اشاره

گیاهان درحفظِ تعادلِ بوم‌سازگان (اکوسیستم)ها نقش اساسی دارند؛ اما تاکنون به ندرت در فناوری‌های نوین به‌ویژه رباتیک، الگوی طراحی و تولید بوده‌اند و تعداد اندکی از پژوهشگران به فکر ساخت ربات با الهام از گیاهان افتاده‌اند. در این گزارش ساختار، عملکرد، قابلیت‌ها و کاربردهای رباتی گیاهی به نام «پلانتوئید» معرفی می‌شود. پلانتوئید نخستین رباتی است که نه‌تنها رفتارها و سازوکارهای گیاهان را تقلید می‌کند؛ بلکه ساخت آن نگاهی نو به گیاهان ایجاد کرده است. در این نوشته، همچنین ربات گیاهی دیگری که مانند پیچکی بالارونده است و برخی پژوهش‌های زیربنای ساخت ربات‌های گیاهی نیز معرفی می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: پلانتوئید، رباتیک گیاهی.

مریم انصاری
کارشناس گروه علوم سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

هوشمندی گیاهان

در فناوری‌های جدید به‌ویژه رباتیک، به ندرت گیاهان الگوی الهام طراحی و تولید بوده‌اند

مقدمه

رباتیک رشته‌ای در حال تکامل مداوم است. روزبه‌روز ربات‌های بیشتری به جامعه عرضه می‌شوند. اغلب این ربات‌ها رفتارهای انسان و جانوران را بازآفرینی می‌کنند. در رباتیک اغلب نقش بالقوهٔ مهم‌ترین جانداران سیارهٔ زمین، یعنی گیاهان، نادیده گرفته شده است.

مرتبط کردن ربات‌ها با انسان و جانوران آسان‌تر به نظر می‌رسد، زیرا آن‌ها را مخلوقاتی هوشمند و دارای آگاهی می‌دانیم؛ اما در فناوری‌های جدید به‌ویژه رباتیک، به ندرت گیاهان الگوی الهام طراحی و تولید بوده‌اند. شاید علت آن، تفاوت‌های اساسی اصول عملکرد گیاهان در مقایسه با جانوران و مشکلات بررسی و مطالعهٔ جنبش‌ها و حرکت‌های گیاهی و دیگر ویژگی‌های آن‌ها باشد.

گروهی از پژوهشگران مرکز میکروروباتیک در «مؤسسه فناوری ایتالیا»[1] مسیر پژوهشی جدیدی در پیش گرفته‌اند. آن‌ها رباتی به نام «پلانتوئید»[2] ساخته‌اند که رفتارها و سازوکارهای گیاهان را تقلید می‌کند.

باربارا مازولای[3]، هماهنگ‌کنندهٔ این پژوهشگران، می‌گوید: ایدهٔ ما ادغام حسگرها با ربات است تا آلوده‌کننده‌ها را در مناطق وسیعی تشخیص دهند. به این ترتیب می‌توانیم دربارهٔ اثرهای آن‌ها بر سلامت انسان و محیط زیست پیش‌بینی‌هایی انجام دهیم. گیاهان بهترین نمونه‌های طبیعی برای ساخت ربات‌هایی هستند که می‌توانند با الهام از طبیعت، خاک و آب را اکتشاف کنند.

پلانتوئید: انقلاب رباتیکی و نگاهی نو به گیاهان

پلانتوئید (شکل ۱) یکی از نخستین ربات‌ها برای بازآفرینی مکانیکی رفتار و عملکرد گیاهان است. از نظر مازولای گیاهان واقعاً شگفت‌انگیزند؛ زیرا می‌توانند بسیار بهتر از جانوران با شرایط متغیر محیط سازگار شوند. سبک زندگی ثابت گیاهان، توانایی پاسخ به مجموعه‌ای از محرک‌ها و سازگاری کارآمد با شرایط متغیر محیطی را موجب شده است.

ریشه‌های گیاهان حفارهای طبیعی فوق‌العاده‌ای هستند. ویژگی‌های ریشهٔ گیاهان مانند رشد سازگارانه، حرکاتی که از نظر مصرف انرژی کارامدند و توانایی نفوذ از هر زاویه‌ای به درون خاک، از دیدگاه مهندسی جالب توجه‌اند. گیاهان با ریشه‌های درحال رشد خود، شبکه‌ای به‌وجود می‌آورند و می‌توانند محیط را به «روش مویرگی»[4] بررسی کنند. مواد گیاهی نیز برای کاهش مصرف انرژی هنگام حرکت، بهینه شده‌اند. این قابلیت‌ها راه‌حل‌های فراوانی برای رباتیک فراهم می‌کند که در آن‌ها از سازوکارهای ماهیچه‌ای و جانورمانند استفاده نمی‌شود.

افزون بر آن، گیاهان قابلیت‌های پیچیده‌ای دارند که به آن‌ها امکان می‌دهد محیط را درک و براساس آن تصمیم‌گیری کنند. مازولای و گروه پژوهشی او پارادایم جدیدی در زمینهٔ رباتیک معرفی کرده‌اند که «حرکت با رشد» نام دارد. پارادایم آن‌ها، این تصور را که گیاهان جاندارانی ثابت هستند تغییر می‌دهد و پیشنهاد می‌کند حرکت گیاهان براساس افزودن مواد و در نتیجهٔ رشد آن‌ها انجام می‌شود. حرکت در محیط بدون ساختاری مثل خاک، به روش‌های جدیدی نیاز دارد.

پلانتوئید نخستین رباتی است که نه‌تنها رفتارها و سازوکارهای گیاهان را تقلید می‌کند؛ بلکه ساخت آن نگاهی نو به گیاهان ایجاد کرده است

ربات پلانتوئید که شبیه ریشه گیاهان رشد و در خاک نفوذ می‌کند و ساختار خود را گسترش می‌دهد، «روش لایه‌بندی افزایشی»[5] را به‌کار می‌برد. لایه‌های مواد جدید نزدیک نوک ریشه دستگاه رسوب می‌کنند تا در آنجا نیروی محرکه‌ای تولید کنند و ساختار لوله‌ای توخالی به وجود آورند که در سطح خاک گسترش پیدا می‌کند. اضافه کردن مواد در نوک، اصطکاک را تقریباً تا صفر کاهش می‌دهد و چون کناره‌های لوله حرکت نمی‌کند، انرژی لازم برای نفوذ در خاک کاهش می‌یابد.

گروهی از پژوهشگران مرکز میکرورباتیک‌ها در مؤسسه فناوری ایتالیا رباتی به نام پلانتوئید ساخته‌اند که رفتارها و سازوکارهای گیاهان را تقلید می‌کند

در پروژهٔ پلانتوئید، ویژگی‌های زیادی از ریشهٔ گیاهان بررسی شده است؛ ویژگی‌هایی شامل ظرفیت رشد و حرکت گیاه در پاسخ به محرک‌های بیرونی؛ رشد گیاه از نوکِ ریشه با اضافه کردن سلول و تولید تارهای کشندهٔ جانبی برای کاهش اصطکاک و فشار لازم برای نفوذ در خاک؛ قابلیت‌های حسی برای تشخیص مجموعه‌ای از کمیت‌های شیمیایی و فیزیکی در محیط؛ فعال‌سازی اسمزی برای به راه‌اندازی حرکت‌های سریع یا آهسته درگیاهان و رشد هماهنگ همهٔ ریشه‌های گیاه در جهت مناسب.

نخستین نمونهٔ پلانتوئید دو ریشهٔ عملکردی دارد. یکی از آن‌ها با فرایند افزودن مواد رشد مصنوعی را انجام می‌دهد و به خاک نفوذ می‌کند (شکل ۲)؛ ریشهٔ دیگر قابلیت خمش در سه جهت را با استفاده از «فعال‌سازهای اسمزی»[۶] جدیدی که برای این پروژه ساخته شده‌اند، به نمایش می‌گذارد. این ریشه سامانهٔ حسی برای دما، رطوبت، گرانش، تماس، اسیدیته و یون‌های سدیم، پتاسیم، فسفات، نیترات و سامانهٔ الکترونیکی لازم برای جانمایی حسگر[۷] و «کنترل تحریک‌پذیری»[۸] دارد. دو ریشهٔ پلانتوئید در تنه‌ای قرار گرفته‌اند که یک صفحه اصلی ریزکنترل‌کننده با قابلیت ارتباط دارد. روی شاخه‌های تنه برگ‌های مصنوعی قرار گرفته‌اند (شکل ۳). این برگ‌ها از موادی ساخته شده‌اند که به تغییر شرایط محیط، مانند رطوبت و دما پاسخ می‌دهند.

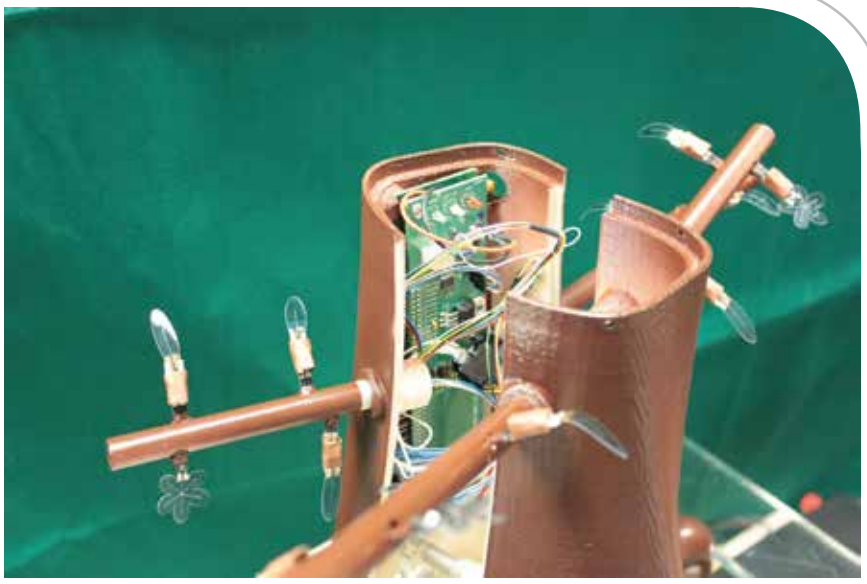
رشد ریشهٔ پلانتوئید با استفاده از چاپگر بسیارکوچکِ سه‌بعدی انجام می‌شود که گران‌روی (ویسکوزیته) رشته‌هایی از جنس **PLA** (پلی لاکتیک اسید) را با افزایش دما تغییر می‌دهند. PLA پلی‌استری است که از زیست‌تودهٔ تخریب‌پذیر و معمولاً از نشاستهٔ گیاهی تخمیرشده مانند ذرت یا چغندر قند به‌دست می‌آید. تنها بخشی که می‌تواند در خاک حرکت کند، نوکِ ریشه است و بقیهٔ بدنهٔ پلانتوئید حرکت نمی‌کند. به این علت، هیچ فشاری به خاک وارد نمی‌شود و اصطکاکی با آن به‌وجود نمی‌آید. این راز رشد گیاهان است که در پلانتوئید از آن استفاده می‌شود. نوکِ ریشه شامل حسگرها، یک موتور که رشته‌ها را می‌کِشد، چرخ دنده‌هایی برای تغییر موقعیت آن‌ها و یک مقاومت کوچک است که دما را برای تغییر گران‌روی رشته‌ها افزایش می‌دهد.

مازولای از نتایج کار بسیار راضی است؛ زیرا ساخت سامانه‌ای که بتواند مواد را در تراز نوک ربات اضافه کند، واقعاً کار دشواری است و این پژوهشگران از عهدهٔ انجام دادن آن و همچنین انجام دادن حرکات گرایشی (تروپیسم) برآمده‌اند. حرکات گرایشی توانایی ریشه‌ها برای رشد به سوی محرک‌های محیطی یا فرار از آن‌هاست.

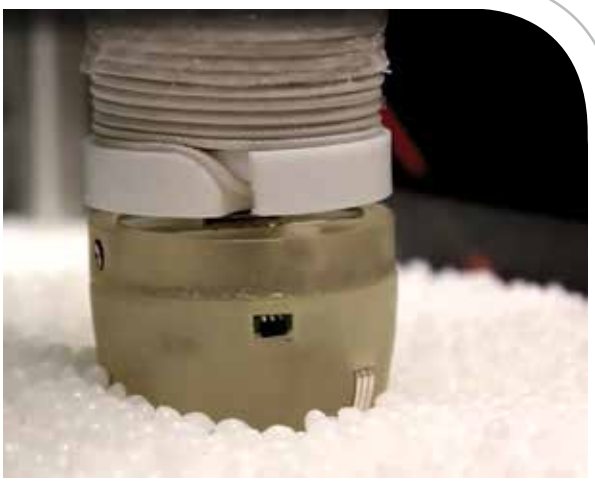
ربات پلانتوئید را می‌توان در زمینه‌های گوناگون از نظارت بر محیط زیست تا اکتشافات فضایی به‌کار برد. مازولای می‌گوید: ایده اولیهٔ ما نظارت بر محیط

گیاهان قابلیت‌های پیچیده‌ای دارند که به آن‌ها امکان می‌دهد محیط را درک و براساس آن تصمیم‌گیری کنند

شکل ۱. ربات پلانتوئید



شکل ۳. شاخه‌ها و برگ‌های حسگر ربات پلانتوئید



شکل ۲. ریشهٔ رشدکنندهٔ پلانتوئید

این ربات گیاهی [: پلانتوئید] را می‌توان در زمینه‌های گوناگون از نظارت بر محیط زیست تا اکتشافات فضایی به‌کار برد

زیست بود؛ اما این ایده در کشاورزی هم کاربرد دارد؛ زیرا حسگرهایی که در ربات قرار داده‌ایم، می‌توانند برای جست‌وجوی مواد خاصی مانند فلزات سنگین، مواد مغذی و آب نیز به‌کار روند. فعال‌سازهای اسمزی ساخته‌شده برای این ربات در موارد دیگر مثل آزادسازی غیرفعال دارو نیز کاربرد دارند. ساخت برگ‌های مصنوعی در این پروژه مقدمه‌ای برای مطالعات پیچیده‌تر دربارهٔ ساختار سلسله مراتبی دیواره‌های سلول گیاهی فراهم کرده است. از نتایج دیگر این پروژه، ساخت فعال‌سازهای اسمزی جدید است.

از آنجا که بودجهٔ پروژه را سازمان آژانس فضایی اروپا تأمین می‌کند، این گروه برنامه‌های کاربردی فضایی شامل اکتشاف زیرخاک سیارات دیگر و قابلیت‌های سازگاری ربات با شرایط فضا مانند ثابت نگه داشتن اجسام[9] را نیز دنبال می‌کند. به تازگی ویژگی رشد از نوک ریشهٔ پلانتوئید و در نتیجه کاهش فشار و اصطکاک هنگام نفوذ، در پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. از پلانتوئید می‌توان در پزشکی برای جلوگیری از آسیب به بافت‌های انسانی یا کاهش تنش در بافت استفاده کرد. در آینده نیز این ربات می‌تواند به ایجاد یک درون‌بین (اندوسکوپ) انعطاف‌پذیر جدید کمک کند که بدون آسیب‌رساندن به بافت‌ها در بدن حرکت می‌کند.

درحال حاضر، پژوهشگران پروژه پلانتوئید برای بهبود عملکرد ساقه‌های رباتی تلاش می‌کنند تا بتوانند از آن‌ها برای تشخیص آلودگی هوا استفاده کنند. مازولای امیدوار است که در آینده ربات پلانتوئید به‌طور مستقل حرکت کند و دربارهٔ کیفیت آب، هوا، غذا و خاک به کاربران اطلاعات ارسال و به آن‌ها در غربال کردن محیط زیست کمک کند. این ربات‌ها می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و نوعی بوم‌سازگان مصنوعی را برای تشخیص آلاینده‌ها در محیط به‌وجود آورند تا امکان برطرف‌کردن آلودگی ایجاد شود. گام‌های آینده می‌توانند بر یکپارچه‌سازی عملکردها در یک ربات متمرکز شوند و حسگرها، فعال‌سازها، واحدهای کنترل، ناحیه درازشونده و رشدکننده و بخش خم‌شونده در یک ریشهٔ رباتی قرار گیرند. در آن صورت ریشه‌های ربات می‌توانند در خاک نفوذ و با هدایت گرانش یا نزدیک شدن به آب یا دیگر مواد شیمیایی در خاک پیشروی کنند. پروژه پلانتوئید دنیایی از امکانات کاملاً جدید را برای رباتیک با الهام از زیست‌شناسی به روی پژوهشگران گشوده است.

مازولای و همکارانش انقلاب رباتیکی را که با ساخت پلانتوئید در سال ۲۰۱۵ آغاز کردند، با پروژهٔ

ربات گیاهی (پلانتوئید) در آینده می‌تواند به ایجاد یک درون‌بین (اندوسکوپ) انعطاف‌پذیر جدید کمک کند که بدون آسیب‌رساندن به بافت‌ها در بدن حرکت می‌کند

ساخت یک ربات گیاهی بالارونده ادامه داده‌اند. این ربات یک پیچک مصنوعی است و سازوکاری دارد که می‌تواند در خلاف جهت گرانش حرکت کند. پیچک با استفاده از فرایندهای فیزیکی انتقال آب در گیاهان حرکت می‌کند. بخش پایینی پیچک لوله‌ای از جنس پلی‌سولفون است و درون آن مایعی ریخته شده است که ذره‌های دارای بارالکتریکی (یون) دارد. این لوله مانند یک غشای اسمزی عمل می‌کند. لوله بین لایه‌های پارچه الیاف کربن که نقش الکترود را دارند، پیچ می‌خورد. وقتی این مجموعه به یک باتری ۱/۳ ولت متصل می‌شود، یون‌ها به سطح پارچهٔ انعطاف‌پذیر جذب و متصل می‌شوند. ذرات در حال حرکت باعث جاری شدن مایع می‌شوند و به دنبال آن، پیچک حرکت پیچشی را شروع می‌کند. با جدا شدن باتری، ربات حرکت وارونه انجام می‌دهد.

ربات بالارونده توانایی گیاه انگور برای سازگاری با محیط را شبیه‌سازی و راه را برای کاربردهای دیگر هموار می‌کند؛ کاربردهایی مثل پشتیبانی‌های ارتوپدی پوشیدنیِ انعطاف‌پذیر برای برطرف کردن نیازهای بیماران هنگام درمانِ توانبخشی یا پیچک‌های بالارونده مجهز به حسگر یا دوربین برای بررسی آلودگی‌ها یا نجات جان افرادی که در پیشامدهای گوناگون زیر آوار مانده‌اند. پروژه ساخت این ربات در سال ۲۰۲۲ به پایان خواهد رسید.

گیاهان جاندارانی هوشمندند

پرسش مهم دیگری که پروژهٔ پلانتوئید می‌خواهد به آن پاسخ دهد این است که آیا گیاهان رفتار هوشمندانه‌ای از خود نشان می‌دهند؟ هوش گیاه را می‌توان به سادگی «رشد و نمو تغییرپذیر و سازگارانه در طول زندگی فردی آن» تعریف کرد. بهره‌برداری از توانایی‌های سازگاری گیاهان می‌تواند به ساخت ابزارهای هوشمند بینجامد؛ ابزاری که نه‌تنها می‌تواند حس کند؛ بلکه قابلیت درک محرک و تصمیم‌گیری برای انجام تکالیف لازم را نیز دارد. پژوهشگرانی از سراسر جهان رفتار گیاهان را مطالعه کرده‌اند. پروژهٔ پلانتوئید از یافته‌های پژوهش‌هایی که دربارهٔ هوش گیاهان و رفتار آن‌ها انجام شده، الهام گرفته است.

مانکوزو[10] یکی از همکاران پروژهٔ پلانتوئید است که پژوهش‌های او بر علامت‌دهی و ارتباط در گیاهان متمرکز است. گیاهان از راه ارتباط با یکدیگر می‌توانند مواد مغذی را بیابند، رشد کنند و در مقابل گیاهخواران از خود دفاع نمایند. گیاهانی یافت شده‌اند که با آزادکردن مواد فرار با گیاهان نزدیک خود ارتباط برقرار می‌کنند تا آن‌ها را از حملهٔ عوامل بیماری‌زا آگاه کنند. در نتیجه، این گیاهان می‌توانند مقاومت خود را افزایش دهند.

پژوهش بالوسکا[11] چرخهٔ سلولی در گیاه و رفتار ریشه در پاسخ به گرانش و نور را بررسی می‌کند. بالوسکا به این نتیجه رسیده است که برخلاف نظر برخی پژوهشگران، گیاهان نوعی سامانهٔ سخت‌افزاری رباتی نیستند و می‌توانند براساس درک‌های حسی خود، تصمیم‌هایی بگیرند که برای بقای آن‌ها مهم است؛ مثلاً می‌توانند با ترشح ترکیباتی که باکتری‌ها و قارچ‌ها را جذب یا دفع می‌کنند، «ریزوسفر»[12] را کنترل کنند. ریزوسفر ناحیه‌ای در اطراف ریشه گیاهان است که به‌طور مستقیم تحت‌تأثیر ریشه، ترشحات آن و میکروارگانیسم‌های همزیست با گیاه قرار دارد. بالوسکا اضافه می‌کند: ما دریافته‌ایم ناقل‌های عصبی مانند گلوتامات، گابا، سروتونین، ملاتونین و

تفاوت میان گیاهان و جانوران آن‌قدر که دیدگاه رایج کنونی ادعا می‌کند، گسترده نیست

استیل کولین در گیاهان وجود دارند که عملکرد آن‌ها مشابه عملکرد این ناقل‌ها در مغز جانوران و انسان است. این موضوع گواه دیگری است که نشان می‌دهد تفاوت میان گیاهان و جانوران آن‌قدر که دیدگاه رایج کنونی ادعا می‌کند، گسترده نیست.

وُلکنبورگ[13] پژوهشگر دیگری است که زندگی و رفتار گیاهان را بررسی می‌کند. از نظر او گیاهان با استفاده از سازوکارهای ابتکاری خود، منابع مورد نیاز را از محیط اطراف استخراج می‌کنند. فتوسنتز شناخته‌شده‌ترین این سازوکارهاست؛ اما سازوکارهای کمتر شناخته‌شده‌ای نیز وجود دارند؛ مثل نقش فضای خارج سلولی (آپوپلاست) در جریان آب و مواد غذایی در گیاه یا نقش میکروب‌هایی که درون گیاه زندگی می‌کنند (اندوفیت‌ها) در تغذیه آن.

علاوه بر راهبردهای ارتباط و توانایی انتخاب براساس شرایط محیط، این موضوع مشخص شده است که گیاهان سازوکارهای یادگیری خود را نیز دارند. گاگلیانو[14] بوم‌شناسی جانوری است که به زندگی گیاهان نیز علاقه‌مند است. او آزمایش‌های رفتاری روی گیاهان انجام داده و نتایج قابل توجهی به‌دست آورده است. مشهورترین پژوهش‌های او آزمایش‌های مربوط به یادگیری پاولفی (شرطی شدن کلاسیک) روی جوانه‌های «گیاه حساس»[15] و نخودفرنگی است. آزمایش‌های او درمورد هردو گیاه موفقیت‌آمیز بود و هر دو توانستند یاد بگیرند که براساس یک محرک ویژه رفتارشان را تغییر دهند. از نظر گاگلیانو «گیاه حساس» می‌تواند در سطحی ابتدایی یاد بگیرد؛ زیرا در آزمایش‌های او، گیاه حساس فقط باید به یاد می‌آورد که در ارتباط با آنچه درک کرده، چه چیزی رخ داده است. عملکرد گیاه نخودفرنگی در آزمایش بهتر بود؛ زیرا این گیاه نه‌تنها باید تصمیم می‌گرفت که آیا چیزی برایش خوب است یا بد؛ بلکه باید با چیزی کاملاً بی‌معنی نیز ارتباط برقرار می‌کرد.

براساس نظر ولکنبورگ، پژوهش درباره گیاهان اهمیت دارد؛ زیرا می‌تواند در پیدا کردن راه‌هایی برای حفظ محیط زیست به ما کمک کند و پروژهٔ پلانتوئید نمونه‌ای از این پژوهش‌هاست. گاگلیانو با او موافق است اما فکر می‌کند انسان می‌تواند چیزهای دیگری نیز از گیاهان یاد بگیرد. او می‌گوید: افراد بسیاری دربارهٔ کارهای من گفته‌اند که من گیاهان را انسان پنداشته‌ام؛ اما کاملاً برعکس است. من می‌خواهم انسان‌ها بیشتر شبیه به گیاهان باشند. اینکه گیاهان چطور کارها را در ارتباط با محیط اطراف خود انجام می‌دهند و چگونه می‌توانند کاملاً گیاه باشند، الهام واقعاً شگفت‌انگیزی برای ماست که چگونه می‌توانیم کاملاً انسان باشیم.

پژوهش درباره گیاهان اهمیت دارد؛ زیرا می‌تواند در پیدا کردن راه‌هایی برای حفظ محیط زیست به ما کمک کند

هوش گیاه را می‌توان به سادگی «رشد و نمو تغییرپذیر و سازگارانه در طول زندگی فردی آن» تعریف کرد

پی‌نوشت‌ها

1. Italian Institute of Technology (Istituto Italiano di Tecnologia)
2. Plantoid
3. Barbara Mazzolai
4. capillary way
5. additive layering technique
6. osmotic actuation
7. sensor conditioning
8. actuation control
9. anchoring
10. Stefano Mancuso
11. Frantisek Baluska.
12. rhizosphere
13. Elisabeth Von Volkenburgh
14. Monica Gagliano
15. Mimosa Pudica

منابع

1. Cordis; PLANTOID: Building a robot to mimic plants ,2014, https://phys.org/news/2014-05-plantoid-robot-mimic.html
2. Coxworth,Ben, European scientists developing a robotic tree, 2014, https://newatlas.com/plantoid-plant-inspired-robot/34132/
3. Fadelli, Ingrid, The plantoid project how artificial plannts could help save the environment, E&T(ENGEERING AND TCHNOLOGY):,2017; https://eandt.theiet.org/content/articles/2017/07/the-plantoid-project-how-artificial-plants-could-help-save-the-environment/
4. Loredana, Pianta ،The revolution of plantoids ,2015, https://cordis.europa.eu/article/id/125198-the-revolution-of-plantoids/en