: پشم سنگ خام، Rw2: پشم سنگ حلاجی شده، Rw3: پشم سنگ حلاجی-سرنده شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاک اره، حرف M بیانگر داده‌های اندازه‌گیری شده و حرف P بیانگر برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی است.

اندازه درشت (فعالیت فیزیکی - شیمیایی کم) تأثیر چندانی بر نگهداشت آب بستر پشم سنگ حلاجی شده 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 $0.961 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ - $0.800 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود. بیشترین مقدار θ_s مربوط به پشم سنگ 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 برابر $0.897 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ گزارش کردند. به‌طور کلی مقادیر کم BD این بسترها سبب θ_s زیاد در آنها شده است. با افزایش مکش ماتریک تا 50 hPa پشم سنگ حلاجی شده و پشم سنگ حلاجی-سرنده شده تقریباً ۵۶ درصد حجمی و پشم سنگ خام تقریباً ۹۶ درصد حجمی از آب خود را از دست دادند (شکل ۱-الف). این یافته بدین صورت تفسیر می‌شود که پشم سنگ خام ذرات (منافذ) درشت‌تری نسبت به پشم سنگ‌های حلاجی شده (خردشده و با منافذ ریز) دارد (شکل ۱-ب) که در مکش‌های ماتریک کم بخش زیادی از آب خود را از دست می‌دهند.
 مقادیر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) بسترهای رشد در دامنه

مقادیر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) بسترهای رشد در دامنه

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

R ²	hovg (hPa)	hcvG (hPa)	m	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	بستر رشد
۰/۹۹۹	۱۳c	۱a	۰/۷۱۳a	۰/۹۶۱a	۰/۰۱۳c	Rw 1
۰/۹۹۳	۳۰b	۰/۰b	۰/۶۳۷c	۰/۸۶۰b	۰/۰۱۵c	Rw 2
۰/۹۹۶	۳۲a	۰/۰b	۰/۶۷۱b	۰/۸۶۷b	۰/۰۱۷c	Rw 3
۰/۹۹۹	۱۰d	۰/۳ab	۰/۵۸۹d	۰/۸۶۴b	۰/۳۶۳b	Sd
۰/۹۹۹	۹d	۱/۱a	۰/۵۷۰d	۰/۸۰۰c	۰/۳۹۳a	Ws

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است. Rw 1: پشم سنگ خام، Rw 2: پشم سنگ حلاجی شده، Rw 3: پشم سنگ حلاجی - سرند شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاکاره؛ θ_r و θ_s پارامترهای برازش مدل ون گنوختن-کوسوگی و به ترتیب بیانگر شیب منحنی نگهداشت آب، مکش ورود هوا، مکش ماتریک در نقطه عطف، مقدار رطوبت اشباع و مقدار رطوبت باقی مانده است.

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 مؤثر 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 $hovg$ برابر با مکش در نقطه عطف منحنی WRC (مکش نظیر فراوان ترین گروه منافذ) است به طوری که با افزایش $hovg$ منحنی نگهداشت آب به سمت راست جابجا می شود. دامنه تغییرات میانگین این پارامتر بین ۹ تا ۳۲ hPa و به ترتیب مربوط به بسترهای کاه گندم و پشم سنگ حلاجی - سرند 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 $hovg$ کوچک تری بود (۱۳ در برابر ۳۰ و ۳۲ hPa). بنابراین، به نظر می رسد در کل فرآوری (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

$cm^3 cm^{-3}$ ۰/۱۳-۰/۳۹۳ متغیر بود. بیشترین مقدار θ_r مربوط به کاه گندم بود که به فراوانی زیاد منافذ ریز و آب جذب سطحی شده قابل توجه آن می تواند مرتبط باشد (۲ و ۳). کمترین مقدار θ_r در بین بسترهای رشد مربوط به سه بستر پشم سنگ بود. به طور کلی پشم سنگ بخش زیادی از آب خود را در مکش های ماتریک کم از دست می دهد (۲). تفاوت قابل توجه بین پشم سنگ حلاجی شده و پشم سنگ حلاجی - سرند شده با پشم سنگ خام در چگونگی آب دهی با افزایش مکش ماتریک (خشک شدن) است. پشم سنگ خام عمده آب خود را تا مکش ماتریک ۵۰ hPa از دست داده در صورتی که پشم سنگ حلاجی شده و پشم سنگ حلاجی - سرند شده تا مکش ماتریک ۱۰۰ hPa بخش قابل توجهی از آب خود را آزاد می کند (شکل ۱-الف).

پارامتر m با شیب ناحیه دوم منحنی WRC ارتباط دارد به طوری که با افزایش m شیب ناحیه غیر اشباع شدن این منحنی بیشتر می شود. مقدار پارامتر m بین صفر و یک متغیر است (۱۸). تغییرات پارامتر m بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه ۰/۷۱۹-۰/۵۷۰ بود. بیشترین مقدار m مربوط به بستر پشم سنگ خام بود (جدول ۷). این بستر ۹۶ درصد از آب خود را تا مکش ماتریک ۵۰ hPa از دست داد (شکل ۱) که تأییدی 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

رشد است. مقدار این ویژگی بسته به نوع و اندازه‌ی ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بستر رشد تغییر می‌کند (۲). دامنه‌ی تغییرات این ویژگی $0.700-0.828 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. در بین بسترهای مورد بررسی بیشترین مقدار WHC متعلق به پشم‌سنگ حلاجی-سرنند شده بود که علت آن به منافذ ریز آن پس از حلاجی و سرنند 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 شود (۲۲). با توجه به نتایج به دست آمده، تنها در بستر خاکاره مقدار WBC در حد بهینه ($0.10-0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بود (۲۳). بسترهای پشم‌سنگ حلاجی شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنند 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 آب‌گریزی می‌توانند مشکلاتی ایجاد کنند زیرا پس از خشک شدن، به زمان طولانی برای خیس شدن 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 ($WDPT < 50 \text{ s}$) (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

از نظر هوادهی و پخشیدگی اکسیژن برای رشد گیاه مشکل ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد این موضوع نیاز به بررسی بیشتر در پژوهش‌های بعدی دارد.

شاخص‌های 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). بنی‌طالبی و همکاران (۲) مقدار EAW کوکویت را برابر $0.328 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ گزارش کردند. به نظر می‌رسد بسترهای مورد بررسی از نظر شاخص EAW می‌توانند جایگزین مناسبی برای بستر رایج کوکویت باشند. بیشترین مقدار EAW مربوط به بستر پشم‌سنگ خام بوده درحالی که این بستر دارای گنجایش بافاری کمی بود ($0.022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). علت EAW کمتر دو بستر پشم‌سنگ حلاجی شده و پشم‌سنگ حلاجی-سرنند شده نسبت به پشم‌سنگ خام، فراوانی منافذ ریز این دو بستر پس از حلاجی می‌تواند باشد. به این صورت که منافذ ریز این دو بستر باعث کاهش آب‌دهی با افزایش مکش ماتریک تا 5 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 $0.070-0.147 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 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-سرنند شده بود که علت آن به منافذ ریز آن پس از حلاجی و سرنند کردن مرتبط است. گنجایش نگهداشت آب (WHC) یک شاخص فیزیکی مهم بسترهای

نظر می‌رسد آب‌گریزی محدودیتی برای گلخانه‌داران در استفاده از این بسترهای رشد ایجاد نمی‌کند. بر اساس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و سیستم امتیازدهی ذکر شده، ۴ بستر مورد بررسی، خیلی خوب و یک بستر خوب ارزیابی شدند (جدول ۸). بیشترین و کمترین امتیاز به ترتیب برای دو بستر خاک‌اکاره (۳۴) و پشم‌سنگ حلاجی شده (۳۰) به دست آمد. به‌طور 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.

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 حلاجی شده (خردشده و با منافذ ریز) دارد که در مکش‌های ماتریک کم، آب خود را از دست می‌دهد. به‌طور کلی به نظر می‌رسد فرآوری (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 خاک‌اکاره 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

هیدرولیکی اشباع (K_s) در بسترهای رشد گلخانه‌ای در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ برابر بیشتر از مقادیر آن در خاک‌ها ($4/17 - 0/04 \text{ cm h}^{-1}$) 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 به نسبت زیاد ($100/6 - 328/8 \text{ cm h}^{-1}$) 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 کم بودن 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

بر اساس سیستم گروه‌بندی (جدول ۲، ۳ و ۴) همه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده 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 حلاجی شده 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، اندازه 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

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

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

Rw 1: پشم‌سنگ خام، Rw 2: پشم‌سنگ حلاجی شده، Rw 3: پشم‌سنگ حلاجی-سرنده شده، Ws: کاه گندم، Sd: خاکاره؛ 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.

است این بسترهای رشد در کشت‌های گلخانه‌ای به بوت‌ه آزمایش گذاشته شده و رشد و عملکرد گیاه در آنها مورد بررسی قرار گیرد.

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

منابع مورد استفاده

- Awang, Y., A. Shazmi Shahron, B. M. Rosli and A. Selamat. 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.
- Banitalebi, G., M. R. Mosaddeghi and H. Shariatmadari. 2019. Feasibility of agricultural residues and their biochars for plant growing media: Physical and hydraulic properties. *Waste Management* 87: 577-589.
- Banitalebi, G., M. R. Mosaddeghi and H. Shariatmadari. 2021. Evaluation of physico-chemical properties of biochar-based mixtures for soilless growth media. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23: 950-964.
- Bunt, A. C. 1988. Media and Mixes for Container-Grown Plants. 2nd Ed. Unwin Hymnan Ltd., London, Springer, London.
- Carmona, E., J. Ordovás, M. Moreno, M. Avilés, M. Aguado and M. Ortega, 2003. Hydrological properties of cork container media. *Horticultural Science* 38: 1235-1241.
- Caron, J., J. Price and L. Rochefort. 2015. Physical properties of organic soil: adapting mineral soil concepts to horticultural growing media and histosol characterization. *Vadose Zone Journal* 14: 1539-1663.
- Caron, J., L. E. Parent, D. E. Elrick and R. Naasz. 2008. Physical properties of organic soils and growing media: Water and air storage and flow dynamics. PP.885-912. Carter, M. R. and E. G. Gregorich, (Eds.). *In: Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Cattivello, C. 2011. Factors affecting the swelling capacity of peat-based substrates. *Acta Horticulturae* 1013: 123-130.
- De Boodt, M. and O. Verdonck, 1972. The physical properties of the substrates used in horticulture. *Acta Horticulturae* 26: 37-44.
- Deepagoda, T. K. K., P. Moldrup, M. Tuller, M. Pedersen, J. C. ChenLopezde, L. W. Jonge, K. Kawamoto and T. Komatsu. 2013. Gas diffusivity-based design and characterization of greenhouse growth substrates. *Vadose Zone Journal* 12: 76-79.
- Dumroese, R. K., J. Heiskanen, K. Englund and A. Tervahauta. 2011. Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass Bioenergy* 35: 2018-2027.
- Farran, I. and A. M. Mingo-Castel. 2006. Potato minituber production using aeroponics: effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research* 83: 47-53.
- Gartner, J. B., S. M. Still and J. E. Klett. 1974. The use of bark waste as a substrate in horticulture. *Acta Horticulturae* 37: 2003-2013.
- Gupta, M., J. Yang, and C. Roy. 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 M. Gu. 2019. Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants-A review. *Horticulturae* 5: 1-14.
 16. Kadenyeka, M. V., D. Omutimba and N. Harriet. 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., D. Chen, D. B. Madhavan, A. Downie and A. Weatherley. 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., L. M. Rivie`re and M. N. Bellon-Fontaine, 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., J. C. Michel and S. Charpentier. 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 H. Wetzstein. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience* 19: 447-449.
 22. Raviv, M., J. and H. Lieth. 2008. Significance of soilless culture in agriculture. pp. 1-11. Raviv, M. and J. H. Lieth. (Eds.). *In: Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
 23. Raviv, M., R. Wallach, A. Silber, S. Medina and A. Krasnovsky. 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., A. A. Moosavi, N. Davatgar, and M. Shabanpor Shahrestani. 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., M. Lane and D. Beardsell. 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., F. Sannazzaro and M. R. Evans. 2008. Physical properties of ground fresh rice hulls and Sphagnum peat used for greenhouse root substrates. *HortTechnology* 18: 384-388.
 27. Schindler, U., L. Müller and F. Eulenstein. 2016. Measurement and evaluation of the hydraulic properties of horticultural substrates. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62: 806-818.
 28. Schjønning, P., I. K. Thomsen, P. Moldrup and B. T. Christensen. 2003. Linking soil microbial activity to water-and air-phase contents and diffusivities. *Soil Science Society of America Journal* 67: 156-165.
 29. Valat, B., C. Jouany and L. M. Rivie`re. 1991. Characterization of the wetting properties of air-dried peats and composts. *Soil Science* 152: 100-107.
 30. Verdonck, O. and P. Demeyer. 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 A. Bar-Tal. (Eds.). *In: Soilless culture: Theory and Practice*. Elsevier. The Netherlands, Amsterdam.
 32. Wever, G., J. S. Nowak, O. M. D. Oliviera and A. Winkel. 2004. Determination of hydraulic conductivity in growing media. *Acta Horticulturae* 648: 135-143.
 33. Wilkinson, K. M., T. D., Landis, D. L. Haase, B. F. Daley and R. K. Dumroese. 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 as Greenhouse Growth Media

Sh. Shahmansouri, M. R. Mosaddeghi* and H. Shariatmadari¹

(Received: October 1-2022 ; Accepted: November 26-2022)

Abstract

According to the rapid population growth, the challenging issue of production of economic and suitable food sources has led to greater attention to soilless culture greenhouse production systems. 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 particle 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 combined with other commercial substrates for greenhouse growth media.

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

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

*: Corresponding author, Email: mosaddeghi@iut.ac.ir