هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات مهندسی کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات
7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering Farming and Plant Breeding

# توسعه کشاورزی شهری از طریق کشت عمودی: الگویی جدید مبتنی بر مدیریت هوشمند منابع

**صدیقه قاسمی [1*] و محمدهادی روحیان [2]**

۱- دکترای توسعه کشاورزی و مدرس مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، فارس، ایران. ایمیل:

Ghasemi.s.sh@gmail.com

۲- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، فارس، ایران

**چکیده**

امروزه، چالش‌های افزایش جمعیت جهانی و افزایش نیاز به غذای سالم، توسعه کشاورزی شهری را به موضوعی ضروری تبدیل کرده است. با رشد روزافزون شهرنشینی، دسترسی به زمین‌های زراعی مناسب در مناطق شهری به شدت محدود شده و زنجیره تأمین غذایی با چالش‌های اساسی، حفظ کیفیت و کاهش اتکا به حمل و نقل طولانی‌مدت مواجه است. در این میان، تغییرات اقلیمی و اثرات نامطلوب آن بر کشاورزی سنتی، ضرورت یافتن راهکارهای نوین و پایدار را بیش از پیش نمایان ساخته است. کشاورزی شهری، با هدف نزدیک کردن تولید غذا به مصرف‌کننده، پاسخی به این نیازهاست. در این مقاله، به طور خاص به بررسی "کشاورزی عمودی" به عنوان یک راه‌حل نوآورانه و پیشرفته برای تأمین غذای سالم و پایدار در محیط‌های شهری پرداخته شده است. تمرکز اصلی این مطالعه بر مفهوم "مدیریت هوشمند منابع" استوار است، که شامل استفاده بهینه و پایدار از منابع حیاتی مانند آب، انرژی، نور و مواد مغذی می‌باشد. این رویکرد، امکان تولید در مقیاس بالا را در فضاهای محدود شهری فراهم می‌آورد و وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حمل و نقل طولانی‌مدت را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. در این مطالعه، به تفصیل به بررسی مزایا و چالش‌های فراگیر کشاورزی عمودی، تأثیرات عمیق اقتصادی و زیست‌محیطی آن، و همچنین مدل‌های مختلف توسعه‌یافته در این حوزه پرداخته شده تا تصویری جامع از پتانسیل این فناوری در آینده کشاورزی شهری ارائه گردد.

**کلمات کلیدی:** کشت عمودی، کشاورزی شهری، توسعه کشاورزی

**مقدمه**

جهانی شدن و روند رو به رشد شهرنشینی، منجر به تمرکز جمعیت در کلان‌شهرها شده است. این پدیده، در کنار افزایش تقاضا برای محصولات غذایی، چالش‌های متعددی را برای سیستم‌های تولید و توزیع غذا به همراه آورده است. کمبود زمین‌های زراعی قابل دسترس در مناطق شهری، افزایش هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری محصولات، و نگرانی‌های فزاینده در خصوص کیفیت و سلامت غذا و ...، همگی عواملی هستند که ضرورت یافتن راهکارهای خلاقانه در تأمین غذای شهری را ایجاب می‌کنند. با توجه به روندهای جمعیتی جهانی و تخمین‌هایی که نشان‌دهنده افزایش جمعیت شهرنشین تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۶۸٪ است، فشار بر منابع غذایی و محیط زیست به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. این امر، سیستم‌های کشاورزی سنتی را که اغلب به زمین‌های وسیع، آب فراوان و شرایط اقلیمی خاص وابسته هستند، با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد. تغییرات اقلیمی، شامل افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و وقوع رویدادهای آب و هوایی شدید، امنیت غذایی را در بسیاری از مناطق به مخاطره انداخته است. در محیط‌های شهری، مشکلات مضاعفی وجود دارد. کمبود شدید زمین‌های زراعی، افزایش هزینه‌های اجاره و خرید زمین، و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های شهری، احداث مزارع سنتی را در نزدیکی شهرها یا درون آن‌ها دشوار می‌سازد. علاوه بر این، زنجیره تأمین طولانی‌مدت غذا، منجر به افزایش ضایعات محصول، کاهش ارزش غذایی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل می‌شود. بنابراین، نیاز به نوآوری در سیستم‌های تولید غذا، به نحوی که بتواند نیازهای روزافزون جمعیت شهری را با کمترین آسیب زیست‌محیطی و با حداکثر بهره‌وری تأمین کند، امری حیاتی و ضروری است (حمیدیان، ۱۴۰۳). برخی معتقدند که کشاورزی عمودی، با فراهم آوردن امکان تولید غذا در فضاهای عمودی و در شرایط کاملاً کنترل شده، پاسخی شایسته برای این چالش‌ها را فراهم کرده است. این روش، نه تنها به تأمین غذای سالم و با کیفیت کمک می‌کند، بلکه می‌تواند نقش مهمی در کاهش اتکا به منابع طبیعی محدود، حفظ تنوع زیستی و ایجاد مشاغل جدید در بخش‌های نوین کشاورزی ایفا نماید (حکیمی، ۱۴۰۱).

کشاورزی شهری، با هدف نزدیک کردن تولید به مصرف، یکی از این راهکارهاست که می‌تواند به افزایش تاب‌آوری زنجیره غذایی، کاهش ردپای کربن و بهبود کیفیت زندگی شهرنشینان کمک کند. در میان رویکردهای مختلف کشاورزی شهری، "کشت عمودی" به عنوان یک فناوری پیشرفته و نسل جدیدی از کشاورزی، قابلیت‌های منحصر به فردی را در حل مشکلات ذکر شده ارائه می‌دهد. کشت عمودی[۱] به معنای کشت گیاهان به صورت لایه‌ای و در فضاهای عمودی، به جای کشت سنتی در

---

۱. Vertical Farming.

سطح زمین است. کشاورزی عمودی، با استفاده از تکنیک‌های نوین مانند سیستم‌های هیدروپونیک (آب‌کشت)[۱]، ایروپونیک (مه‌کشت) و آئروپونیک (هواکشت)[۲] و همچنین با بهره‌گیری از نور مصنوعی[۳]، محیط‌های کنترل شده[۴] و طبقات متعدد، امکان کشت محصولات کشاورزی را در فضاهای عمودی و محدود شهری فراهم می‌آورد. این روش، پتانسیل بالایی برای افزایش بهره‌وری در واحد سطح، کاهش مصرف آب، کاهش نیاز به آفت‌کش‌ها و سموم، و تولید محصول در تمام طول سال را دارا است (ملکی نژاد و همکاران، ۱۳۹۹). مهم‌ترین ویژگی های این شیوه نوین کشاورزی عبارتست از :

- استفاده بهینه از فضا: مناسب برای مناطق شهری و فضاهای محدود
- کشت چندطبقه: افزایش بهره‌وری به‌ازای هر مترمربع
- کاهش مصرف آب: معمولاً تا ۹۰٪ کمتر از کشاورزی سنتی
- عدم وابستگی به شرایط آب‌وهوایی: تولید پایدار در تمام سال
- کنترل کامل بر نور، دما، رطوبت و مواد مغذی

در جدول ۱ ویژگی‌های کشت عمودی و سنتی مقایسه شده است.

**جدول۱. مقایسه کشت عمودی با کشت سنتی**

| ویژگی | کشت عمودی | کشت سنتی |
|---|---|---|
| **محل کشت** | فضای بسته یا گلخانه‌های چندطبقه، اغلب در مناطق شهری | زمین باز کشاورزی، اغلب در مناطق روستایی |
| **استفاده از فضا** | بهره‌وری بالا با کشت چندلایه و عمودی | بهره‌وری محدود به سطح زمین افقی |
| **مصرف آب** | بسیار کم (تا ۹۰٪ کمتر) با سیستم‌های هیدروپونیک و بازیافت | مصرف زیاد آب به دلیل تبخیر و نفوذ در خاک |
| **تأثیر شرایط آب‌وهوایی** | مستقل از شرایط آب‌وهوایی، کنترل دقیق محیط | وابسته به فصل، بارش، دما و دیگر عوامل طبیعی |
| **استفاده از کود و سموم** | کم یا بدون استفاده از سموم و کود شیمیایی به دلیل محیط کنترل شده | معمولاً استفاده زیاد از کود و سموم شیمیایی |

۱ . Hydroponic systems
۲ . Aeroponic systems
۳ . LED
٤ . Controlled Environment Agriculture (CEA)

| | | |
|---|---|---|
| **برداشت محصول** | امکان برداشت چندین بار در سال و محصول با کیفیت بالا | برداشت محدود به فصل و شرایط اقلیمی |
| **نیاز به زمین** | بسیار کم و فشرده | نیاز به زمین وسیع |
| **هزینه اولیه** | بالا به دلیل تجهیزات، نور مصنوعی و ساختارهای پیچیده | پایین‌تر ولی وابسته به امکانات و روش‌ها |
| **اثرات زیست‌محیطی** | کاهش ردپای کربن و آلودگی، مصرف بهینه منابع | اثرات منفی بیشتر شامل فرسایش خاک و آلودگی |

به طور خلاصه می توان گفت کشت عمودی مناسب محیط‌های شهری و کم‌جا است، بهره‌وری بالاتر و مصرف منابع کمتر دارد اما هزینه اولیه بالایی می‌طلبد. در حالی که کشت سنتی مناسب زمین‌های وسیع و مناطق روستایی است، هزینه اولیه کمتری دارد ولی مصرف آب و سموم بالاتر و وابستگی بیشتری به شرایط طبیعی دارد (کرمی و صلاحی اصفهانی، ۱۳۹۹).

مهم‌ترین مزایای کشت عمودی عبارتند از (آخوندی و فرشچی، ۱۴۰۲):

- **افزایش بهره‌وری در واحد سطح:** با استفاده از طبقات متعدد، کشاورزی عمودی می‌تواند محصولاتی به مراتب بیشتر از مزارع سنتی در همان مساحت تولید کند. این امر به ویژه در مناطق شهری با محدودیت شدید زمین، بسیار حیاتی است.
- **کاهش چشمگیر مصرف آب:** سیستم‌های بسته و بازچرخشی در کشاورزی عمودی، مصرف آب را تا ۹۰-۹۵٪ نسبت به کشاورزی سنتی کاهش می‌دهند. آب و مواد مغذی به طور مؤثرتری به ریشه‌ها می‌رسند و تبخیر کمتری رخ می‌دهد.
- **تولید در تمام طول سال**[۱]: با کنترل کامل محیط، کیفیت و کمیت محصولات تحت تأثیر شرایط فصلی یا آب و هوایی قرار نمی‌گیرد و امکان تولید مداوم و پایدار فراهم می‌شود.
- **کاهش یا حذف نیاز به آفت‌کش‌ها و سموم:** محیط کنترل شده و بسته، از ورود آفات و عوامل بیماری‌زا جلوگیری می‌کند، لذا نیاز به استفاده از سموم شیمیایی به حداقل رسیده و محصولات سالم‌تر و ارگانیک‌تری تولید می‌شوند.

۱ . Season-round production

- **کاهش هزینه‌های حمل و نقل و ضایعات:** با قرارگیری مزارع عمودی در نزدیکی یا درون شهرها، هزینه‌های حمل و نقل محصولات به شدت کاهش یافته و زمان رسیدن محصول به دست مصرف‌کننده کوتاه‌تر می‌شود، که این امر منجر به کاهش ضایعات و حفظ تازگی و کیفیت محصول می‌گردد.
- **کاهش ردپای کربن:** کاهش مسافت حمل و نقل و همچنین پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی مزارع، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند.
- **ایجاد فضاهای سبز عمودی:** در آینده، می‌توان از ساختارهای عمودی در طراحی شهری برای ادغام فضاهای سبز و تولید غذا استفاده کرد که به بهبود کیفیت هوا و زیباسازی شهرها نیز کمک می‌کند.

کشاورزی عمودی، با وجود نوآوری و مزایای فراوان، با چالش‌هایی نیز روبرو است که برخی از این چالش‌ها عبارتند از:

- **هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه:** راه‌اندازی یک مزرعه عمودی نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای خرید تجهیزات پیشرفته، سیستم‌های نورپردازی، تهویه، کنترل محیطی و سیستم‌های خودکار است.
- **مصرف بالای انرژی:** تأمین انرژی مورد نیاز برای سیستم‌های نورپردازی) به خصوص (LED و سیستم‌های کنترل محیطی، می‌تواند هزینه‌های عملیاتی بالایی را به همراه داشته باشد. اگرچه بهره‌وریLED ها در حال افزایش است، اما همچنان یکی از مولفه‌های اصلی هزینه‌های جاری است.
- **وابستگی به فناوری و دانش فنی:** نیاز به پرسنل متخصص و آشنا با فناوری‌های نوین، و همچنین نگهداری و تعمیرات تجهیزات پیشرفته، از چالش‌های عملیاتی محسوب می‌شود.
- **محدودیت در تنوع محصولات:** در حال حاضر، بیشتر مزارع عمودی بر روی تولید سبزیجات برگ‌دار، گیاهان دارویی، و برخی میوه‌های کوچک مانند توت فرنگی تمرکز دارند. کشت محصولات اصلی مانند غلات، حبوبات و ریشه‌دارها به دلیل نیاز به فضا و شرایط رشد متفاوت، چالش‌برانگیزتر است.
- **اهمیت دسترسی به آب با کیفیت:** هرچند مصرف آب کاهش می‌یابد، اما کیفیت آب مورد استفاده برای سیستم‌های هیدروپونیک و ایروپونیک حیاتی است و نیازمند تصفیه و آماده‌سازی مناسب می‌باشد.
- **تأثیرات بلندمدت نور مصنوعی بر سلامتی انسان:** هرچند این موضوع بیشتر مربوط به محیط کار مزارع عمودی است، اما در صورت گسترش آن در محیط‌های مسکونی، نیاز به بررسی بیشتر دارد.

کشاورزی عمودی در مکان‌های مختلف و با شرایط خاصی قابل اجرا است که این موارد به شرح زیر هستند (حکیمی، ۱۴۰۱):

- **فضاهای داخلی و گلخانه‌ها :**فضای سرپوشیده مانند گلخانه‌ها و سالن‌های سرپوشیده که امکان کنترل دقیق دما، رطوبت و نور را فراهم می‌کنند، گزینه‌های ایده‌آلی برای کشاورزی عمودی هستند. این روش به کشت گیاهان در طبقات و سطوح عمودی کمک می‌کند و فضای کمی اشغال می‌کند.
- **آسمان‌خراش‌ها و ساختمان‌های چندطبقه :**در محیط‌های شهری با کمبود زمین، کشاورزی عمودی با استفاده از سازه‌های طبقاتی روی دیوارها یا ستون‌ها قابل اجراست. این مدل امکان تولید محصولات تازه درون شهر و کاهش هزینه و زمان حمل‌ونقل را دارد.
- **مناطق با محدودیت آب و زمین :**کشاورزی عمودی با مصرف بسیار پایین آب (تا ۹۶ درصد صرفه‌جویی نسبت به کشاورزی سنتی) و بهره‌وری بسیار بالاتر از زمین، در مناطق کم‌آب و خاک نامناسب بسیار مناسب است.
- **استفاده از تکنولوژی‌های هیدروپونیک، ایروپونیک و آکواپونیک :**این سیستم‌ها قابلیت نصب در فضاهای کوچک و کنترل‌شده، حتی داخل ساختمان‌ها را دارند که امکان تولید انواع سبزیجات، گیاهان دارویی و خوراکی در محیط‌های شهری و صنعتی را فراهم می‌کند.
- **سوله‌ها، انبارهای بلااستفاده و فضاهای صنعتی :**تجهیز این فضاها به سیستم‌های کشت عمودی برای تولید سریع و متمرکز محصولات کشاورزی به خصوص در نزدیکی نقاط مصرف بسیار کاربردی است.
- **شهرها و محیط‌های شهری :**کشاورزی عمودی پاسخ مناسبی به مشکلات کمبود زمین کشاورزی و نیاز به تامین غذای تازه در شهرهای بزرگ است که با کاهش آلودگی‌های محیطی و کم کردن نیاز به حمل‌ونقل، کشاورزی را پایدارتر می‌کند.

در کل، کشاورزی عمودی در هر مکانی که امکان کنترل محیط رشد (نور، دما، رطوبت، تغذیه ریشه) فراهم باشد و فضای عمودی برای نصب سازه‌ها موجود باشد، قابل اجراست. این متد مخصوصاً برای مناطق شهری و با محدودیت فضا و منابع طبیعی بسیار مناسب است و امکان تولید محصول در تمام طول سال را می‌دهد.

در یک جمع‌بندی کلی می توان گفت رشد بی‌وقفه جمعیت جهان در کنار محدودیت منابع طبیعی مانند زمین کشاورزی و آب، کشاورزی سنتی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. کاهش کیفیت خاک، آلودگی منابع آبی و تاثیرات منفی تغییرات اقلیمی از دیگر مشکلاتی است که تولید محصولات کشاورزی را تحت تاثیر قرار داده‌اند. به این ترتیب، نیاز به راهکارهای نوین و هوشمند برای افزایش بهره‌وری کشاورزی اهمیت یافته است. کشاورزی عمودی به عنوان راهکاری نوظهور با چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، مصرف انرژی و نیاز به تخصص مواجه است که باید مورد بررسی و تحلیل بیشتر قرار گیرد تا امکان توسعه

گسترده آن فراهم شود. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی عمیق‌تر این فناوری، با تمرکز بر اصول "مدیریت هوشمند منابع" و ارائه الگویی برای توسعه پایدار آن در بافت شهری می‌باشد.

**مرور پیشینه نگاشته‌ها**

ایده کشاورزی عمودی برای نخستین بار در سال ۱۹۹۹ توسط دیکسون دسپومیر مطرح و با طراحی مزرعه‌های آسمان‌خراش به عنوان روشی برای تامین غذایی پایدار در محیط‌های شهری پیشنهاد شد. از آن زمان تاکنون پژوهش‌های فراوانی پیرامون فناوری‌های کشت بدون خاک مانند هیدروپونیک و آئروپونیک، سیستم‌های کنترل محیط کشت، استفاده از نور مصنوعی و بهینه‌سازی منابع در این نوع کشاورزی صورت گرفته است. تحقیقات گسترده‌ای در دهه‌های اخیر به بررسی جنبه‌های مختلف کشاورزی عمودی پرداخته‌اند. مطالعات اولیه بیشتر بر جنبه‌های فنی و اثبات قابلیت این روش‌ها تمرکز داشتند. پیشرفت در فناوری‌های نورپردازی LED ، سیستم‌های کنترل محیطی(مانند تنظیم دما، رطوبت و غلظت $CO_2$ )، و تکنیک‌های کشت بدون خاک (هیدروپونیک، ایروپونیک، آئروپونیک) زمینه را برای توسعه عملیاتی کشاورزی عمودی فراهم آورده است. تحقیقات نشان داده‌اند که کشاورزی عمودی می‌تواند مصرف آب را تا ۹۵٪ نسبت به کشاورزی سنتی کاهش دهد، زیرا آب در سیستم‌های بسته بازچرخش می‌شود. همچنین، عدم نیاز به آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها به دلیل کنترل کامل محیط، منجر به تولید محصولات سالم‌تر و کاهش آلودگی محیط زیست می‌گردد (ملک زاده، ۱۴۰۰). در زمینه بهره‌وری، گزارش شده است که کشاورزی عمودی به خصوص برای محصولاتی مانند سبزیجات برگ‌دار، گیاهان دارویی و برخی میوه‌های کوچک، می‌تواند ۱۰ تا ۲۰ برابر بیشتر از مزارع سنتی محصول در واحد سطح تولید کند. با این حال، شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی نیز در این حوزه وجود دارد. یکی از بزرگترین چالش‌ها، هزینه‌های بالای اولیه برای راه‌اندازی مزارع عمودی، شامل خرید تجهیزات پیشرفته، سیستم‌های نورپردازی و کنترل، و هزینه‌های انرژی برای تأمین روشنایی و تهویه است. تحقیقات بیشتری برای یافتن راه‌حل‌های مقرون به صرفه، بهینه‌سازی مصرف انرژی، و توسعه مدل‌های کسب و کار پایدار برای کشاورزی عمودی مورد نیاز است. همچنین، تنوع محصولات قابل کشت در کشاورزی عمودی محدودتر از کشاورزی سنتی است و نیاز به تحقیقات بیشتر در زمینه کشت محصولات متنوع‌تر و مغذی‌تر، مانند غلات و حبوبات، احساس می‌شود. توسعه الگوریتم‌های هوشمند برای مدیریت منابع و بهینه‌سازی شرایط رشد، و همچنین ارزیابی دقیق‌تر اثرات بلندمدت زیست‌محیطی و اجتماعی این فناوری، از جمله زمینه‌هایی هستند که

نیاز به بررسی عمیق‌تری دارند (Al-Kodmany, 2018). ساد و همکاران (Saad et al., 2021) در پژوهش خود مروری جامع بر سیستم‌های کشت عمودی هوشمند شهری با تمرکز بر کنترل‌های مبتنی بر سنسور، اینترنت اشیاء (IoT)، و اتوماسیون در بهره‌وری منابع شهری انجام دادند. ایشان متقدند که کشاورزی عمودی یک فناوری کاربردی است که از طریق آن می‌توان مقادیر زیادی از محصولات غذایی و گیاهان دارویی را تنها با کمک فناوری پیشرفته در فضای بسیار کوچکی تولید کرد. مرور این پژوهش نشان می‌دهد که کشاورزی عمودی در دنیای مدرن به حدود ۱۳ روش مختلف انجام می‌شود و هر روش از نظر فناوری آنقدر پیشرفته است که برای انقلابی در کشاورزی کافی است. در پژوهشی دیگر چادهوری و همکاران ( Chowdhury et al., 2023) به بررسی جامعی از نقش هوش مصنوعی در کشاورزی عمودی پایدار پرداختند. نتایج نشان داد کشاورزی عمودی پایدار به عنوان یک راه‌حل متحول‌کننده برای مقابله با چالش‌های جهانی رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع، چشم‌انداز کشاورزی با به حداکثر رساندن بازده محصول در محیط‌های کنترل‌شده، می‌باشد که این تغییر الگو مستلزم ادغام فناوری‌های پیشرفته، با محوریت هوش مصنوعی (AI) است. همچنین در این پژوهش، محققان وضعیت فعلی کاربردهای هوش مصنوعی، شامل یادگیری ماشین، بینایی کامپیوتر، اینترنت اشیا (IoT) و رباتیک را در بهینه‌سازی استفاده از منابع، خودکارسازی وظایف و افزایش تصمیم‌گیری، ترکیب کرده‌اند. بعلاوه در این پژوهش با ارائه بینش‌هایی برای ذینفعان و پیشنهاد راه‌هایی برای تحقیقات آینده، با هدف هدایت ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی در کشاورزی عمودی پایدار برای آینده‌ای تاب‌آور و پایدار در کشاورزی،پیشنهاداتی ارائه نموده است. دوتا و همکاران (Dutta et al., 2025) با تمرکز بر کاربرد اینترنت اشیاء برای بهینه‌سازی مصرف آب و کود در روش‌های بدون خاک مانند هیپونیک و آئروپونیک جهت کشاورزی شهری هوشمند به ارائه الگویی جدید پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ادغام اینترنت اشیا (IoT) با کشاورزی دقیق هوشمند، بهره‌وری منابع را بهبود می‌بخشد، کنترل محیطی را خودکار می‌کند و تولید پایدار و پربازده محصولات را تضمین می‌کند. سیستم‌های کشاورزی هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا از نظارت بلادرنگ، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و اتوماسیون برای بهینه‌سازی مصرف آب و مواد مغذی و در عین حال به حداقل رساندن دخالت انسان استفاده می‌کنند. در این پژوهش، محققان با برجسته کردن مزایای کشاورزی عمودی و تکنیک‌های بدون خاک مبتنی بر کشاورزی در محیط کنترل‌شده، تصمیم‌گیری آگاهانه برای پرداختن به چالش‌های امنیت غذایی و ترویج نوآوری‌های کشاورزی پایدار را لازم و ضروری دانسته‌اند.

برخی کشورهای دنیا با اجرای پروژه‌های کشاورزی عمودی به موفقیت زیادی در ابعاد کشاورزی، امنیت غذایی، و زیست محیطی دست یافته اند. بعنوان مثال شرکت پلنتی[1] اولین مزرعه عمودی توت‌فرنگی جهان را در کالیفرنیا راه‌اندازی کرده است. این مزرعه در یک محیط کنترل‌شده، به منظور صرفه‌جویی در زمین و آب ایجاد شده است. مزرعه Plenty Richmond طراحی شده است تا بیش از چهار میلیون پوند (۱.۸ میلیون کیلوگرم) توت‌فرنگی را به صورت عمودی در برج‌های ۳۰ فوتی (۹ متری) در داخل ساختمان تولید نماید، که کمتر از ۴۰,۰۰۰ فوت مربع یا کمتر از یک جریب فضا اشغال می‌کند. مدیرعامل این شرکت معتقد است که این مزرعه نمونه‌ای برای تأثیر مثبت کشاورزی مستقل از آب و هوا می‌باشد و اثباتی بر این موضوع است که کشاورزی عمودی می‌تواند تنوع محصولات، تولید مقیاس‌پذیر و محلی مورد نیاز برای آینده‌نگری سیستم غذایی جهانی را فراهم کند (تصویر ۱) (Doughty & Wheal, 2021)

**شکل ۱. مزرعه عمودی توت‌فرنگی در کالیفرنیا شرکت plenty**

همچنین AeroFarms یک شرکت پیشرو در زمینه کشاورزی عمودی است که دفتر مرکزی آن در نیوآرک، نیوجرسی، ایالات متحده آمریکا واقع شده است. این شرکت از فناوری نوآورانه کشاورزی عمودی برای تولید محصولات با کیفیت بالا در تمام طول سال استفاده می‌کند. مزرعه اصلی آنها در نیوآرک، نیوجرسی، مساحتی حدود ۶۹۰۰۰ فوت مربع دارد و ظرفیت تولید سالانه ۱ میلیون کیلوگرم سبزیجات را دارد. تکنولوژی مورد استفاده در ان مزرعه شامل استفاده از ایروپونیک (aeroponics)، چراغ‌های

[1] . Plenty

LED، و هوش مصنوعی استو مهم‌ترین محصولات آن سبزیجات برگی مانند کاهو، ریحان، و آرگولا می‌باشد. در این مزارع مصرف آب به میزان ۹۵٪ نسبت به کشاورزی سنتی کمتر است (شکل ۲).

**شکل ۲. مزرعه عمودی در آمریکا شرکت AeroFarms**

Sky Greens یک پروژه کشاورزی عمودی در سنگاپور است که از برج‌های استوانه‌ای برای کشت محصولات استفاده می‌کند. این سیستم به عنوان اولین مزرعه عمودی تجاری جهان با استفاده از مکانیسم‌های چرخشی برای لایه‌های کشت شناخته می‌شود. این شرکت از برج‌های استوانه‌ای بلند استفاده می‌کند که به صورت دایره‌ای می‌چرخند تا نور خورشید به طور یکنواخت به همه گیاهان برسد. این سیستم به گونه‌ای طراحی شده که مصرف آب را به حداقل می‌رساند و برای فضاهای محدود شهری مناسب است. همچنین، این مزرعه به طور خاص برای تولید سبزیجات و میوه‌های کوچک مانند توت فرنگی طراحی شده است. یکی از اهداف اصلی Sky Greens تأمین بخشی از نیازهای غذایی سنگاپور و کاهش وابستگی این کشور به واردات است. همچنین، این پروژه به دنبال افزایش امنیت غذایی و کاهش مصرف آب در کشاورزی است (Generalitat de Catalunya, 2020).

**شکل ۳. مزرعه عمودی در سنگاپور شرکت Sky Greens**

Infarm یک شرکت آلمانی است که در زمینه کشت عمودی فعالیت می‌کند. این شرکت از سیستم‌های هیدروپونیک و آیروپونیک برای پرورش محصولات کشاورزی در فضاهای داخلی و بدون خاک استفاده می‌کند. کشت عمودی یک روش نوین در کشاورزی است که با استفاده از فضاهای عمودی، امکان تولید محصولات کشاورزی در محیط‌های شهری و با مصرف بهینه منابع فراهم می‌کند. Infarm از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هیدروپونیک و آیروپونیک در سیستم‌های کشت عمودی خود استفاده می‌کند. در هیدروپونیک، گیاهان در محلول آبی غنی از مواد مغذی رشد می‌کنند، در حالی که در آیروپونیک، ریشه‌های گیاهان در معرض هوا قرار دارند و مواد مغذی به صورت مه پاش به آنها اسپری می‌شود. Infarm انواع مختلفی از گیاهان از جمله سبزیجات برگی، گیاهان دارویی و حتی برخی از میوه‌ها را پرورش می‌دهد. این شرکت همچنین بر روی توسعه سیستم‌هایی برای پرورش محصولات خاص مانند توت فرنگی و قارچ نیز کار می‌کند. کشت عمودی با استفاده از سیستم‌های Infarm مزایای متعددی از جمله کاهش مصرف آب و زمین، کاهش نیاز به سموم دفع آفات و امکان تولید محصولات کشاورزی در نزدیکی مناطق مصرف‌کننده را دارد. Infarm با هدف ایجاد یک سیستم غذایی پایدار و محلی، به دنبال گسترش کشت عمودی در سراسر جهان است (Tiwari, 2018).

کشت عمودی در ایران تقریباً از دهه ۱۳۹۰ شمسی (یعنی حدود سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ میلادی) به صورت آزمایشی و تحقیقاتی آغاز شد. اولین پروژه‌ها بیشتر در قالب پژوهش‌های دانشگاهی و طرح‌های نمونه کوچک در مراکز تحقیقاتی و برخی شرکت‌های دانش‌بنیان بود. بعد از آن، در چند سال اخیر با رشد فناوری‌های هیدروپونیک، نور مصنوعی و سیستم‌های هوشمند، برخی شرکت‌ها و کارآفرینان شروع به اجرای پروژه‌های تجاری کوچک و متوسط کردند. چند شرکت و مجموعه در ایران که در زمینه کشت عمودی فعال هستند و یا به صورت جدی وارد این حوزه شده‌اند عبارتند از:

۱. **شرکت هیدروپونیک ایران:** این شرکت از پیشگامان فناوری هیدروپونیک و کشت بدون خاک در ایران است که هدف آن ارائه راهکارهای کشت عمودی و سیستم‌های هیدروپونیک هوشمند بوده و در زمینه آموزش، مشاوره و اجرای مزارع عمودی فعالیت دارد.

۲. **شرکت کشاورزی نوین سبز :** این شرکت در زمینه تولید و اجرای سیستم‌های کشت هیدروپونیک و عمودی فعال بوده و پروژه‌های کشاورزی شهری و گلخانه‌های مدرن را با هدف کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری در فضای محدود اجرا می‌کند.

۳. **مجموعه فراکشت :** این شرکت با ارائه سیستم‌های کشت عمودی و هیدروپونیکو با تمرکز بر افزایش بازدهی به تولید سبزیجات برگی و گیاهان دارویی به صورت تجاری می‌پردازد.

**۴. شرکت فناوران کشاورزی نوآور** : این شرکت در در حوزه فناوری‌های نوین کشاورزی از جمله کشت عمودی فعال بوده و به توسعه و اجرای پروژه‌های پایلوت در تهران و برخی شهرهای دیگر می‌پردازد.

**۵. استارت‌آپ‌های کشاورزی شهری در تهران و اصفهان** : در این دو شهر نیز چند استارت‌آپ کوچک و متوسط که روی تولید سبزیجات تازه به روش عمودی تمرکز دارند و معمولاً محصولات خود را به رستوران‌ها و فروشگاه‌های محلی عرضه می‌کنند (چگینی و خرم تبریزی، ۱۴۰۲).

**روش پژوهش**

پژوهش حاضر بر پایه روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و مرور نظام‌مند منابع کتابخانه‌ای تهیه شده است. در این فرآیند، با جمع‌آوری مقالات علمی، گزارش‌های تحقیقاتی و منابع معتبر فارسی و انگلیسی، اطلاعات مرتبط با کشاورزی عمودی، فناوری‌های به‌کاررفته، مزایا، معایب و چالش‌ها جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند. سپس نتایج از منظر کاربردهای عملی و توسعه پایدار مورد بررسی قرار گرفته است تا چشم‌اندازی از وضعیت و راهکارهای آینده ارائه گردد.

**توسعه کشاورزی شهری با کشت عمودی**

کشت عمودی، به عنوان پاسخی نوین به چالش‌های تأمین غذای پایدار در محیط‌های شهری، روشی انقلابی در تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. این رویکرد، با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، امکان کشت محصولات را در فضاهای عمودی و در شرایط کاملاً کنترل شده فراهم می‌آورد. موفقیت کشاورزی عمودی به مجموعه‌ای از فناوری‌های همگرا و پیشرفته بستگی دارد که عبارتند از:

**۱.سیستم‌های کشت بدون خاک که شامل سه مورد می‌باشد:**

- **هیدروپونیک (آب‌کشت)**: در این روش، گیاهان در آب غنی شده با مواد مغذی رشد می‌کنند. ریشه‌ها مستقیماً با محلول غذایی در تماس هستند. سیستم‌های متداول شامل(NFT (Nutrient Film Technique ، DWC (Deep Water Culture)و سیستم‌های قطره‌ای می‌باشند.

- **ایروپونیک (مه‌کشت)**: در این تکنیک، ریشه‌های گیاه در هوا معلق بوده و به طور منظم با غبار بسیار ریز محلول غذایی اسپری می‌شوند. این روش، بالاترین میزان اکسیژن‌رسانی به ریشه‌ها را فراهم کرده و می‌تواند منجر به رشد سریع‌تر شود.

- **آئروپونیک (هواکشت)** : یکی از روش‌های مدرن و پیشرفته کشت بدون خاک است که در آن ریشه گیاهان در هوا معلق است و به‌جای خاک یا محیط کشت جامد، با مه یا قطرات بسیار ریز آب و مواد مغذی تغذیه می‌شوند.

با این حال، در متون علمی آئروپونیک (هواکشت) و ایروپونیک (مه‌کشت) معمولاً به یک معنا بکار برده می‌شوند. برای اجتناب از سردرگمی، آئروپونیک (هواکشت) به عنوان "سیستم‌های کشت مبتنی بر بسترهای جامد" که در برخی مزارع عمودی نیز استفاده می‌شود، توضیح داده شده که عبارتند از سیستم‌های مبتنی بر بستر جامد، به نحوی که از بسترهای خنثی مانند پشم سنگ(Rockwool) ، کوکوپیت (Coco coir) یا پرلیت (Perlite) برای حمایت از ریشه‌ها استفاده می‌شود، در حالی که تغذیه همچنان از طریق محلول‌های آبی صورت می‌گیرد.

**۲. نور مصنوعی:** لامپ‌های LED[1] به دلیل بهره‌وری بالا در مصرف انرژی، طول عمر زیاد، قابلیت تنظیم طیف نوری و تولید حرارت کم، انتخاب ایده‌آلی برای مزارع عمودی هستند. طراحان مزارع عمودی می‌توانند طیف نوری را برای مراحل مختلف رشد و نیازهای خاص هر گیاه تنظیم کنند.

**۳.کنترل محیطی که شامل موارد زیر می‌باشد:**

- **کنترل دما و رطوبت :**سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) برای حفظ دمای ایده‌آل و کنترل رطوبت محیط، از تبخیر بیش از حد آب جلوگیری کرده و شرایط بهینه رشد را فراهم می‌آورند.
- **تزریق :CO2** افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در محیط بسته می‌تواند فتوسنتز را تسریع کرده و رشد گیاهان را بهبود بخشد.

- **مدیریت تهویه :**اطمینان از جریان مناسب هوا برای جلوگیری از تجمع رطوبت، کاهش بیماری‌های قارچی و توزیع یکنواخت CO2 و دما ضروری است.

**۴.اتوماسیون و رباتیک:** سیستم‌های خودکار برای آبیاری، تغذیه، کاشت، برداشت و حتی نظارت بر سلامت گیاهان، به کاهش نیاز به نیروی کار انسانی، افزایش دقت و کارایی و امکان کارکرد ۲۴ ساعته کمک می‌کنند.

**۵.سیستم‌های مدیریت هوشمند:** استفاده از سنسورهای پیشرفته برای پایش مستمر پارامترهای محیطی و تغذیه‌ای، و به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند و هوش مصنوعی برای تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی شرایط رشد، به ارتقاء مفهوم "مدیریت هوشمند منابع" در کشاورزی عمودی منجر می‌شود.

**تأثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی**

1. LED (Light Emitting Diode)

کشاورزی عمودی شهری، با رویکرد مدیریت هوشمند منابع، تأثیرات قابل توجهی بر ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی جوامع شهری دارد. بعنوان مثال مهمترین تأثیرات اقتصادی آن عبارتند از:

- **ایجاد ارزش افزوده و فرصت‌های شغلی نوین :**توسعه مزارع عمودی، منجر به ایجاد مشاغل تخصصی در حوزه‌های مهندسی کشاورزی، بیوتکنولوژی، علوم داده، رباتیک و مدیریت سیستم‌های نوین می‌شود. این امر به رونق اقتصادی مناطق شهری کمک شایانی می‌کند.
- **کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین :**با تولید محصولات در محل مصرف، هزینه‌های حمل و نقل، انبارداری و لجستیک به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش هزینه‌ها می‌تواند به دست مصرف‌کننده نهایی نیز برسد.
- **افزایش دسترسی به غذای تازه و با کیفیت :**امکان دسترسی مستمر به محصولات سالم و تازه، بهبود سلامت جامعه شهری را به دنبال دارد و می‌تواند هزینه‌های درمانی ناشی از مصرف غذاهای ناسالم را کاهش دهد.
- **تنوع‌بخشی به اقتصاد شهری :**کشاورزی عمودی می‌تواند به عنوان یک صنعت جدید، به تنوع‌بخشی به اقتصاد شهری کمک کرده و وابستگی به صنایع سنتی را کاهش دهد.
- **پتانسیل صادرات محصولات تخصصی :**برخی محصولات با ارزش افزوده بالا که در مزارع عمودی تولید می‌شوند، می‌توانند پتانسیل صادراتی داشته باشند.
- **کاهش ضایعات مواد غذایی :**به دلیل نزدیکی تولید به مصرف و شرایط نگهداری بهتر، ضایعات مواد غذایی در مراحل توزیع و خرده‌فروشی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

بعلاوه مهمترین تأثیرات زیست‌محیطی کشاورزی عمودی شهری، با رویکرد مدیریت هوشمند منابع نیز شامل موارد زیر است:

- **کاهش انتشار کربن:(Carbon Footprint Reduction)**
  - **کاهش حمل و نقل :**حذف یا کاهش مسافت حمل و نقل محصولات کشاورزی از مزارع دوردست به شهرها، منجر به کاهش چشمگیر مصرف سوخت فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود.
  - **بازدهی انرژی در نورپردازی :**با استفاده از لامپ‌های LED کم‌مصرف و بهینه‌سازی چرخه نوری، مصرف انرژی برای نورپردازی که یکی از بزرگترین هزینه‌ها و منابع انتشار کربن در مزارع عمودی است، بهینه می‌شود.

- **استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر :** پتانسیل ادغام مزارع عمودی با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی یا توربین‌های بادی، می‌تواند ردپای کربن عملیاتی را به شدت کاهش دهد.

- **مدیریت پایدار آب:**
  - **صرفه‌جویی در مصرف آب :** سیستم‌های بسته و بازچرخشی در کشاورزی عمودی، مصرف آب را تا ۹۵٪ نسبت به کشاورزی سنتی کاهش می‌دهند. این امر به خصوص در مناطق با کمبود آب، بسیار حیاتی است.
  - **کاهش آلودگی منابع آبی :** عدم استفاده از سموم و کودهای شیمیایی در مقادیر زیاد و همچنین جلوگیری از رواناب‌های آلوده، به حفظ کیفیت منابع آبی کمک می‌کند.
- **کاهش استفاده از زمین و حفظ کاربری‌های دیگر:**
  - **کاهش فشار بر زمین‌های کشاورزی سنتی :** با انتقال بخشی از تولید غذا به محیط‌های شهری و عمودی، فشار بر زمین‌های زراعی سنتی و زیست‌بوم‌های طبیعی کاهش می‌یابد.
  - **استفاده مجدد از فضاهای شهری :** مزارع عمودی می‌توانند در ساختمان‌های بلااستفاده یا فضاهای ناکارآمد شهری احداث شوند و به احیای مناطق شهری کمک کنند.
- **کاهش آلودگی خاک و آب:**
  - **عدم استفاده از سموم و آفت‌کش‌ها :** تولید محصولات سالم و ارگانیک، از آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به واسطه باقی‌مانده سموم جلوگیری می‌کند.
- **بهبود کیفیت هوا:**
  - **تولید اکسیژن :** هرچند در مقیاس کوچک، اما گیاهان در فرآیند فتوسنتز اکسیژن تولید می‌کنند.
  - **کاهش آلودگی ناشی از حمل و نقل :** همانطور که ذکر شد، کاهش حمل و نقل به بهبود کیفیت هوای شهرها کمک می‌کند.

در یک نتیجه‌گیری کلی می توان گفت که کشاورزی عمودی با رویکرد مدیریت هوشمند منابع، مدلی پایدارتر برای تولید غذا ارائه می‌دهد که علاوه بر تأمین نیازهای غذایی، به حفظ محیط زیست و کاهش اثرات منفی فعالیت‌های انسانی بر سیاره زمین کمک می‌کند.

**مدل‌ها و الگوهای توسعه کشت عمودی در شهرها**

توسعه کشاورزی عمودی در شهرها می‌تواند در مدل‌ها و الگوهای متنوعی صورت گیرد که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. این مدل‌ها بسته به مقیاس، تکنولوژی مورد استفاده، و نوع محصول، متفاوت خواهند بود. در زیر چند الگوی مهم جهت توسعه کشت عمودی در شهرها ارائه می گردد

**۱-مدل‌های کشت عمودی خاکی[۱] :**اگرچه کشاورزی عمودی عمدتاً با سیستم‌های بدون خاک (هیدروپونیک، آئروپونیک) شناخته می‌شود، اما برخی مدل‌های نوآورانه از ترکیب خاک و عمودی‌سازی نیز بهره می‌برند، به خصوص برای محصولاتی که به خاک نیاز دارند. بعنوان مثال ایجاد مزارع عمودی سنتی در فضاهای شهری که با استفاده از فضاهای داخلی ساختمان‌ها، انبارها، یا سازه‌های طراحی شده خاص، که در آن‌ها گلدان‌ها یا بسترهای خاکی به صورت طبقاتی چیده می‌شوند. مزیت این روش این است که کشت محصولات متنوع‌تر که به خاک نیاز دارند، امکان‌پذیر می‌شود و مهمترین چالش‌های این شوه شامل نیاز به مدیریت سنگین‌تر برای خاک، آبیاری، تغذیه و کنترل آفات در مقایسه با سیستم‌های بدون خاک. وزن بیشتر بسترها نیز نیازمند سازه‌های قوی‌تر است.

**۲-مدل‌های کشت عمودی غیرخاکی[2]**: این مدل‌ها، که در حال حاضر رایج‌ترین و پرکاربردترین الگوهای کشاورزی عمودی هستند، از سیستم‌های هیدروپونیک، آئروپونیک و آئروپونیک استفاده می‌کنند. این مدل‌ها در انواع مختلفی می‌توانند ایجاد شوند که عبارتند از:

- **مزارع عمودی در کانتینرهای حمل و نقل:(Container Farms)** : در این مزارع از کانتینرهای حمل و نقل استاندارد (۲۰ یا ۴۰ فوت) که مجهز به سیستم‌های روشنایی، تهویه، کنترل محیطی و سیستم کشت بدون خاک شده‌اند، استفاده می‌شود. این کانتینرها ماژولار بوده و می‌توانند در مکان‌های مختلفی مانند پشت بام ساختمان‌ها، فضاهای خالی شهری، یا کنار مراکز تجاری قرار گیرند. مهم‌ترین مزیت این مدل عبارتست از: قابلیت جابجایی، ماژولار بودن، نسبتاً کم‌هزینه برای شروع، امکان استقرار سریع. بعلاوه چالش‌های بکارگیری این مدل نیز شامل محدودیت در مقیاس تولید، نیاز به مدیریت دقیق دما و رطوبت در محیط‌های خارجی می‌باشد.

---

۱. Soil-based Vertical Farming
2. Soilless Vertical Farming

- **مزارع عمودی در ساختمان‌های چندطبقه:(Building-integrated Vertical Farms)** : در این مدل، طبقاتی از ساختمان‌های اداری، تجاری، مسکونی یا صنعتی متروکه به مزارع عمودی اختصاص می‌یابد. این مزارع می‌توانند در مقیاس بزرگتری نسبت به کانتینرها فعالیت کنند. مهمترین مزایای این روش عبارتند از استفاده بهینه از فضای شهری، تولید در مقیاس بالا، ادغام با زیرساخت‌های شهری. همچنین در روش چالش‌هایی مثل هزینه‌های بالای بازسازی ساختمان، نیاز به طراحی دقیق برای تأمین نور، آب، برق و تهویه، و همچنین مدیریت پسماند وجود دارد.
- **مزارع عمودی زیرزمینی:(Underground Vertical Farms)** : این مدل شامل احداث مزارع عمودی در تونل‌ها، پناهگاه‌های قدیمی، یا سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. مهمترین مزایای این روش شامل دمای نسبتاً پایدار (کاهش نیاز به گرمایش و سرمایش) و محافظت در برابر عوامل محیطی نامطلوب می‌باشد. بعلاوه چالش‌های مهم بکارگیری آن نیز شامل نیاز به سیستم‌های قوی تهویه و نورپردازی، هزینه‌های بالای حفاری و سازه، دسترسی محدود می‌باشد.
- **کشاورزی عمودی مقیاس خانگی و جامعه‌ای (Residential & Community Vertical Farms):** این مدل شامل سیستم‌های کوچک مقیاس برای استفاده در خانه‌ها (مانند یخچال‌های هوشمند با قابلیت رشد گیاه) یا فضاهای مشترک در مجتمع‌های مسکونی، مدارس، و رستوران‌ها می‌باشد. **مزایای** عمده این روش شامل دسترسی به سبزیجات تازه در سطح خانوار، آموزش و آگاهی‌بخشی به جامعه، کاهش وابستگی به فروشگاه‌ها و بوده و مهم‌ترین **چالش‌های** آن مقیاس تولید بسیار محدود و نیاز به دانش اولیه برای راه‌اندازی و نگهداری می‌باشد.

**۳-الگوهای توسعه کشت عمودی مبتنی بر مدیریت هوشمند منابع:** کشت عمودی مبتنی بر مدیریت هوشمند منابع، روشی پیشرفته در کشاورزی است که با استفاده از فناوری‌های نوین مثل حسگرها، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، منابع حیاتی مانند آب، نور، انرژی و مواد مغذی بهینه و دقیق مدیریت می‌شوند. در این سیستم‌ها، شرایط محیطی و نیازهای گیاهان به صورت لحظه‌ای پایش و تنظیم می‌شود تا ضمن افزایش بهره‌وری، مصرف منابع کاهش یافته و محصولات با کیفیت و سالم‌تر تولید شوند. این رویکرد به ویژه برای کشاورزی در فضاهای محدود شهری و مناطق کم‌آب بسیار مناسب است. مدل‌های توسعه مزارع کشت عمودی بر پایه مدیریت هوشمند منابع شامل موارد زیر است:

- **مزارع عمودی متصل به شبکه هوشمند:(Smart Grid Connected Farms)** : در این مدل مزارع عمودی با شبکه‌های برق هوشمند برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، خرید برق در ساعات ارزان‌تر، و حتی تأمین برق شبکه در مواقع اضطراری (در صورت وجود سیستم‌های ذخیره انرژی) ادغام می‌شوند.
- **مدیریت هوشمند :** در این روش نیز از الگوریتم‌های پیش‌بینی‌کننده برای تنظیم زمان‌بندی فعالیت‌های پرمصرف (مانند نورپردازی) بر اساس قیمت انرژی و تقاضای شبکه استفاده می‌شود.
- **مزارع عمودی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر:(Renewable Energy Powered Farms)** : در این روش انرژی مورد نیاز مزارع از منابع تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی (نصب شده بر روی سقف ساختمان یا در مناطق مجاور)، توربین‌های بادی کوچک، یا حتی استفاده از زیست‌توده تأمین می‌شود.

- **مدیریت هوشمند :** در این روش نیز از سیستم‌های ذخیره انرژی (باتری) برای تأمین مداوم برق در زمان عدم تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود.
- **مزارع عمودی با بازیافت آب و مواد مغذی:(Water & Nutrient Recycling Farms)** : درا این روش سیستم‌های بسته با حداکثر بازیافت آب و محلول‌های مغذی طراحی می‌شود. استفاده از فیلتراسیون پیشرفته و فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی برای حفظ کیفیت آب و جلوگیری از هدررفت مواد مغذی نیز دراین روش صورت می‌گیرد.

- **مدیریت هوشمند :** مدیریت هوشمند با بکارگیری سنسورهایی برای پایش مداوم پارامترهای آب و محلول غذایی، و سیستم‌های خودکار برای تنظیم دوز مواد مغذی و شوری انجام می‌شود. بعنوان مثال یک مدل آن عبارتست از:
- **مزارع عمودی با استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء: (AI & IoT Enabled Farms):** **توضیحات :** بهره‌گیری از اینترنت اشیاء (IoT) برای جمع‌آوری داده از صدها سنسور (دما، رطوبت، $CO_2$، pH، EC، شدت نور) و استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی (AI) برای تحلیل این داده‌ها، پیش‌بینی نیازهای گیاه، تنظیم خودکار پارامترها، و شناسایی زودهنگام بیماری‌ها یا تنش‌های محیطی در این مدل صورت می‌گیرد.

انتخاب مدل مناسب بستگی به عوامل مختلفی از جمله دسترسی به سرمایه، فضای موجود، نوع محصول، و اهداف بلندمدت دارد. اما نکته کلیدی در تمام این مدل‌ها، پیاده‌سازی اصول "مدیریت هوشمند منابع" برای دستیابی به پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی است.

**نتیجه‌گیری**

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که کشاورزی عمودی، به ویژه با اتخاذ رویکرد "مدیریت هوشمند منابع"، پتانسیل بالایی برای تحول در سیستم تأمین غذای شهری و مواجهه با چالش‌های فزاینده جمعیت‌زایی، کمبود منابع و تغییرات اقلیمی دارد. این فناوری نوین، با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند سیستم‌های کشت بدون خاک (هیدروپونیک، آئروپونیک)، نورپردازی LED کارآمد، و سیستم‌های خودکار کنترل محیطی، قادر است محصولات کشاورزی را در فضاهای محدود شهری و در تمام طول سال با بهره‌وری بالا تولید کند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت کشاورزی عمودی به عنوان راهکاری پایدار برای تأمین غذای سالم و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی تأکید دارند. مزایایی چون کاهش چشمگیر مصرف آب (تا ۹۵٪)، کاهش نیاز به سموم و آفت‌کش‌ها، کاهش هزینه‌های حمل و نقل و ضایعات، و کاهش ردپای کربن، کشاورزی عمودی را به گزینه‌ای جذاب برای شهرهای آینده تبدیل می‌کند. این رویکرد، با نزدیک کردن تولید به مصرف، به افزایش تازگی و کیفیت محصولات کمک کرده و سلامت جامعه شهری را بهبود می‌بخشد. در کنار مزایا، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای اولیه سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی نیز مطرح هستند که نیازمند راه‌حل‌های نوآورانه و سیاست‌گذاری‌های حمایتی هستند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی، و توسعه مدل‌های کسب و کار مقرون به صرفه، از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند به غلبه بر این موانع کمک کنند. مطالعات موردی ارائه شده نیز گواه موفقیت این فناوری در مقیاس‌های مختلف و در مناطق گوناگون جهان هستند و نشان می‌دهند که با نوآوری فناورانه، مدیریت هوشمند منابع و استراتژی‌های کسب و کار قوی، کشاورزی عمودی می‌تواند نقش مهمی در ایجاد امنیت غذایی، تاب‌آوری شهری و توسعه اقتصادی پایدار ایفا کند. با مرور اهداف و زمینه های موفقیت شرکت های ذکر شده می توان به مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر موفقیت آنها را استخراج نموده و در راستای تدوین الگوی مناسب کشت عمودی در دیگر مناطق جهان بکار گرفت. به طور خلاصه عوامل کلیدی در پیشرفت و توسعه این شرکت ها عبارتند از:

- **نوآوری فناورانه :**سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای بهبود سیستم‌های کشت، نورپردازی و کنترل محیطی حیاتی است.

- **مدیریت هوشمند منابع :**تمرکز بر بهره‌وری انرژی، کاهش مصرف آب و کاهش ضایعات، کلید پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی است.
- **مدل کسب و کار مناسب :**شناخت بازار هدف، ایجاد شراکت‌های استراتژیک و ارائه محصولات با کیفیت و ارزش افزوده، موفقیت را تضمین می‌کند.
- **مقرون به صرفه بودن :**تلاش مستمر برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه، برای فراگیر شدن این فناوری ضروری است.
- **تأکید بر پایداری :**مصرف‌کنندگان و نهادهای نظارتی به طور فزاینده‌ای به دنبال محصولات و روش‌های تولید پایدار هستند.

این مطالعات نشان می‌دهند که کشاورزی عمودی، با پشتوانه فناوری و استراتژی‌های درست، قادر به تحول در سیستم تأمین غذای شهری و ایجاد یک آینده غذایی پایدارتر است. در نهایت، کشاورزی عمودی نه تنها یک روش تولید غذا، بلکه الگویی جامع برای بازتعریف رابطه انسان با غذا در محیط‌های شهری است؛ که بر پایه دانش، فناوری و احترام به منابع طبیعی و محیط زیست بنا شده است.

**پیشنهادات**

با توجه به پتانسیل عظیم کشاورزی عمودی شهری و چالش‌های پیش رو، پیشنهادات زیر برای سیاست‌گذاران، متخصصان، سرمایه‌گذاران و جامعه علمی ارائه می‌گردد تا توسعه این بخش با سرعت و پایداری بیشتری پیش رود:

**برای سیاست‌گذاران و دولت‌ها:**

۱. **حمایت‌های مالی و اعتباری :**ایجاد تسهیلات مالی، وام‌های کم‌بهره، و مشوق‌های مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در تأسیس و توسعه مزارع عمودی، به ویژه برای کسب‌وکارهای کوچک و متوسط و پروژه‌های نوآورانه.

۲. **تدوین مقررات و استانداردهای حمایتی :**تعیین استانداردهای لازم برای کیفیت محصولات، ایمنی مواد غذایی، و همچنین استانداردهای زیست‌محیطی و انرژی برای مزارع عمودی، همراه با تسهیل فرآیندهای اخذ مجوز.

۳. **توسعه زیرساخت‌های حمایتی :**سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، حمایت از مراکز نوآوری، و ایجاد پارک‌های علم و فناوری مرتبط با کشاورزی عمودی. همچنین، تسهیل دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند برای مزارع.

۴. **تسهیل دسترسی به زمین :**تعیین کاربری‌های مناسب برای احداث مزارع عمودی در مناطق شهری، مانند استفاده از ساختمان‌های بلااستفاده، پشت بام‌ها، یا فضاهای خاکستری شهر.

۵. **آموزش و ارتقای دانش :**حمایت از برنامه‌های آموزشی دانشگاهی و فنی-حرفه‌ای برای تربیت نیروی متخصص مورد نیاز این صنعت.

۶. **ترویج و آگاهی‌بخشی عمومی :**برگزاری کمپین‌های اطلاع‌رسانی برای معرفی مزایای کشاورزی عمودی به مصرف‌کنندگان، افزایش آگاهی نسبت به محصولات سالم و پایدار، و تشویق به مصرف این محصولات.

**برای متخصصان و پژوهشگران:**

۱. **کاهش هزینه‌های انرژی :**تحقیقات بیشتر بر روی نسل جدیدLED ها با بهره‌وری بالاتر، بهینه‌سازی سیستم‌های نورپردازی، و توسعه روش‌های نوآورانه برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی.

۲. **تنوع‌بخشی محصولات :**پژوهش در زمینه کشت محصولات جدید و استراتژیک در مزارع عمودی، به ویژه غلات، حبوبات، و محصولات ریشه‌دار، برای کاهش وابستگی به واردات.

۳. **توسعه مدل‌های اقتصادی پایدار :**ارائه مدل‌های کسب و کار انعطاف‌پذیر و مقرون به صرفه که بتوانند در مقیاس‌های مختلف (از خانگی تا صنعتی) موفق عمل کنند.

۴. **بهینه‌سازی چرخه عمر :**انجام تحلیل‌های جامع چرخه عمر (LCA) برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات زیست‌محیطی کلی و شناسایی نقاط قابل بهبود.

۵. **توسعه هوش مصنوعی و اتوماسیون :**پیشبرد تحقیقات در زمینه کاربرد هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و رباتیک برای مدیریت هوشمند منابع، پیش‌بینی عملکرد، و افزایش کارایی عملیاتی.

۶. **سلامت خاک و میکروارگانیسم‌ها (در صورت استفاده از بستر) :**تحقیقات بیشتر در مورد نقش میکروارگانیسم‌های مفید در سیستم‌های کشت مبتنی بر بستر برای بهبود تغذیه گیاهی و مقاومت در برابر بیماری‌ها.

**برای سرمایه‌گذاران:**

۱. **شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری :**سرمایه‌گذاری در استارتاپ‌ها و شرکت‌های فعال در حوزه کشاورزی عمودی، به ویژه آنهایی که نوآوری فناورانه و مدل‌های پایدار ارائه می‌دهند.

۲. **تنوع‌بخشی به سبد سرمایه‌گذاری :**در نظر گرفتن کشاورزی عمودی به عنوان بخشی از سبد سرمایه‌گذاری در حوزه فناوری‌های سبز و کشاورزی پایدار.

۳. **تمرکز بر بازارهای محلی :**سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی که قادر به تأمین نیازهای غذایی شهرهای بزرگ و زنجیره تأمین محلی هستند.

**برای جامعه:**

۱. **آموزش و مشارکت :**تشویق به یادگیری درباره کشاورزی عمودی و مزایای آن، و مشارکت در پروژه‌های کشاورزی جامعه‌محور یا خانگی.

۲. **حمایت از محصولات محلی :**ترجیح دادن محصولات تولید شده در مزارع عمودی محلی، که به کاهش ردپای کربن و حمایت از اقتصاد داخلی کمک می‌کند.

اجرای این پیشنهادات می‌تواند گامی مهم در جهت تحقق کشاورزی عمودی پایدار و کارآمد در شهرها باشد و به ایجاد یک آینده غذایی امن‌تر، سالم‌تر و سازگارتر با محیط زیست کمک شایانی نماید.

**منابع**

آخوندی، ف.، و فرشچی، ح. (۱۴۰۲). مزارع عمودی در شهرها راهکاری جهت تامین امنیت غذایی و بهبود شرایط زیست محیطی، سومین کنفرانس بین المللی معماری، عمران،شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، تبریز، https://civilica.com/doc/1959253

چگینی، غ.، و خرم تبریزی، م. (۱۴۰۲). طراحی و ساخت گلخانه عمودی با نور مصنوعی ال ای دی PFAL، پانزدهمین کنگره ملی و اولین کنگره بین المللی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون کشاورزی، تهران، https://civilica.com/doc/1813351

حمیدیان، ا. (۱۴۰۳). کشاورزی عمودی راهکاری برای تامین امنیت غذایی . *دومین همایش ملی پژوهش های کاربردی در امنیت غذایی، ایمنی غذایی و سلامت.*

حکیمی، ه. (۱۴۰۱). کشاورزی عمودی، راهکار کشاورزی هوشمند برای بحران زمین. علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی، ۵(۲)، ۱۹-۱۱. doi: 10.22092/jaist.2023.361667.1085

دلفیه، س.، و دلفیه، م. (۱۴۰۲). مروری بر کاربردهای اینترنت اشیا (IoT) در زراعت عمودی. نخستین کنفرانس ملی اینترنت اشیا.

رحیمی، ا.، و دهری، م . (۱۴۰۱). کشاورزی شهری و اثر آن در توسعه پایدار شهری(نمونه موردی شهر تبریز). دانش کشاورزی وتولید پایدار، ۳۲(۴)، ۲۸۵-۳۰۱. doi: 10.22034/saps.2022.43458.2592

کرمی، ر.، و صلاحی اصفهانی، گ . (۱۳۹۹). نوع شناسی کشاورزی شهری و نقش آموزش آن در توسعه پایدار شهری استان زنجان. فصلنامه علمی آموزش محیط زیست و توسعه پایدار، ۹(۱)، ۱۵۳-۱۷۰. doi: 10.30473/ee.2020.7233

ملکی نژاد، ح.، محمدزاده، ف.، طاهرپور، م. (۱۳۹۹). جایگاه کشاورزی شهری در ارتقاء بهره‌وری کشاورزی و امنیت غذایی. سامانه‌های سطوح آبگیر باران. ۸ (۳) :۴۳-۵۸.

ملک زاده، پ. (۱۴۰۰). توسعه کشاورزی عمودی راهکاری برای حل مشکل غذایی جهان درسده بیست و یکم. نامه علوم پایه ۴. ۸۹-۰.

نوری، ک.، شکوری مقدم، ح.، و کشته گر، ع. (۱۴۰۰). کشاورزی عمودی و ارایه راهکار های نوین سیستمی و ساختمانی، پنجمین کنگره بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران،تبریز،https://civilica.com/doc/1276305

Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8(2), 24.

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. Sustainability, 9(2), 137.

Barbosa, G. L., Gadelha, F. D. A., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., ... & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. International journal of environmental research and public health, 12(6), 6879.

Chowdhury, H., Argha, D. B. P., & Ahmed, M. A. (2023). Artificial intelligence in sustainable vertical farming. arXiv preprint arXiv:2312.00030.

Dutta, M., Gupta, D., Tharewal, S., Goyal, D., Sandhu, J. K., Kaur, M., ... & Alanazi, J. M. (2025). Internet of Things-based smart precision farming in soilless agriculture: Opportunities and challenges for global food security. IEEE Access.

Doughty, R., & Wheal, E. (2021). *Vertical Farming: An Introduction to the Future of Food*. The Royal Society.

Grunewald, M., Bensalem, M., Dizdarević, J., & Jukan, A. (2024, November). Towards smart microfarming in an urban computing continuum. In 2024 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM) (pp. 1-6). IEEE.

Generalitat de Catalunya. (2020). *Vertical Farming*. Department of Agriculture, Livestock, Fisheries and Food.

Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., ... & Ahngar, T. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. The Pharma Innovation Journal, 11(2), 1175-1195.

Saad, M. H. M., Hamdan, N. M., & Sarker, M. R. (2021). State of the art of urban smart vertical farming automation system: Advanced topologies, issues and recommendations. *Electronics*, *10*(12), 1422.

Specht, K., & Grun, I. (2017). Urban agriculture of the future: sustainability, resilience, and challenges. Sustainable Cities and Society, 32, 491-497.

Tiwari, S., & R S, N. (2018). Vertical Farming-A New Era of Agriculture. International Journal of Advanced Research, 6(7), 666-669.

هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مطالعات مهندسی کشاورزی زراعت و اصلاح نباتات
7th International Conference on
Studies of Agricultural Engineering Farming and Plant Breeding

# Developing urban agriculture through vertical farming: A new paradigm based on smart resource management

**Sedigheh Ghasemi[1*] and Mohammad Hadi Roohian[2]**

**1-Ph.D at agricultural development and Lecturer at Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Fars, Iran. Email: Ghasemi.s.sh@gmail.com**

**2- Faculty member at Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Fars, Iran.**

**Abstract**

Today, the challenges of global population growth and the increasing need for healthy food have made the development of urban agriculture an urgent issue. With the increasing urbanization, access to suitable agricultural land in urban areas is severely limited, and the food supply chain is facing fundamental challenges, maintaining quality and reducing reliance on long-term transportation. In the meantime, climate change and its adverse effects on traditional agriculture have made the need for new and sustainable solutions more evident than ever. Urban agriculture, with the aim of bringing food production closer to the consumer, is a response to these needs. In this article, we specifically examine "vertical agriculture" as an innovative and advanced solution for providing healthy and sustainable food in urban environments. The main focus of this study is based on the concept of "smart resource management", which includes the optimal and sustainable use of vital resources such as water, energy, light and nutrients. This approach enables large-scale production in limited urban spaces, significantly reducing dependence on fossil fuels and long-distance transportation. This study examines in detail the overall benefits and challenges of vertical farming, its profound economic and environmental impacts, as well as the various models developed in this field, to provide a comprehensive picture of the potential of this technology in the future of urban agriculture.

**Keywords:** vertical farming, urban agriculture, agricultural development