دانشگاه خوارزمی

مدل‌سازی دینامیک سیستم برای

بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی و آب در سیستم‌های آکواپونیک

پویایی کسب و کار

کارشناسی ارشد MBA

یوسف امیری
YousefAmiri.ir

چکیده

کشت آکواپونیک (Aquaponics) یک روش کشاورزی است که پرورش آبزیان مثل ماهی و کشت گیاه بدون خاک یا هیدروپونیک را در یک چرخه مشترک ترکیب می‌کند. در این سیستم، آب دائماً بین مخزن ماهی و بستر گیاه گردش می‌کند.

مقاله پایه این موضوع بر اساس شرایط آب و هوایی کشور آفریقای جنوبی است که با توجه به جدول زیر می تواند در مناطق با آب و هوای گرم و مرطوب کشور ما که دسترسی به *انرژی* و *آب* دارند نیز صادق باشد.

	آفریقای جنوبی	ایران
میانگین بارش	~ ۴۵۰-۵۰۰ml	~ ۲۵۰ml
میانگین رطوبت	بالای متوسط ٪۴۰-۷۰	زیر متوسط ٪۳۰-۵۰
شدت گرمای تابستان	ملایم تر	شدید
منابع آب سطحی	تنش دوره ای	تنش آبی بالا
پرورش آبزیان	توسعه در حال افزایش - تیلاپیلا	رو به رشد – قزل آلا

آفریقا قاره‌ای است که با ضعف تولید برق، افزایش جمعیت، تغییرات اقلیمی و بحران آب شناخته می شود. بنابراین ابزارهای کارآمدتر و ایمن‌تر برای امنیت غذایی مبتنی بر بهره‌وری انرژی و آب، ضروری به نظر می رسد.
این تحقیق یک مدل دینامیک سیستم از یک سیستم آکواپونیک ارائه داده است تا حساسیت پارامترها در طراحی سیستم‌های آکواپونیک را بررسی کند. متغیر محرک اصلی که در این تحقیق در نظر گرفته شده «انرژی» است و عوامل موثر بر مصرف آن بررسی شده است.

شرح مساله

تحقیقات اخیر، **بهره‌وری انرژی** سیستم‌های آکواپونیک را تنها بر اساس آب و هوای منطقه‌ای بررسی کرده اند اگر بتوان سیستم‌های آکواپونیک را با استفاده از دینامیک سیستم مدل‌سازی کرد، برخی از پیچیدگی‌ها را می‌توان به راحتی تجزیه و تحلیل کرد. پارامترهایی مانند **پتانسیل عملکرد، نسبت بهینه ماهی- گیاه** و **مصرف انرژی** را می‌توان شبیه‌سازی کرد تا مشاهده شود که چگونه سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این مدل، رویکردی را ارائه می‌دهد که منجر به نتایج مقایسه‌ای سریع می‌شود و می‌توان از آن برای مدیریت مصرف انرژی، کاهش دورریز، به حداکثر رساندن عملکرد، ایجاد شغل و امنیت غذایی و همچنین توسعه آبزی پروری و کشاورزی پایدار استفاده کرد و به عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در سیستم‌های پایدار عمل می‌کند.

جهان همچنان با ناامنی غذایی گسترده مواجه است و دستیابی به امنیت غذایی برای همه به طور فزاینده‌ای پیچیده است. تقریباً ۲۰ درصد از خانوارهای آفریقای جنوبی در سال ۲۰۱۷ دسترسی ناکافی به غذا داشتند. افزایش جمعیت، فشار فزاینده‌ای بر منابع طبیعی و توانایی یک کشور برای تغذیه مردم خود دارد.

حاکمیت غذایی از طریق آکواپونیک پتانسیل بالایی برای مقابله با ناامنی غذایی و تغذیه‌ای دارد. آکواپونیک، پرورش ماهی-گیاه را در یک سیستم واحد اجرا می کند. بطوریکه آب حوضچه‌های پرورش ماهی، برای آبیاری گیاهان استفاده می شود که طی آن مقداری از نیتروژن و سایر مواد مغذی از آب حذف می شود و بعد از یک سری فرآیند، دوباره به حوضچه‌های پرورش ماهی برمیگردد. آکواپونیک یک مفهوم جدید نیست، اما در بسیاری از کشورهای جهان به اندازه کافی مورد استفاده و توسعه قرار نگرفته است.

هدف

هدف از این تحقیق، **ارزیابی سطح بهره‌وری انرژی برای طراحی سیستم‌های آکواپونیک** است. این امر با توسعه شبکه‌ای از تمام متغیرها و پارامترهای سیستمی مبتنی بر شرایط محیطی با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا انجام شد تا تعاملات پیچیده درون سیستم را به تصویر بکشد.

آکواپونیک مفهوم جدیدی نیست، اما در بسیاری از کشورهای جهان به اندازه کافی مورد استفاده و توسعه قرار نگرفته است. رویکردهای مدل‌سازی دینامیک سیستم را می‌توان برای برنامه‌ریزی صحیح سیاست‌های پایدار و تضمین موفقیت در کشورهایی که چالش‌های محلی ممکن است مانع از اجرای سیستم‌های آکواپونیک شود، پیاده‌سازی کرد. می‌توان از آن به طور مؤثر برای مدیریت مصرف انرژی، کاهش ضایعات، به حداکثر رساندن عملکرد، ایجاد شغل و امنیت غذایی و همچنین افزایش پرورش آبزیان و کشاورزی پایدار استفاده کرد.

در رابطه با سیاست گذاری توسعه سیستم‌های آکواپونیک، برنامه رشد سازگار با آب و هوا (CCG) دفتر توسعه خارجی و مشترک‌المنافع بریتانیا (FCDO) با نام **اوبونتو**، این قابلیت‌ها را ترسیم کرده است:

بازیابی، استفاده مجدد، تکرارپذیری، بازسازی، همکاری، حسابرسی و بهره‌وری انرژی.

اوبونتو با توانمندسازی اقتصادی توسط استفاده کارامد از انرژی و آب برای سیستم های یکپارچه کشاورزی و دامداری، مورد حمایت قرار گرفت. سیستم همزیستی که از پتانسیل‌های محیط بهره می‌برد، به ترتیب با اهداف توسعه پایدار شماره ۷ (انرژی مقرون‌به‌صرفه و پاک) و شماره ۱۳ (اقدامات اقلیمی) سازمان ملل متحد مطابقت دارد.

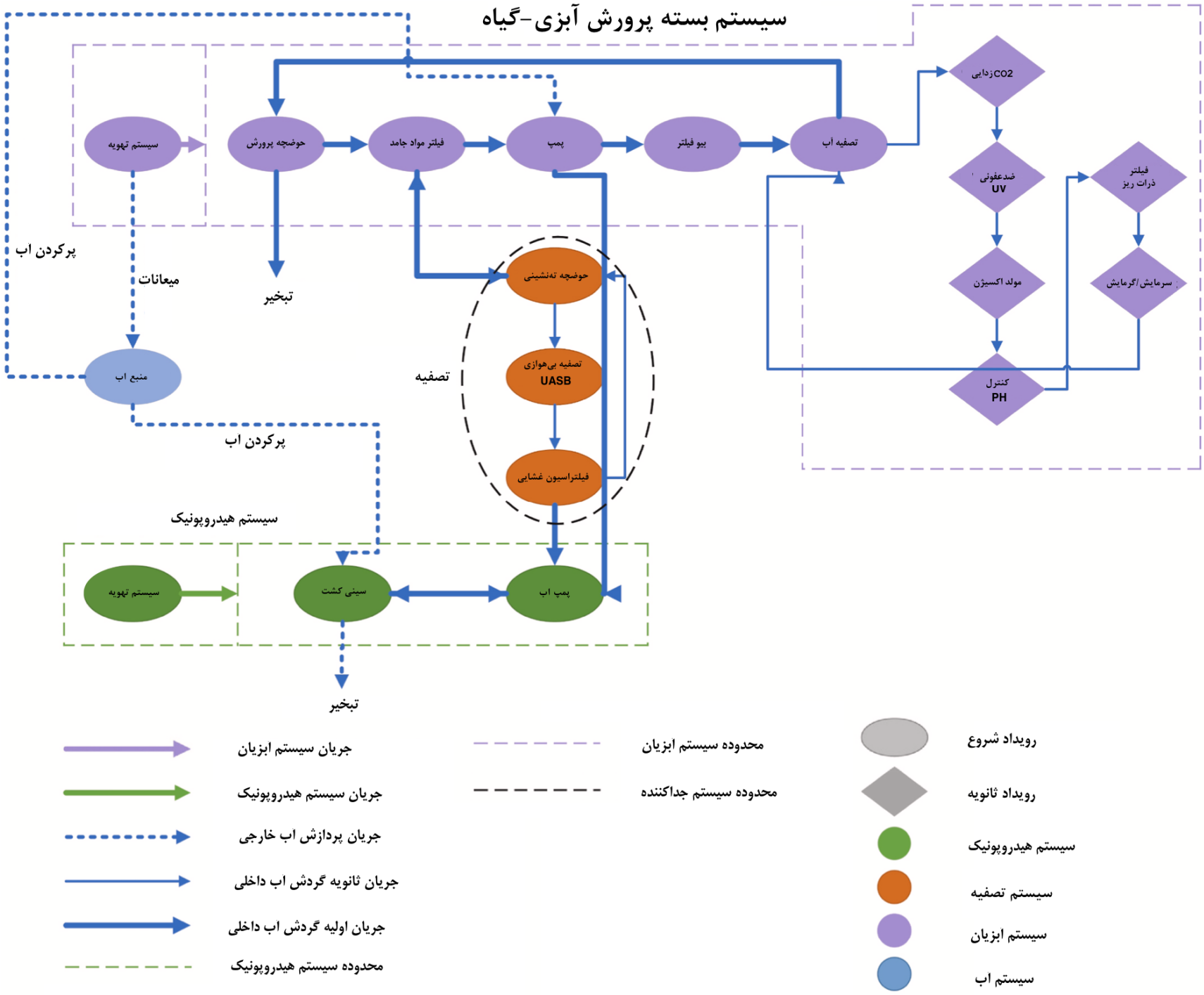
سیستم مرجع

به عنوان بخشی از روش‌شناسی تفکر سیستمی، اولین گام مهم، شناسایی مرزهای سیستم است. در این خصوص یک مدل انتزاعی مرجع از سیستم آکواپونیک ساخته شده است که شامل دو زیرسیستم است:

۱- **مرکز آبزی‌پروری چرخشی**

۲- **سیستم هیدروپونیک گلخانه‌آی**

این سیستم‌های مستقل از طریق سیستم تصفیه مواد مغذی با هم در ارتباط هستند تا هر دو سیستم به شرایط برسند. اساس سیستم ارتقا یافته بر اساس کار کریمانزیر (۲۰۱۶)، گودک و همکاران [1] و گودک [2] بود. هر دو سیستم تحت کنترل شرایط محیطی قرار گرفتند تا وضعیت بهینه برای تولید ماهی و محصولات کشاورزی حاصل شود. اجزای مورد نیاز که به برق نیاز دارند، شامل روشنایی، برج‌های هوادهی، تولید اکسیژن، پمپ‌های گردش جریان، ضدعفونی با اشعه ماوراء بنفش، تهویه و گرمایش و سرمایش مخازن آب و هوای محیط است که در شکل زیر نشان داده شده است:


سیستم بسته پرورش آبزی-گیاه
سیستم تهویه
حوضچه پرورش
فیلتر مواد جامد
پمپ
بیو فیلتر
تصفیه آب
CO2زدایی
ضدعفونی UV
مولد اکسیژن
کنترل PH
فیلتر ذرات ریز
سرمایش/گرمایش
پرکردن اب
میعانات
تبخیر
منبع اب
پرکردن اب
تصفیه
حوضچه ته‌نشینی
تصفیه بی‌هوازی UASB
فیلتراسیون غشایی
سیستم هیدروپونیک
سیستم تهویه
سینی کشت
پمپ اب
تبخیر
جریان سیستم ابزیان
جریان سیستم هیدروپونیک
جریان پردازش اب خارجی
جریان ثانویه گردش اب داخلی
جریان اولیه گردش اب داخلی
محدوده سیستم هیدروپونیک
محدوده سیستم ابزیان
محدوده سیستم جداکننده
رویداد شروع
رویداد ثانویه
سیستم هیدروپونیک
سیستم تصفیه
سیستم ابزیان
سیستم اب

در توصیف مدل عمومی، پارامترهای غیر متغیر خاصی تعریف شدند. این پارامترها صرف نظر از محیط خارجی ثابت ماندند. فرض بر این بود که راندمان تغییر زیادی نخواهد کرد. فرض بر این بود که تیلاپیای نیل، ماهی مورد بررسی در مرکز آبزی پروری و کاهو محصول کشت شده در گلخانه هیدروپونیک است. دمای آب در محدوده ۲۸ درجه سانتیگراد حفظ شد، همانطور که ال-سید و کاوانا [۱۳] مشاهده کردند نرخ رشد تیلاپیای نیل در این دمای آب بهینه است [۲۵]. دمای مرکز آبزی پروری ۲۶ درجه سانتیگراد است تا اختلاف دمای بین آب و محیط تا حد امکان کم باشد و در عین حال شرایط قابل قبول برای افراد وجود داشته باشد. گلخانه در طول روز در دمای ۲۶ درجه سانتیگراد ± ۲ درجه سانتیگراد و در طول شب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد ± ۲ درجه سانتیگراد نگهداری شد. رطوبت در سیستم‌ها به طور فعال کنترل نمی‌شد، اما از طریق تهویه و رطوبت‌زدایی که در طول فرآیند خنک‌سازی رخ می‌داد، حفظ می‌شد. پارامترهایی مانند هدف تولید سالانه، زمان ماند هیدرولیکی و تراکم دام بر اساس مقادیر دیویسون [۶] تعیین شدند. در نهایت، اندازه سیستم و فضای اشغال شده توسط سایت با هدف تولید سالانه تعیین شد.

روش‌شناسی تفکر سیستمی نیازمند یک فرضیه پویا است که علت عناصر پویای سیستم را توضیح دهد. فرض شد که عوامل خارجی تأثیر عمده‌ای بر پویایی سیستم و نحوه ارتباط آن با **مصرف انرژی** و **آب** سیستم دارند. عوامل خارجی مانند دمای هوا، رطوبت، فشار، تابش خورشیدی ورودی، مدت زمان روشنایی روز و سرعت باد تأثیر قابل توجهی بر سیستم خواهند داشت. در نهایت، تنها مکان‌های خاصی از نقطه نظر بهره‌وری انرژی و آب برای این سیستم مناسب خواهند بود.

تعادل انرژی – کار

هر بخش در شکل مرجع هدف خاصی را دنبال می‌کند تا حداقل اتلاف محصول و حداکثر سود را تضمین کند. هدف خاص هر جزء به تفصیل مورد بحث قرار نگرفته است زیرا تمرکز اصلی بر این موضوع نیست. شناسایی اینکه کدام یک از این اجزا به ورودی انرژی نیاز دارند و سیستم چگونه تحت تأثیر عوامل اقلیمی اطراف قرار می‌گیرد، بسیار مهم‌تر است. با اعمال یک مدل تعادل انرژی و در نظر گرفتن قانون اول ترمودینامیک، انرژی و کار سیستم توسط اجزای منفرد تعیین شد.

روشنایی برای افزایش زمان تغذیه مورد نیاز است. نور باعث افزایش نرخ تغذیه و رشد می‌شود و چرخه برداشت سریع را تضمین می‌کند. روشنایی به مدت ۱۸ ساعت در روز در سیستم وجود داشت [۱۴] و نیاز به برق تابعی از مساحت کف است. انرژی مصرف شده توسط روشنایی در تأسیسات آبزی‌پروری به صورت زیر است:

$$\dot{W}_{RAS,lt} = D_v A_{f,RAS} P_{RAS,lt} \quad (1)$$

برج‌های هوادهی برای جداسازی CO_2 تولید شده توسط زیست‌توده از آب استفاده می‌شوند. فن‌ها با ایجاد فشار هوا بر روی آب سبب می شوند تا CO_2 بتواند از آب خارج شده و به جریان هوا منتقل شود. مصرف برق فن به صورت زیر است:

$$\dot{W}_{RAS,CO_2\ fan} = \frac{\dot{V}_{RAS,CO_2} \Delta P_{RAS,CO_2\ fan}}{\eta_{RAS,CO_2\ fan}} \quad (2)$$

پمپ‌های گردش آب با حفظ فشار سیستم، کیفیت آب را حفظ می‌کنند. پمپ‌ها به درایوهای سرعت متغیر مجهزند تا در طول چرخه زندگی ماهی، سرعت را بالا و پایین ببرند. هرچه زیست‌توده کوچکتر باشد، جریان کمتری مورد نیاز است و بنابراین می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. بنابراین، انرژی تابعی از زیست‌توده سیستم است. کار انجام شده توسط پمپ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{RAS,cp} = \frac{\rho_w g \dot{V}_{RAS,cp} H_{RAS,cp}}{\eta_{RAS,cp}} \quad (3)$$

نرخ جریان حجمی تابعی از زیست توده سیستم است و تحت تأثیر نرخ رشد ماهی، نرخ تغذیه و نرخ تبدیل غذا قرار می‌گیرد [۶]. از یک تابع تکه‌ای برای تعیین نرخ رشد ماهی و نرخ تبدیل غذا بر اساس مرحله رشد ماهی و چرخه زندگی استفاده شد [۱۵]. نور فرابنفش (UV) برای حذف عوامل بیماری‌زای مضر احتمالی که می‌توانند تأثیر فاجعه‌باری بر مرگ و میر داشته باشند، مورد نیاز است. انرژی مصرف شده توسط نور فرابنفش در تأسیسات آبزی‌پروری به صورت زیر است:

$$\dot{W}_{RAS,UV} = A_{f\ RAS} P_{RAS,UV} \quad (4)$$

اکسیژن برای اطمینان از شرایط بهینه رشد ماهی و محدود کردن مرگ و میر مورد نیاز است. اکسیژن از طریق یک مخروط وارد می‌شود. یک کمپرسور برای حفظ فشار اکسیژن و اطمینان از ورود آن به جریان آب مورد نیاز است. کار مورد نیاز کمپرسور به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{RAS,O_2} = \frac{\dot{V}_{RAS,O_2} H_{RAS,O_2}}{\eta_{RAS,O_2}} \quad (5)$$

گلخانه هیدروپونیک به سیستم روشنایی مجهز شده بود. روشنایی، دوره زمانی را که گیاهان می‌توانند چرخه‌های رشد و فرآیندهای بیوشیمیایی را طی کنند، افزایش داد. روشنایی به انرژی نیاز داشت و گرما را به محیط اطراف آزاد می‌کرد:

$$\dot{W}_{HP,lt} = D_v P_{HP,lt} A_{fHP} \quad (6)$$

در حالت عادی، پمپ‌های گردش آب گلخانه به طور مداوم با نرخ جریان ثابت کار می‌کردند. با توجه به اتلاف آب ساعتی ناشی از تبخیر و تعرق، پمپ برای حفظ فشار سیستم، افزایش و کاهش سرعت می‌داد. کار انجام شده توسط پمپ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{HP,cp} = \frac{\rho_w g \dot{V}_{HP,cp} H_{HP,cp}}{\eta_{HP,cp}} \quad (7)$$

برای اطمینان از شرایط بهینه برای ماهی‌ها و محصولات کشاورزی، محیط داخلی باید کنترل و تنظیم شود. ایجاد و حفظ چنین محیطی می‌تواند یک تلاش انرژی‌بر باشد و مهم است که تا حد امکان کارآمد باشد. اگر سیستم از نظر مصرف انرژی به دقت نظارت نشود، هزینه

عملیاتی می‌تواند از سودآوری یک عملیات بیشتر شود. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) برای ایجاد شرایط محیطی بهینه با کنترل و تنظیم عواملی مانند دما، رطوبت، سطح CO_2 و هوای تازه طبق استاندارد طراحی شده‌اند.
برای تعیین اندازه تجهیزات، که به عنوان مصرف‌کننده‌های توان شناسایی شده‌اند، انرژی و جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. انرژی مورد نیاز برای گرم کردن یا خنک کردن سیستم‌های مربوطه توسط معادلات مربوطه زیر ارائه شده است:

$$\pm\dot{Q}_{RAS,HVAC} = \dot{Q}_{RAS,TL} + \dot{Q}_{RAS,in} \pm \dot{Q}_{RAS,ex} \pm \quad \dot{Q}_{RAS,vent} \tag{8}$$

در تحلیل موازنه انرژی و ماده درون گلخانه، از رویکرد و فرضیات تعریف‌شده توسط واکر [۱۶]، کیندلان [۱۷] و ایدسو [۱۸] پیروی شد.

$$\pm\dot{Q}_{HP,HVAC} = \dot{Q}_{HP,sr} - \dot{Q}_{HP,ET} \pm \dot{Q}_{HP,cd} - \dot{Q}_{HP,rad} - \dot{Q}_{HP,infil} \tag{9}$$

عبارت مثبت نشان می‌دهد که سیستم‌ها در حال خنک‌سازی تا رسیدن به نقطه تنظیم هستند و عبارت منفی نشان می‌دهد که سیستم‌ها در حال گرم‌سازی هستند.

سه جزء وجود دارند که در طول سرمایش و گرمایش تأسیسات آبزی‌پروری انرژی مصرف می‌کنند، یعنی چیلر-پمپ حرارتی، پمپ‌های گردش هوا و فن‌های سیستم‌های توزیع هوا. کار مورد نیاز برای خنک‌سازی با موارد زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{RAS,chil} = \frac{+\dot{Q}_{RAS,HVAC}}{COP_{chil}} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{RAS,chil\ p^-} = \frac{\rho_w g \dot{V}_{RAS,chil\ p^-} H_{RAS,chil\ p^-}}{\eta_{RAS,chil\ p^-}} \quad (11)$$

$$\dot{W}_{RAS,AHU^-} = \frac{\dot{V}_{RAS,AHU^-} \Delta P_{RAS,AHU^-}}{\eta_{RAS,AHU\ fan^-}} \quad (12)$$

The work required for heating is determined as:

$$\dot{W}_{RAS,heat} = \frac{-\dot{Q}_{RAS,HVAC}}{COP_{heat}} \quad (13)$$

$$\dot{W}_{RAS,heat\ p^+} = \frac{\rho_w g \dot{V}_{RAS,heat\ p^+} H_{RAS,heat\ p^+}}{\eta_{RAS,heat\ p^+}} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{RAS,AHU^+} = \frac{\dot{V}_{RAS,AHU^+} \Delta P_{RAS,AHU^+}}{\eta_{RAS,AHU\ fan^+}} \quad (15)$$

با توجه به مولفه گرمای نهان بالای ناشی از محصولات، خنک‌سازی غیرعملی و گران تمام می‌شود. بنابراین، گلخانه فقط با استفاده از تهویه خنک می‌شد و نه با کویل خنک‌کننده یا کولر. کار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{HP,cool} = \frac{\dot{V}_{HP,v}\Delta P_{HP,fan}}{\eta_{HP,f}} \quad (16)$$

گرمایش از طریق یک پمپ حرارتی که آب گرم تولید می‌کند و در رادیاتورها استفاده می‌شود و از طریق یک سیستم تهویه مطبوع کانالی انجام می‌شود. عملکرد اجزای مربوطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{HP,heat\ pump} = \frac{-\dot{Q}_{HP,HVAC}}{COP_{HP}} \quad (17)$$

$$\dot{W}_{HP,pump^+} = \frac{\rho_w g \dot{V}_{HP,pump^+} H_{HP,pump^+}}{\eta_{HP,pump^+}} \quad (18)$$

$$\dot{W}_{HP,v\ heat} = \frac{-\dot{V}_{HP,v}\Delta P_{HP,fan}}{\eta_{HP,f}} \quad (19)$$

کل مصرف انرژی سیستم برای یک بازه زمانی مشخص، مجموع تمام اجزای مصرف کننده انرژی است که در معادلات (۱) تا (۱۹) شرح داده شده است.

اتلاف آب از طریق تبخیر و تعرق در سیستم گلخانه هیدروپونیک به دلیل فرآیندهای بیوشیمیایی محصولات کشاورزی رخ می‌دهد. اتلاف آب در تأسیسات آبزی‌پروری به دلیل تبخیر ناشی از اختلاف دما و رطوبت در داخل تأسیسات رخ می‌دهد. آب توسط آب میعانی که در طول فرآیند خنک‌سازی روی کویل‌های خنک‌کننده تشکیل می‌شود، بازیابی می‌شود. آب وقتی دمای هوا پایین‌تر از نقطه شبنم در شرایط کویل باشد، روی کویل‌های خنک‌کننده میعان می‌شود.

آبی که در سیستم هیدروپونیک و سیستم‌های آبزی‌پروری از دست می‌رفت، از یک مخزن ذخیره آب دوباره پر می‌شد. آب می‌توانست مستقیماً از طریق موازنه جرم بین آب از دست رفته از طریق تبخیر و آب بازیابی شده از طریق میعان جایگزین شود. اگر آب حاصل از میعان کمتر از آب از دست رفته باشد، باید آب از طریق یک منبع آب خارجی دوباره پر شود. منبع آب خارجی، اندازه‌گیری مصرف آب در سیستم بود.

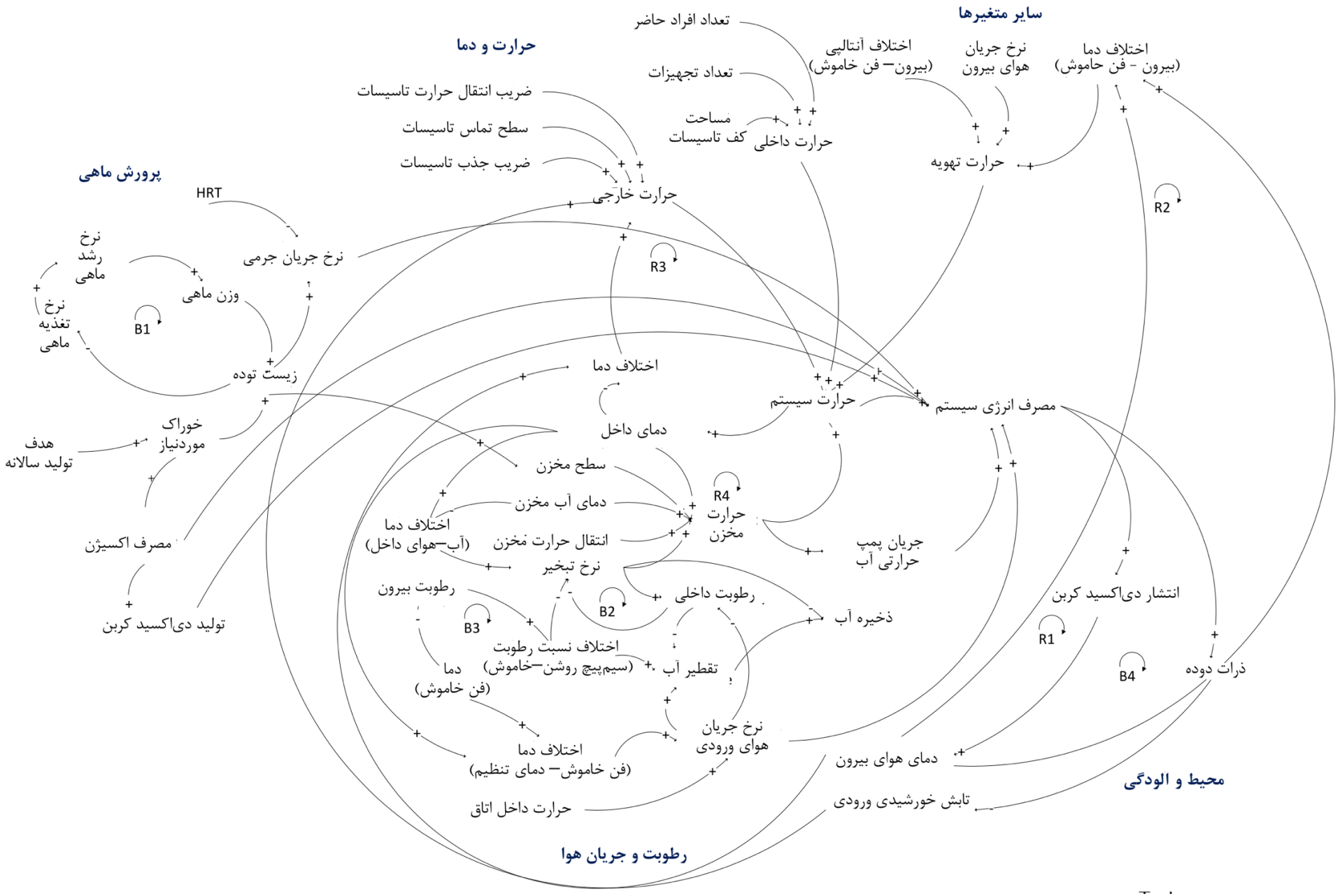
اعمال موازنه جرم در سیستم نتایج زیر را به همراه دارد:

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{w\ evap} + ET - \dot{m}_{w\ cond} \qquad (20)$$

اگر تعادل منفی بود، آب مازاد وجود داشت و آب در مخزن ذخیره می‌شد. سپس آب برای استفاده‌های بعدی در دسترس بود. نرخ تبخیر آب مخزن با اعمال قیاس جریان جرمی انتقال حرارت همرفتی که توسط [۱۹ Cengel & Ghajar] شرح داده شده است، تعیین شد. نرخ چگالش توسط فرآیند رطوبت‌زدایی که توسط حالت روان‌سنجی سیستم کنترل می‌شود، تعیین می‌شود. نرخ تبخیر و تعرق محصولات با روش‌ها و نظریه‌ای که توسط Allen و همکاران [۲۰] مورد بحث قرار گرفته است، تعیین شد.

نمودارهای علت و معلول

متغیرهای سیستم علت و معلول برای توسعه نمودارهای حلقه علیت به ترتیب برای هر دو مرکز آبزی‌پروری چرخشی (شکل ۱) و گلخانه هیدروپونیک (شکل ۲) استفاده شدند. نمودار حلقه علیت که با حدود ۷۰ عنصر سیستم ارائه شده است، تا حد زیادی کفایت فرآیند مدل‌سازی را در محدوده داده‌ها و اطلاعات موجود بیان می‌کند.



شکل۱- نمودار حلقه علیت با حلقه‌های علت و معلولی و بازخورد اجزای مختلف **سیستم آبزی‌پروری چرخشی**

حلقه‌های بازخوران مرکز آبزی‌پروری

حلقه تعادلی B1

رابطه بین زیست توده، وزن ماهی و چگونگی تأثیر آنها بر نرخ جریان گردشی است. با افزایش زیست توده، نرخ جریان جرمی گردشی افزایش می‌یابد. با افزایش وزن ماهی و تغذیه ماهی، زیست توده نیز افزایش می‌یابد. وزن ماهی نیز با افزایش نرخ رشد ماهی و افزایش نرخ تغذیه، افزایش می‌یابد. ماهی به وزن خاصی می‌رسد که در آن نرخ رشد اشباع شده و نرخ تغذیه و زیست توده کاهش می‌یابد.

حلقه تعادلی B2

نشان می‌دهد که چگونه رطوبت داخلی تأسیسات آبزی‌پروری بر میزان تبخیر آب مخزن تأثیر می‌گذارد. دینامیک میزان تبخیر تابعی از اختلاف چگالی بین مخلوط بخار در سطح آب مخزن و محیط و همچنین ضریب انتقال جرم است. هرچه رطوبت بیشتر باشد، رطوبت بیشتری در هوا وجود دارد. چگالی بخار شیب کمی دارد و میزان تبخیر کاهش می‌یابد. با کاهش نرخ تبخیر، رطوبت برای هر ساعت از زمان تهویه فضا نیز کاهش می‌یابد. نرخ تبخیر، میزان اتلاف گرما به محیط را تعیین می‌کند که به بار سرمایشی کمک می‌کند. در نهایت، این مؤلفه بر کل مصرف انرژی سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

حلقه تعادلی B3

رطوبت داخل، تحت تأثیر رطوبت بیرون قرار می‌گیرد. اگر رطوبت بیرون زیاد باشد، رطوبت بیشتری از طریق سیستم تهویه وارد سیستم می‌شود. سپس میزان آب داخل هوا افزایش می‌یابد. بنابراین، گرادیان رطوبت افزایش می‌یابد و باعث می‌شود آب بیشتری به دلیل رطوبت‌زدایی روی کویل‌های خنک‌کننده از هوا خارج شود. اگر نرخ میعان افزایش یابد، سطح رطوبت به دلیل رطوبت‌زدایی کاهش می‌یابد. دینامیک سیستم توسط فرآیندهای روان‌سنجی هدایت می‌شود.

این سیستم برای حفظ شرایط مطلوب، انرژی مصرف می‌کند. با فرض اینکه سوخت‌های فسیلی منبع اصلی تولید برق هستند، این امر منجر به افزایش ذرات دوده به دلیل فرآیند سوختن خواهد شد. ذرات دوده می‌توانند تابش خورشیدی ورودی را جذب کرده و از رسیدن تابش به سطح تأسیسات آبزی‌پروری جلوگیری کنند. تابش خورشیدی کمتر در هر متر مربع، بار حرارتی تأسیسات را کاهش می‌دهد.

حلقه تعادلی B4

برای تجزیه و تحلیل اثرات وابستگی به سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی است. هرچه مصرف سوخت فسیلی بیشتر باشد، تولید ذرات دوده بیشتر خواهد شد که بر نرخ انرژی تابشی ورودی اثر معکوس دارد و باعث کاهش تبخیر و حرارت سیستم شده درنتیجه سیستم کاهش مصرف انرژی خواهد داشت تا به تعادل برسد.

حلقه تقویتی R1

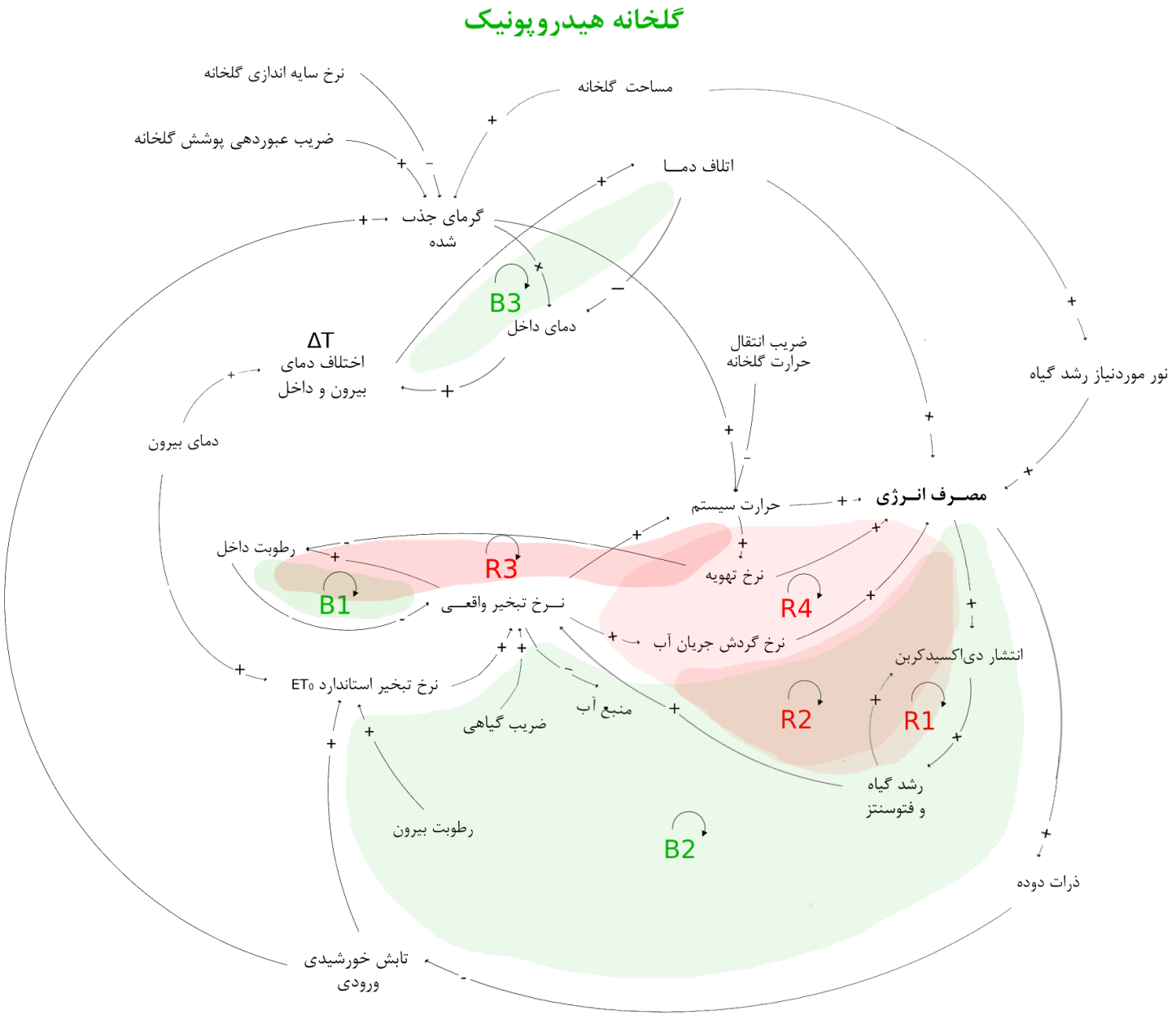
نشان می‌دهد که سوزاندن سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش انتشار CO_2 خواهد شد. با گذشت زمان، این امر می‌تواند به دلیل تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی، بر دمای یک منطقه تأثیر بگذارد. با افزایش دمای هوای بیرون، گرمای سیستم خارجی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. اختلاف دما بین داخل و خارج عامل اصلی در مصرف کل انرژی سیستم است. دلتا T به عنوان اختلاف بین دمای داخل و خارج تعریف می‌شود. دلتا T بالا تأثیر قابل توجهی بر مصرف کل انرژی سیستم، به ویژه انرژی مصرف شده توسط سیستم HVAC خواهد داشت. به طور مشابه، گرمای تهویه نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت زیرا همانطور که در حلقه تقویتی R2 نشان داده شده است، اختلاف دما در معادلات حاکم وجود دارد.

حلقه تقویتی R3

نشان می‌دهد که چگونه دمای نقطه تنظیم شده توسط گرادیان دمایی ناشی از شار حرارتی سیستم کنترل می‌شود. سیستم با تنظیم دمای فعلی هوای ورودی، برای حفظ نقطه تنظیم مورد نظر واکنش نشان می‌دهد.

حلقه تقویتی R4

آخرین حلقه تقویتی در تأسیسات آبزی‌پروری، نشان می‌دهد که با تغییر دمای نقطه تنظیم شده، گرادیان دما تحت تأثیر قرار می‌گیرد و باعث واکنش گرمای داخلی و تلفات حرارتی مخزن می‌شود.



شکل ۲- نمودار حلقه علیت که حلقه‌های علت و معلولی و بازخورد اجزای مختلف **سیستم گلخانه هیدروپونیک** را نشان می‌دهد.

حلقه‌های بازخوران گلخانه هیدروپونیک

حلقه تعادلی B1 – رطوبت داخل

رطوبت داخل گلخانه و **نرخ تبخیر واقعی** یک رابطه علت و معلولی متعادل دارند. وقتی رطوبت داخلی افزایش می‌یابد، هوا از رطوبت اشباع شده و گرادیان چگالی بخار کمتر می‌شود. گرادیان چگالی کمتر باعث کاهش نرخ تبخیر و تعرق می‌شود که به نوبه خود رطوبت را در یک دوره زمانی کاهش می‌دهد. تبخیر و تعرق تحت تأثیر نرخ تبخیر و تعرق مرجع قرار دارد که یک اصطلاح پیچیده است و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. رطوبت بیرون که با زمان متغیر است و بر نرخ تبخیر مرجع تأثیر می‌گذارد، با سیستم مرتبط است. در نهایت، سیستم تحت تأثیر یک جزء انرژی نهفته قرار دارد و انرژی نهفته توسط نرخ تبخیر هدایت می‌شود.

حلقه تعادلی B2 – ذرات دوده

ذرات دوده بر **تابش خورشیدی ورودی** تاثیر معکوس می گذارد. هرچه تابش خورشیدی بیشتر باشد **نرخ تبخیر استاندارد** که تابع شرایط بیرونی است بیشتر شده و در نتیجه **نرخ تبخیر واقعی** افزایش پیدا می کند بنابراین پمپ آب باید با قدرت بیشتری کار کند تا **نرخ گردش جریان آب** را بالا ببرد و آب از دست رفته ناشی از تبخیر را جبران کند که این خود باعث افزایش **مصرف انرژی** و افزایش **ذرات دوده** در داخل گلخانه می شود که **نرخ تابش خورشیدی ورودی** را کاهش می دهد تا به تعادل برسد.

حلقه تعادلی B3 – تابش خورشیدی

اگر شدت **تابش خورشیدی ورودی** (W/m^2) و در نتیجه **گرمای جذب شده** (W) گلخانه افزایش پیدا کند، **دمای داخل** افزایش خواهد یافت که این باعث افزایش **اختلاف دمای بیرون و داخل** می شود. اختلاف دما با بیرون باعث ایجاد جریان حرارت همرفتی و **اتلاف دما** می شود تا **دمای داخل** کاهش پیدا کند و سیستم به تعادل دمایی برسد.

حلقه‌های تقویتی R1, R2 - انتشار دی اکسید کربن

اثرات **انتشار دی اکسید کربن** در طول سوختن سوخت‌های فسیلی بر تعادل انرژی گلخانه‌ای تأثیر خواهد گذاشت. افزایش انتشار دی‌اکسید کربن باعث **افزایش رشد گیاه و فتوسنتز** می شود که این خود باعث افزایش دی اکسید کربن ناشی از رشد گیاه و نیاز آن می شود (R1) از طرفی **رشد گیاه باعث افزایش نرخ تعریق و تبخیر** می شود که به نوبه خود بر **نرخ گردش جریان آب** و **مصرف انرژی** توسط سوخت فسیلی و افزایش **انتشار دی اکسید کربن** در فضای داخلی می شود. (R2)

حلقه تقویتی R3 – تبخیر و تعرق

نرخ تبخیر واقعی بر **حرارت سیستم** تاثیر می گذارد که آن هم **روی نرخ تهویه** اثر گذار خواهد بود. نرخ تهویه اثر معکوس روی میزان **رطوبت داخل** دارد و میزان رطوبت داخلی روی **نرخ تبخیر واقعی** گیاه اثر معکوس دارد. و در نهایت تبخیر اثر تقویتی در حلقه بازخوران دارد.

حلقه تقویتی R4 – حرارت سیستم

حرارت سیستم باعث افزایش **مصرف انرژی** و **انتشار گاز دی‌اکسید کربن** می شود که روی **رشد گیاه** و **نرخ تبخیر و تعرق** تاثیر می گذارد و آنهم در آخر روی **حرارت سیستم** اثر تقویتی خواهد داشت.

نتایج

نتایج نشان داد که کنترل محیطی، پرمصرف‌ترین جزء انرژی در سیستم آکواپونیک است. بین ۹۸ تا ۹۹ درصد از کل انرژی سیستم برای حفظ شرایط داخلی مطلوب است. کنترل محیطی به شدت تحت تأثیر شرایط آب و هوایی خارجی قرار دارد، زیرا دمای هوای خارجی، رطوبت و تابش خورشیدی ورودی یک منطقه، میزان انرژی مورد نیاز برای گرم کردن یا خنک کردن سیستم آکواپونیک را برای حفظ شرایط مطلوب تعیین می‌کند. نتایج نشان داد که در نهایت، سهم غالب انرژی (نیاز به گرمایش یا سرمایش) پاسخ کلی سیستم را تعیین می‌کند.

مشاهده شد که مناطقی که هوای سرد را تجربه می‌کنند، مانند آمریکای شمالی، اروپا و بخش‌هایی از آفریقای جنوبی، به دلیل نیاز به گرمایش، تقاضای انرژی به طور قابل توجهی در طول سال بالاتر داشتند. انرژی مورد نیاز برای گرمایش در این مناطق از انرژی مورد نیاز برای سرمایش بیشتر بود. مناطق سردسیر در مقایسه با بهترین منطقه، در طول سال به ۲۰٪ یا بیشتر انرژی نیاز داشتند. این مناطق سردسیر اغلب دمای زیر صفر را تجربه می‌کردند. این امر باعث از دست رفتن سریع گرما به دلیل اختلاف دمای بالا می‌شد که منجر به تقاضای بالای انرژی می‌شد.

نتایج نشان داد مناطقی که دمای بالا و رطوبت بالا را برای مدت طولانی در طول سال تجربه کرده‌اند، بهترین عملکرد انرژی را داشته‌اند. کشورهای نزدیک به خط استوا مانند مالزی، برزیل و نیجریه در طول سال تفاوت کمی در دما و رطوبت تجربه کردند. دما و رطوبت بالای ثابت باعث شد که تقاضای انرژی در طول سال یکنواخت‌تر باشد. برای این مناطق حداقل گرمایش مورد نیاز بود و سرمایش عامل اصلی انرژی بود. می‌توان نتیجه گرفت که مناطقی که آب و هوای گرمسیری دارند، از نظر مصرف انرژی برای سیستم‌های آکواپونیک مناسب‌ترین هستند. دوربان گرمسیری‌ترین منطقه‌ای است که برای مقایسه محلی در نظر گرفته شده است. از این رو، این نتیجه‌گیری با این واقعیت که دوربان بهترین منطقه در آفریقای جنوبی بود، تأیید می‌شود.

مدل‌سازی دینامیک سیستم و روش‌شناسی تفکر سیستمی برای نمایش یک سیستم آکواپونیک مجزای عمومی به کار گرفته شد. این روش به بررسی جامع سیستم از نظر مصرف انرژی و آب در یک سیستم پیچیده که در آن متغیرهای زیادی وجود دارد که منجر به پیچیدگی سیستم می‌شود، کمک کرد. این مدل‌ها بینش‌های ارزشمندی در مورد اثرات شرایط آب و هوایی محلی بر یک سیستم آکواپونیک

مجزای عمومی ارائه دادند. عوامل آب و هوایی محلی مانند دمای هوای محیط، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی ورودی نقش عمده‌ای در متغیرهای موجودی سیستم مانند مصرف انرژی و آب داشتند. این امر با این واقعیت نشان داده شد که کنترل محیطی، که به شدت تحت تأثیر شرایط خارجی قرار داشت، ۹۹ درصد از کل مصرف انرژی سیستم را تشکیل می‌داد.

به عنوان بخشی از محدودیت‌های ذاتی در اینجا، توصیه می‌شود داده‌های آب و هوایی بیشتری جمع‌آوری و برای افزایش دقت مدل‌های توسعه‌یافته استفاده شود. علاوه بر این، فراتر از استفاده از SD، می‌توان سایر استراتژی‌های بهبود انرژی را نیز در مدل گنجاند و اثرات این استراتژی‌ها را بررسی کرد. این استراتژی‌ها می‌توانند شامل گرمایش سیستم با استفاده از گرمای اتلافی فرآیند یا تکنیک‌های ذخیره‌سازی حرارتی و فناوری خنک‌کننده تبخیری باشند. می‌توان استراتژی‌های مختلف را برای تعیین بهترین راه‌حل‌ها مقایسه کرد. مدل دینامیک سیستم را می‌توان تغییر داد تا تمام تغییرات سیستم ناشی از تکنیک‌های بهبود انرژی را در نظر بگیرد. این می‌تواند یک عنصر تأخیر به سیستم اضافه کند و مشاهدات ارزشمندی حاصل شود.

این تحقیق در مورد موفقیت یک سیستم آکواپونیک در مقیاس تجاری بر اساس موقعیت مکانی اظهار نظر نمی‌کند، بلکه بررسی می‌کند که در کجا این سیستم با بیشترین راندمان کار خواهد کرد. نتایج، یک منطقه پیشنهادی را ارائه می‌دهد، اما بینشی در مورد میزان تغییرات منطقه‌ای ارائه نمی‌دهد. می‌توان این مکان را به یک مکان بهینه در منطقه دوربان محدود کرد. توصیه می‌شود که نتایج این تحقیق با استفاده از آزمایش‌هایی حداقل در عملیات در مقیاس کوچک آزمایش و تأیید شود. همچنین توصیه می‌شود که داده‌های آب و هوایی بیشتری که می‌توانند برای افزایش دقت مدل‌های تولید شده استفاده شوند، جمع‌آوری شود. با داده‌های بیشتر به دست آمده از ایستگاه‌های آب و هوایی مختلف، می‌توان خطای تخمین را کاهش داد و نتایج قابل اعتمادتر خواهند بود. در حال حاضر، کمبود داده‌های قابل اعتماد در آفریقای جنوبی وجود دارد که می‌تواند تأثیر منفی بر نتایج داشته باشد. بنابراین، جمع‌آوری داده‌های قابل اعتماد برای نتیجه‌گیری بهتر مهم است. به عنوان مثال، دوربان به عنوان مناسب‌ترین منطقه از نظر انرژی و آب شناسایی شد. اگرچه این منطقه به عنوان بهترین منطقه با عملکرد بالا شناخته شد، اما مناطق دیگر هنوز هم می‌توانند عملیات موفقیت‌آمیزی را ارائه دهند.

منابع

[1] S. Goddek, C.A. Espinal, B. Delaide, M.H. Jijakli, Z. Schmautz, S. Wuertz, K.J. Keesman, Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach, Water 8 (7) (2016) 303.

[2] S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, M. Dos-Santos, Aquaponics and global food challenges, in: Aquaponics Food Production Systems, Springer, Cham, 2019, pp. 3–17.

[3] A. Alkhalidi, M.K. Khawaja, D. Abusubaih, Energy efficient cooling and heating of aquaponics facilities based on regional climate, Int. J. Low Carbon Technol. 15 (2020) 287–298.

[4] N. Mchunu, G. Lagerwall, A. Senzanje, Aquaponics in South Africa: results of a national survey, Aquaculture Reports 12 (2018) 12–19.

[5] B.K. Bala, F.M. Arshad, K.M. Noh, System dynamics modelling and simulation, in: Chapter 9: Modelling of Hilsa Fish (Tenualosa Ilisha) Population in Bangladesh, Springer, Singapore, 2017, pp. 179–189.

[6] A. Davison, Recirculating Aquaculture Systems A Guide to Farm Design & Operations, Farmfish LLC, Seattle WA, 2018.

[7] G. Chakona, C. Shackleton, Food insecurity in South Africa: to what extent can social grants and consumption of wild foods eradicate hunger? World Developement Perspectives 13 (2019) 87–94.

[8] FAO,F.a.,TheStateofFoodInsecurityintheWorld-AddressingFoodInsecurityin Protracted Crises. Rome, 2010.

[9] P. Andersen, R. Lorch, Food security and sustainable use of natural resources: a 2020 vision, Ecol. Econ. (1998) 1–10.

[10] Statisics South Africa, Poverty trends in South Africa, An examination of absolute poverty between 2006 and 2015, Pretoria: Statisics South Africa 2017 Report No. 03-10-06 (2017) 1–141.

[11] J. Battersby, Urban food insecurity in Cape Town, South Africa: an alternative apprach to food access, Development South Africa (2011) 545–561.

[12] N. Mchunu, G. Lagerwall, A. Senzanje, Food sovereignty for food security, aquaponics system as a potential method: a review, J. Aquacult. Res. Dev. 8 (2017) 1–9.

[13] A.-F.M. El-Sayed, M. Kawanna, Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) fry reared in a recycling system, Aquac. Res. (2008) 670–672.

[14] G.C. Veras, L.D.S. Murgas, P.V. Rosa, M.G. Zangeronimo, M.S.D.S. Ferreira, J.A.S. D. Leon, Effect of photoperiod on locomotor activity, growth, feed efficiency and gonadal development of Nile tilapia, Rev. Bras. Zootec. 42 (2013) 844–849. A.-F.M. El

[15] Sayed, On-farm feed management practices for Nile tilapia (Oreochromis niloticus) in Egypt, FAO Fisheries and Aquaculture 583 (2013) 101–129.

[16] J. Walker, Predicting temperatures in ventilated greenhouses, Transactions of the ASAE 8 (3) (1965) 445–448.

[17] M. Kindelan, Dynamic modeling of greenhouse environment, Transactions of the ASABE 23 (1980) 1232–1239.

[18] S.B. Idso, A set of equations for full spectrum and 8-to 14-µm and 10.5-to 12.5-µm thermal radiation from cloudless skies, Water Resour. Res. 17 (2) (1981) 295–304.

[19] Y. Cengel, A. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, fourth ed., McGraw-Hill Professional, New York City, 2014.

[20] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, M. Smith, Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

[21] B. Bala, F. Arshad, K. Noh, System Dynamics Modelling and Simulations, Springer, Singapore, 2017.

[22] J. Bremner, Population and Food Security: Africa's Challenge, Population Reference Bureau Policy Brief, 2012.

[23] S. Goddek, O. Ko¨rner, A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments, Agric. Syst. 171 (2019) 143–154.

[24] M.H. Jijakli, B. Delaide, J. Gott, Plant Production Capacity and Nutrient Mass Balance in the PAFF Box, an Urban Aquaponics Module: Preliminary Findings, Geography and Environment University of Southampton, Southampton, UK, 2016.

[25] D. Karimanzira, K.J. Keesman, W. Kloas, D. Baganz, T. Rauschenbach, Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system, Aquac. Eng. 75 (2016) 29–45.