

Review

Permaculture—Scientific Evidence of Principles for the Agroecological Design of Farming Systems

Julius Krebs ^{1,*}  and Sonja Bach ²

¹ Institute for Environmental Science, University of Koblenz-Landau, 76829 Landau, Germany

² Landscape Ecology and Environmental Systems Analysis, Institute of Geoecology, Technical University Braunschweig, 38106 Braunschweig, Germany; sonja.lepper@tu-braunschweig.de

* Correspondence: krebsjulius@uni-landau.de; Tel.: +49-176-2332-1279

Received: 30 June 2018; Accepted: 6 September 2018; Published: 8 September 2018



Abstract: Modern industrial agriculture is largely responsible for environmental problems, such as biodiversity loss, soil degradation, and alteration of biogeochemical cycles or greenhouse gas emission. Agroecology, as a scientific discipline as well as an agricultural practice and movement, emerged as a response to these problems, with the goal to create a more sustainable agriculture. Another response was the emergence of permaculture, a design system based on design principles, as well as a framework for the methods of ecosystem mimicry and complex system optimization. Its emphasis, being on a conscious design of agroecosystems, is the major difference to other alternative agricultural approaches. Agroecology has been a scientific discipline for a few decades already, but only recently have design principles for the reorganization of farming systems been formulated, whereas permaculture practitioners have long been using design principles without them ever being scrutinized. Here, we review the scientific literature to evaluate the scientific basis for the design principles proposed by permaculture co-originator, David Holmgren. Scientific evidence for all twelve principles will be presented. Even though permaculture principles describing the structure of favorable agroecosystems were quite similar to the agroecological approach, permaculture in addition provides principles to guide the design, implementation, and maintenance of resilient agroecological systems.

Keywords: agriculture; agroecology; permaculture; design principles

1. Introduction

In the late 19th century, it became clear that a more efficient agricultural system was needed to feed the people, especially in the Global South [1]. During the 1960s, the green revolution, with the invention of high-yield varieties, synthetic pesticides, and fertilizers, as well as modern machinery, seemed to be the solution to hunger and the prevention of conflicts over nutritional resources [2]. With an increasing yield per unit of land, a decreasing work load, and improved food safety, these technical solutions provided an obvious improvement. However, unfortunately, these advantages came along with an unforeseen price [3–6]. Many of the environmental problems confronting humanity today are related to the modern, industrial agriculture, which is based on the large-scale cultivation of monocultures using heavy machinery, and a large amount of agricultural chemicals, such as synthetic fertilizers and pesticides [7–11]. Also, the ongoing land use change is pushing the earth's ecosystems to the limits of their capacity [6]. Agriculture has a particularly strong impact on (a) biodiversity, (b) soil organic matter, (c) water reservoirs, (d) greenhouse gases, (e) the nitrogen cycle, and (f) the phosphorus cycle:

1.1. Biodiversity Loss

The drastic loss of biodiversity in recent decades is largely due to the intensification and expansion of agriculture [4,8,12–15]. The conversion of natural lands into agricultural uses is especially a serious threat to numerous plant and animal communities (and the ecosystem services they inhabit) [16]. The structural changes connected to the intensification of agriculture lead to a simplification of landscapes, which can thus host fewer species. Most concerning is the considerable loss of diversity in potential habitat colonists. This means that habitats in complex landscapes can be recolonised through a greater diversity of species [17]. The loss of biodiversity poses a risk to human well-being because it is linked to a number of essential ecosystem services, such as natural pest control, pollination, and nutrient cycling [18]. Likewise, all these factors affect agricultural production. These ecosystem services are lost as the agricultural landscape is cleared out [19,20]. However, not only does land use change threaten biodiversity, in addition, the intensive use of pesticides also threatens beneficial insects and thus the food source for predators at higher levels of the food web [15]. This cascade effect also threatens non-target organisms through the use of pesticides [21] and reduces the number of beneficial pollinators [22].

1.2. Loss of Soil Organic Matter

The type and intensity of cultivation has a major impact on the significant loss of soil organic matter through agricultural use [8]. A high proportion of soil organic matter is one of the most important indicators of soil fertility [23] and leads to higher agricultural yields [24,25]. In modern agriculture, much of the soil organic matter is lost, partly through erosion [26,27] and partly through the extraction of organic matter through harvesting crops or soil disturbances due to cultivation [28–30]. High yields can only be maintained through the input of synthetic fertilizers [31].

1.3. Water Usage

In dry climates, high agricultural yields can be considerably attributed to the large-scale irrigation of soils, leading to a virtual water trade between countries when agricultural goods are exchanged [32]. Some new crop varieties even mandate higher water requirements [8,33]. In many regions, this excessive irrigation leads to salinization [34] and to a serious reduction of existing water reservoirs [35]. This development poses considerable risks, especially in the context of climate change [36].

1.4. Greenhouse Gas Emission

Agriculture is currently responsible for about a quarter of net greenhouse gas emissions and thus significantly contributes to climate change [37]. This is due to the use and production of synthetic fertilizers, the use of fossil fuel-intensive machinery, soil degradation, and livestock [33,38]. There are strong indications that climate change in turn has a negative impact on agricultural yields [26], which are predicted to increase in the future [39].

1.5. Nitrogen Cycle

The extraction of nitrogen from the air using the Haber-Bosch process has made the production of large quantities of synthetic fertilizers possible [1]. The effects of this intervention are becoming increasingly visible. Up to half of the amount of nitrogen introduced into the environment is lost in the form of NO_x and in turn contributes to climate change [40]. Apart from that, excess nitrogen is also released into watersheds and coastal waters [41] or is lost through surface runoff and soil erosion [42]. In many cases, both processes lead to the eutrophication of adjacent waters [43,44] and the excessive contamination of drinking water with nitrates, posing significant health risks [45,46].

1.6. Phosphorus

Not only is the mining and usage of phosphorous as fertilizer altering the earth's phosphorous cycle, but also the transportation of other agricultural products, like animal feed and crops, contributes to the rising net phosphorous storage in terrestrial and freshwater ecosystems. A study estimates the bioavailable phosphorous stock to be at least 75% greater than preindustrial levels of storage [9]. Similarly to nitrogen, excess phosphorous is transported into terrestrial waterflows and, ultimately, to coastal waters by surface runoff and nutrient leakage [47]. The enrichment of estuaries and coastal waters with phosphorus leads to an increase in toxic cyanobacterial blooms [48]. At the same time, phosphate is a limiting plant nutrient, and, in the form of phosphate rock, a non-renewable resource [49]. Its mining capabilities are supposed to peak in 2030, with mining prices increasing and phosphate quality decreasing already. In addition, toxic by-products, like phosphogypsum, are produced during processing and the phosphates are contaminated with radioactive elements that enter the soil when used as fertilizer. For example, the use of phosphorous fertilizer not only changes the global phosphorous balance, but also contributes to chemical pollution of the soil and the growing of toxic phosphogypsum stockpiles, which pose the risk of leakage into groundwaters [50].

All these factors carry the risk of destroying vital functions of the Earth's ecosystems and threatening our human food supply. Therefore, agricultural systems need to be redesigned. As an alternative for the design of land use systems, agroecology is often discussed in science and many of its methods are studied in detail. In contrast, permaculture, as another approach that promises sustainable solutions for the human supply of goods and resources, is only marginally represented in the scientific literature [51]. The first aim of this review is to analyse to which degree permaculture is based on scientific evidence. On this basis, we secondly aim to identify similarities and differences to agroecological principles.

Within agroecology, the application of principles as a framework for the redesign of agriculture has emerged in recent years. The originators of permaculture have already formulated such principles in the 1980s. They were continuously ameliorated and then applied in the design of land use systems. Although the principles as a whole have not yet been scrutinized, many studies allow the validation of each individual principle against a scientific background. It is shown that despite the lack of representation of permaculture in science, there is some evidence that permaculture has the potential to contribute to the sustainable transformation of agriculture.

2. Agroecology

The term, agroecology, first emerged in modern science when concepts of ecology found their way into agronomy [52,53]. For about three decades, agroecology was almost uniformly used to describe the ecology of agricultural systems with respect to soil science, plant science, insect ecology, and their interactions [54–58]. In the second half of the last century, agroecology developed in parallel with the emergence of organic farming [59]. Some people used the term to promote a paradigm shift from industrial agriculture, driven by the Green Revolution, towards sustainable agriculture based on ecological principles [60–62]. At the same time, other authors kept the original interpretation [63]. Today, agroecology is widely recognised as a scientific discipline, investigating ecological principles, functions, and processes in agricultural systems to create sustainable agricultural systems [64]. With the application of scientific results to agricultural practices, agroecology has also developed into a generic term for the application of specific agricultural techniques that no longer focus solely on production, but on the preservation of the ecosystem [65]. In this context, agroecology became a practical tool for farmers. Since agroecology is mostly practiced by peasant farmers around the world, it has increasingly emerged as a social movement that is working for a more ecologically and socially balanced food system, especially in the countries of the global South [66]. This includes not just food production, but also processing, distribution, and waste management [67], as well as a policy framework for integrating social processes and participation [68]. These aspects support agroecology as a social

movement, but have only received recognition when the problems related to modern agriculture became clear, promoting the need for new agricultural practices [64].

The latest interpretations of agroecology recognise all different aspects and describe agroecology as a science discipline and practical application as well as a movement [69,70]. For a detailed description of the history of agroecology see [69,71].

Given the use in a variety of contexts, the multiple meanings of agroecology should be acknowledged. However, the commonality of all definitions lies in an emphasis on an agricultural system that complies with ecological, social, and economic sustainability. On the ecological level, it is about agricultural low input practices that support nature's production, regeneration, and regulatory functions instead of continually maintaining systems optimized for machine use through large amounts of external energy input. The striving for social justice, participation, and autonomy, especially among peasant farmers and the growing community of female peasant farmers, is widely associated with agroecology. In addition, there is a strong engagement for economic independence of peasant farmers in the agroecology community. Agricultural corporations especially foster the threat of economic dependence, while agroecological practitioners try to overcome economic growth logic and money as being the guiding maxim for action. It is replaced by social justice and ecological sustainability.

Agroecology Principles

Today agroecology is still a niche phenomenon, at least in industrialised countries. Even if a transition towards sustainable agriculture is urgently needed, path dependencies and missing or slow policy measures hinder its implementation. However, even if these social challenges can be overcome, the conversion of agriculture from a high input monoculture management system to a diversified system with low external inputs [72] requires a comprehensive framework [73]. Gliessmann describes the necessity to use ecosystem processes and functions as guidelines for the redesign of agricultural systems since a mere substitution of external inputs with biological means and increasing efficiency are not sufficient to attain sustainability [71]. Reijntjes et al. have suggested the use of the following set of ecological principles [74]:

1. Enhance recycling of biomass and optimizing nutrient availability and balancing nutrient flow;
2. securing favorable soil conditions for plant growth, particularly by managing organic matter and enhancing soil biotic activity;
3. minimizing losses due to flows of solar radiation, air, and water by way of microclimate management, water harvesting, and soil management through increased soil cover;
4. species and genetic diversification of the agroecosystem in time and space; and
5. enhance beneficial biological interactions and synergisms among agrobiodiversity components, thus resulting in the promotion of key ecological processes and services.

For Altieri and Nicholls, these principles result in certain agroecological techniques, such as polycultures, crop rotation, agroforestry, cover crops, and animal integration [75]. In addition, according to Vandermeer [76] and Pretty [77], sustainability needs to address farming systems beyond the mere form of cultivation by:

- Optimizing the use of locally available resources by combining the different components of the farm system [...];
- reducing the use of off-farm, external, and non-renewable inputs with the greatest potential to damage the environment or harm the health of farmers and consumers [...];
- relying mainly on resources within the agroecosystem by replacing external inputs with nutrient cycling, better conservation, and an expanded use of local resources;
- working to value and conserve biological diversity, both in the wild and in domesticated landscapes, and making optimal use of the biological and genetic potential of plant and animal species;

- improving the match between cropping patterns and the productive potential and environmental constraints [...]; and
- taking full advantage of local knowledge and practices, including innovative approaches not yet fully understood by scientists although widely adopted by farmers.

With regard to the conservation of biodiversity in productive landscapes, Fischer et al. proposed pattern- and process-oriented strategies for the design and management of agricultural landscapes [78]. For integrated crop-livestock systems, Bonaudo et al. proposed design principles to improve the resilience, self-sufficiency, productivity, and efficiency of the production system [79].

It is important to bear in mind that all these sets of principles are not meant to provide a technical solution that is bound to work in any given place at any time, but are ideas on how to promote key functions of sustainable agroecosystems when applied to a particular region. The practical methods derived from the application of these principles differ and will be specific for the given situation. In addition to guidelines for the design of cropping systems, Malézieux presents a three-step framework for action to guide the incorporation of new farming practices [80]:

Step 1: Observation of the naturally occurring ecosystem;

Step 2: Development and testing of new techniques in experiments; and

Step 3: Implementation of the new techniques by farmers.

3. Permaculture

The concept of permaculture arose from the combination of the words “permanent” and “agriculture”, and describes a design system as well as a best practices framework for the creation and management of sustainable and resilient agroecosystems. The co-founder, David Holmgren, defines permaculture as ‘consciously designed landscapes, which mimic the patterns and relationships found in nature, while yielding an abundance of food, fibre, and energy for provision of local needs’ [81]. Despite permaculture starting as a method of sustainable agriculture, it has evolved to become a holistic design process for complex (eco-)systems and is today also utilized to design social systems.

Permaculture claims to be a concept for the design of sustainable socio-ecological land use systems, recognizing that land use systems are never separated from social systems. For this reason, three basic ethical norms have been formulated, which have to be considered in the design and management of permaculture systems: (1) Care for the earth; (2) care for the people; and (3) set limits to consumption and reproduction, and redistribute surplus (see [81] for further reading).

The most important aspects of permaculture for the planning of agroecosystems are (i) site characteristics; (ii) the interaction between individual elements on several levels, from mixed cultures at the field level to the diversity of land use at the level of the agro-ecosystem; and (iii) the spatial arrangement of the elements as decisive drivers for multiple functions [51,81–83]. This strengthens the natural processes and functions of the landscape [82]. The diversity of land use is described in permaculture as a close integration of terrestrial and aquatic systems, animal husbandry, and field crops in the form of annual and perennial plants [82,84]. Almost none of the methods used in permaculture have been invented by this movement itself. Rather, permaculture can be regarded as a conceptual framework for the evaluation and adoption of existing methods. Therefore, two main criteria are used [51]. Firstly, the imitation of natural ecosystems, which serve as a model for systems with an analogous structure and function, but are endowed with species that generate a yield for mankind [85,86]. Secondly, the optimization of the system in a sense that starting points are sought where the performance of the desired products can be achieved with minimal effort, and functions can be improved beyond the extent of natural ecosystems. This results in a focus on mixed crops and perennial plant species in permaculture systems [81,82,87], which is also increasingly discussed in the scientific literature [88–90].

A distinct element is the permaculture design process [82,91]. It covers the entire process of project development from the first observation to implementation. In an analysis phase, site-specific methods

are selected. A permaculture design process is a non-linear process, and the applied observation, analysis, and design methods should prevent typical mistakes when dealing with complex systems [92]. According to Ferguson and Lovell, this design system mainly consists of the permaculture principles and spatial strategies [51].

Permaculture has become an international movement of great public interest [51]. However, there is only minimal coverage of permaculture in the scientific literature. Permaculture practitioners argue that scientists and institutions do not appreciate the radical proposals put forth by permaculture, while, on the other hand, the credibility of permaculture practitioners is lost due to the idiosyncratic use of scientific terms, or the spreading of scientifically unproven claims [50,51].

3.1. Permaculture Principles

Permaculture tries to create resilient living systems that are inspired by processes, structures, and patterns observed in nature. Design principles have emerged that are used as a framework for the design of complex agroecosystems. Some permaculture designers have developed their own sets of principles, depending on the focus of their work [93,94]. The most commonly used set of permaculture principles was developed by co-ordinator, David Holmgren [81]. These twelve principles are presented as the result of an ‘in-depth analysis of the natural environment and pre-industrial and sustainable societies, the application of ecosystem theory, and design thinking’. They claim to provide a framework for the design of sustainable land use and a society within ecological boundaries [81].

The principles are short statements that point the way when dealing with complex systems and give a variety of options for action. The first six principles use a bottom-up approach, while the final six principles can be seen from a top-down designer’s perspective. Also, because of this, some overlaps between the principles occur. Trying to *produce no waste* and *applying self-regulation* will lead to *integration rather than segregation* of elements, or *observing and interacting* empowers to be able to *creatively respond to change* [81]. In the design process, it is important not to focus on one or few principles, but to use the set as a whole and create a balance within the system.

Although Ferguson and Lovell have recognised the isolation of permaculture from science [50], we hypothesize that there is strong scientific evidence for the individual principles, underlining their applicability in the redesign of agricultural systems towards sustainability. In the following section, we will scrutinise all twelve principles through the review of scientific studies to illustrate the existence of scientific evidence confirming those principles. In the case where the amount of relevant scientific findings is too extensive, we only give some selected examples. Table 1 provides a summary of those twelve principles along with approach (bottom-up, top-down), relation (agroecosystem structure, design process, management) and examples with evidence mentioned in the following sections.

Table 1. Summary of the twelve permaculture principles proposed by permaculture co-ordinator, David Holmgren [81], with corresponding approach (bottom-up or top-down), relation (design process, management, agroecosystem structure), and examples with scientific evidence presented in this issue.

Principle	Approach	Relation	Examples with Evidence
I. Observe and Interact	bottom-up	Design process, management	Adaptive management
II. Catch and Store Energy	bottom-up	Agroecosystem structure	Organic mulch application Rainwater harvesting measures Woody elements in agriculture
III. Obtain a Yield	bottom-up	Design process, management	Emergy evaluation Ecosystem services concept
IV. Apply Self-Regulation and Accept Feedback	bottom-up	Agroecosystem structure	Enhancement of regulating ecosystem services Natural habitats in agricultural landscapes Wildflower strips
V. Use and Value Renewable Resources and Services	bottom-up	Agroecosystem structure	Legumes and animal manure as nutrient source Mycorrhizal fungi

Table 1. Cont.

Principle	Approach	Relation	Examples with Evidence
VI. Produce no Waste	bottom-up	Agroecosystem structure	Animal manure Human excreta Waste products as animal feed
VII. Design from Patterns to Details	top-down	Agroecosystem structure, Design process	Natural ecosystem mimicry Use of grazing animals in cold and dry climates Structurally complex agroforests in tropical climates
VIII. Integrate Rather than Segregate	top-down	Agroecosystem structure	Integration of livestock in corn cropping Cereals and canola used for forage and grain harvest Integration of fish in rice cropping Polyculture (crops)
IX. Use Small and Slow Solutions	top-down	Agroecosystem structure	Inverse productivity-size relationship Agroforestry systems
X. Use and Value Diversity	top-down	Agroecosystem structure	Plant species diversity Pollinator diversity Habitat diversity Diversified farming systems
XI. Use Edges and Value the Marginal	top-down	Agroecosystem structure	High field border density Field margins Edges with forests
XII. Creatively Use and Respond to Change	top-down	Design process, management	Decision-making under uncertainty Increase ecological resilience Directed natural succession

3.1.1. Permaculture Principle I: Observe and Interact

This principle stands for the method of alternating observation and interaction with a certain system to generate knowledge and experience about it [81]. The scientific management approach related to this principle is called adaptive management, which is a systematic approach for improving resource management by learning from management outcomes [95]. Therefore, multiple management options to reach specific management goals are implemented. The monitoring of system responses to management options gives decision guidance to adjust management practice [96]. Adaptive management was, for instance, successfully used to investigate and improve the effectiveness of agro-environmental schemes in protecting the corn bunting, *Emberiza calandra*, in the UK [97].

Simulation results show that an adaptive management approach yields the best trade-off between agricultural production and environmental services in the case of severe drought in vineyards [98]. However, this approach, with its emphasis on feedback-learning to face the unpredictability and uncertainty that is intrinsic to all ecosystems, is not new. In some traditional management systems, the direction of resource management is guided by the use of local ecological knowledge to interpret and respond to feedback from the environment [99]. While there are still barriers, like maintaining long-term monitoring, to establish adaptive management, the great potential to improve our understanding of important ecological processes necessary for effectively managing biological systems is already visible [96]. Investigations of grazing systems also indicate that the lack of adaptive management in scientific experiments explains why those trials were not able to reproduce the positive effects reported by experienced practitioners [100]. However, a useful addition to this principle, only consisting of observing and interacting, would be the documentation and publishing of observed results to guarantee that generated knowledge can be useful to others dealing with similar situations. The results of research carried out on adaptive management indicate that this approach has the potential to improve agricultural management, especially for ecological resilience. However, to prove the importance of this principle of observing and interacting, it is necessary to scientifically monitor and compare farms strictly sticking to this principle with farms that do not, with regard to ecological resilience as well as productivity.

3.1.2. Permaculture Principle II: Catch and Store Energy

Different sources of energy are covered by this principle: E.g., solar energy, water, wind, living biomass, and waste. According to this principle, energy shall be held within the system as long as possible. This is necessary to be able to use it as long and effectively as possible and to maintain their functions, such as buffering extreme events. The most important storages of future value are fertile soil with high humus content, perennial agroecosystems (especially trees), and water storages, such as groundwater and water bodies [81].

One method to catch and store energy in the form of water, nutrients, and organic matter, while protecting the existing storage of fertile soil, is to apply organic mulch. The application of mulch greatly increases soil water storage efficiency, as well as the water use efficiency of crops, therefore, also increasing crop yields [101–103]. The application of mulch also leads to higher organic matter content in the soil and therefore enhances microbial biomass, soil microbial functional diversity, and nitrogen cycling [104]. Higher contents of soil organic matter lead to higher and more stable yields in agriculture [24,25]. One explanation is the higher capacity of organic matter rich soils to buffer drought stress [105]. Soil fertility is directly linked to soil organic matter. Experiments show that without maintaining natural nutrient cycling via litter decomposition, and without supplementary fertilization, agriculture is only economical for 65 years on temperate prairie, for six years in tropical semi-arid thorn forest, and for no more than three years in Amazonian rainforest [106]. At the same time, the application of mulch showed to be highly effective in preventing soil erosion achieved by reducing runoff and increasing infiltration [107–110]. The capture and storage of rainwater in the soil can be enhanced through rainwater harvesting (RWH) measures. These include linear contour structures, like bunds or grass strips, terracing, semi-circular bunds, and pitting [111]. This mainly helps to overcome drought events [112], leading to increased food security [113–115] and income for farmers [113,116–118]. However, RWH measures also enhance ecosystem services, such as groundwater recharge [119,120], nutrient cycling [121,122], and biodiversity [123,124].

The incorporation of woody elements, such as trees, shrubs, and hedges, into agriculture also represents an application of this principle, amongst others, through the storage of carbon. Different options of land stewardship have a high potential for climate change mitigation, out of which reforestation has the greatest overall potential, and the incorporation of trees in croplands has one of the highest potentials for agriculture and grasslands [125]. Apart from a highly needed climate change mitigation potential, those measures also provide benefits, such as habitats for biodiversity, enhanced soil and air quality, and improved water cycling [125].

3.1.3. Permaculture Principle III: Obtain a Yield

The (farming) systems designed and managed with permaculture have to obtain a sufficient yield, and to supply humans with food, energy, and resources. However, this principle also aims at the efficiency of production, as our “yield” is low if we have to put in a lot of effort, energy, and resources to obtain it. Apart from that, this principle also calls for a more holistic understanding of yield, not only an economic one, but also ecological and social yields [81].

Emergy analysis is a value-free environmental accounting method based on a holistic systems concept, which is suitable to measure the yield of agro-ecosystems in this sense of efficiency. Emergy is defined by Howard Odum as the available energy of one kind that has already been used to make a product or provide a service [126]. It is usually measured in solar emergy joules (sej), and allows the calculation of various indices. The emergy yield ratio (EYR) provides information on how much emergy output is generated by the system per input of the economy, while the renewability (REN) gives the share of emergy of an output that is provided by renewable natural resources or services [127]. Recent research shows that our modern food production systems are highly inefficient in terms of resource and energy consumption. Corn production in the USA had an EYR of only 1.07 with an REN of 5% [128], while the EYR of conventional pig production was even lower at 1.04 and an REN of 26% [129]. Numerous methods used in permaculture are derived from indigenous people, such as the

traditional Lacandon Maya agroecosystems in Mexico. These systems cycle through three stages of production, starting with field crops, progressing to shrubs and then to the trees, before returning to field crops. Therefore, they direct natural succession and are able to yield resources from a polyculture with as many as 60 plant species and without inputs of seeds, fertilizer, or pesticides [130,131]. For six of those systems analysed, the EYR ranged from 4.5 to 50.7 with an REN ranging from 0.72 to 0.97, indicating a high level of sustainability [131]. However, land productivity in terms of the calories of these systems is much lower compared to modern corn production [128]. As this principle also calls for obtaining a yield to feed the people, a combination of efficiency and sustainability, as well as land productivity, should be aspired to. However, this combination is probably the most difficult point in agroecological systems, at least when compared to modern, industrial agricultural production. At first sight, this looks like an approval of the 'land-sharing' approach. However, permaculture is a site-specific and context-based design system. Therefore, we would conclude that it depends on the context of the farm and/or region whether a 'land-sharing', a 'land-sparing', or a combination of both approaches is most favourable to reach the goal of ensuring the resilience of the whole system, while producing enough food.

The call for a more holistic understanding of yield associated with this principle is comparable with the concept of ecosystem services. Scientists try to use this concept to value ecological as well as cultural services to advance the appreciation of non-monetary services provided by nature [132]. Hereby, a holistic understanding of yields from ecosystems is also demanded.

This principle is especially crucial as it calls for a sufficient yield of agricultural products while maintaining a high efficiency in terms of resource and energy consumption as well as ecological and social 'yields'. To further investigate this principle, research has to be carried out, including the evaluation of land productivity of permaculture or similar systems. This is crucial to evaluate whether such systems, besides improving ecological functioning, have the potential to feed the growing world population.

3.1.4. Permaculture principle IV: Apply Self-Regulation and Accept Feedback

The goal of permaculture is to create systems as self-sustaining and self-regulating as possible. Positive feedback accelerates growth and energy accumulation within the farming systems. This is best used in the early phase. Negative feedback, the more important one, protects the system from instability or scarcity through miss- or over-usage. Additionally, each element within a land use system should be as self-reliant as possible to increase the resilience against disturbances [81].

The enhancement of regulating ecosystem services, such as natural pest control, pollination, nutrient cycling, and soil and water quality regulation, are the most common applications of this principle. Strengthening of stabilizing feedbacks in ecological systems, such as those regulating ecosystem services, helps to maintain a favoured and resilient regime of the ecosystem and increases robustness against external stress, e.g., climate change [133].

In the case of insect pollination, this ecosystem service is jointly responsible for a stable (low variability) yield of dependent crops [134]. Increasing the proximity to and the sharing of natural habitats might be one way to apply self-regulation, as this increases the temporal and spatial stability (high predictability and low variation during the day and among plants, respectively) of the pollination service [135].

The reintroduction of flower rich habitats into the agro-ecosystem is another measure to apply self-regulation through the enhancement of the stabilizing ecosystem service of natural pest control. Perennial, species-rich wildflower strips were able to enhance natural pest control and thereby to increase yields from adjacent wheat fields by 10% [136]. A reduced need for pesticide use leads to a lower impact on biodiversity and thereby again increases ecosystem stability through biodiversity-related ecosystem services, such as pollination and pest control [18]. At the same time, the dependency of the farm on agrochemicals decreases, making the farm itself more self-reliant.

3.1.5. Permaculture principle V: Use and Value Renewable Resources and Services

The use of renewable resources and services is necessary to stop the exploitation of non-renewable resources, which, in the long run, undermines the functionality of the whole system. Plants might be used as an energy source, building material, and soil improvers, while examples for animals are herding dogs, animals for soil cultivation, and draught animals. This principle also covers the use of wild resources (fish, game, wood), which should be used sustainably to maintain the renewability of these resources. Overall, this principle focuses on maximizing the use and functioning of ecosystem services [81].

One well studied example for this principle is the use of nitrogen fixing plants (legumes) or animal manure instead of mineral nitrogen fertilizer. Firstly, mineral nitrogen fertilizer contributes 40–68% to farm energy demand [137] and thereby greatly increases the net global warming contribution of farming systems [138]. Alternatively, the energy demand of legume nitrogen fixation is provided by solar radiation and animal manure is available as a waste product. At the same time, animal manure and legume-based systems show higher yield resilience to drought stress as well as increased soil carbon stocks [139]. Animal manure is also proposed to be a renewable resource to stop micronutrient depletion of soils, which is already interlinked with malnutrition of the population in some regions of the world [140]. It has to be kept in mind that there are trade-offs concerning these alternatives to mineral fertilizer. Legumes reduce land use efficiency when they are only used to replace fertilizer and are not harvested as a crop. In the long run, animal manure is only renewable if animal production, including feed production, is based only on renewable resources. Further issues on animal manure are addressed in Section 3.1.6.

Other renewable service providers linked to this issue are mycorrhizal fungi. Mycorrhizal fungi are more abundant with organic fertilization [141], while mineral nitrogen fertilization decreases the diversity of mycorrhizal fungi [142]. Mycorrhizas increase the water and nutrient uptake of plants and thereby enhance plant growth and yield, especially under drought conditions [141,143,144].

There are only a few scientific results dealing with working animals as renewable resources. Most of them are investigating draught animals in countries of the global South. Results indicate that primary energy consumption is lower when using cattle for ploughing compared to tractors [145]. However, we could not find sufficient scientific evidence for the comparison of animal work with machinery in agriculture. Important issues to be investigated according to this comparison are energy efficiency and resource consumption, labor productivity, and environmental impacts, such as soil erosion and greenhouse gas emissions.

3.1.6. Permaculture Principle VI: Produce No Waste

This principle aims at mimicking the natural pattern of exchange and cycling of matter and energy. In natural living systems, no waste occurs as every output of an element (a species) is used by another element. This is why waste could also be seen as an output, which is not used by the system. According to this, all waste should be seen as a resource that should be used to be as effective as possible [81].

The most important example for this principle from modern agriculture is possibly animal manure. Through the separation of plant and animal production in industrial agriculture, animal manure became a waste and a problem. This is due to huge animal production systems concentrating in some regions, while feeds, depending on fertilizer input, are produced elsewhere. Through land application, the high amount of animal manure produced in some regions leads to environmental problems, like eutrophication of ground and fresh water, heavy metal accumulation in top soils, and the emission of ammonia, greenhouse gases, and noxious odours [146,147]. However, recent studies show that in other regions and in lower concentrated land, the application of animal manure has huge benefits. It is a valuable resource to enhance plant nutrient availability (including micronutrients), water holding capacity, soil structure, organic matter content, and carbon storage [146,148–150]. Even if animal manure is applied on agricultural land at reasonable rates, storage and transportation can still cause environmental problems, such as ammonia and greenhouse gas emissions [147,151]. By designing

smaller and integrated agricultural systems (see Sections 3.1.8 and 3.1.9), animal manure can lose its waste character while maintaining a high quality and fertile soil.

Even more important might be the high amount of waste of human excreta. Human excreta is a valuable resource of nutrients needed in agricultural production. The application of human excreta as fertilizer is still common in parts of the world, e.g., in Vietnam [152]. Urine is especially valuable as it contains 50–90% of the nutrients of human excreta. It also has a high hygienic quality as it only contains few enteric microorganisms [153]. To improve the hygienic quality of human faeces, a common practice is composting human excreta, which can strongly decrease pathogenous bacteria and parasites [152,154]. However, land applications of human excreta is still a critical topic as there is still insufficient evidence for the fate of therapeutic agents [155].

Many other examples of using waste products in agriculture have been documented. Feeding a 10% share of dried grape pomace increases the growth performance and health indicators of lambs [156]. Vegetable and fruit waste occurring in high amounts with industrial production could also be used as animal feed [157,158].

3.1.7. Permaculture Principle VII: Design from Patterns to Details

Natural ecosystems should be used as patterns for sustainable land use as natural ecosystems evolved over a long period of time to function under certain environmental conditions [81]. Additionally, landscape patterns, such as geomorphology, catchments, and methods, like zoning, and sectors should be used in permaculture design for effective site planning [81].

In scientific literature, this principle is known as “natural ecosystem mimicry”. The main patterns/models that are usable for agricultural ecosystems are grasslands, such as savanna or prairie, dry forests, and tropical rainforests [80]. Large areas on earth are naturally too cold or too dry for agriculture [88]. These are areas where natural grasslands occur as the climate is also not suitable for trees. The natural pattern found here is grasslands crossed by large herds of grazing animals. The strategy here is to use the grazers on natural vegetation and to harvest them for meat (e.g., cattle, sheep, goat) or their metabolites (e.g., milk) [88]. Some authors suggest the application of the natural pattern of densely packed and continuously moving herds through multi-paddock, rotational, cell, or mob grazing to prevent desertification through grazing [100,159]. Areas that are dry, but able to facilitate some trees, normally inhabit savannah like systems. In addition to grazers (or in some cases already crops), trees are included to maintain ecosystem functioning, such as a hydrological balance similar to dry forests [80,85,86]. In temperate regions, forests might be used as models for agroecosystems by combining perennial woody crops, such as nut and fruit trees, with different kinds of animals, such as cattle, sheep, poultry, and pigs [160]. There are also areas that are too wet to be suitable for agriculture, namely, the humid tropical lowlands. The trophic complexity of local biota (including pests) and nutrient leaching limit agricultural suitability [88]. The strategy here is to increase usable productivity while maintaining the natural structure by building diverse and structurally complex agroforests containing mostly perennial species, as it has been done successfully by local people for centuries [161,162].

For other planning strategies, such as zoning and sectoring [82,94], no scientific evidence could be found. Further research has to be carried out to investigate whether those planning strategies lead to higher labor productivity through improved farm logistics, as well as higher performance and resilience of agricultural elements through site-specific positioning.

3.1.8. Permaculture Principle VIII: Integrate Rather than Segregate

Biological interactions, especially mutual ones, should be used to increase the productivity and stability of the agroecosystem and to generate synergy effects. Integration of elements enables making use of the multifunctionality of elements, like chickens for pest control when integrated into an orchard system. Integration also allows sustaining important functions of a system through multiple elements, like chickens and fruit trees both covering the function of food production. This leads to higher stability

of the agroecosystem through integrated pest control and higher economic resilience as the yield is distributed to two sources [81].

These benefits of re-integrating elements in agriculture, especially crops and livestock, have also been promoted in the scientific literature. This integration of crops and livestock is proposed to help overcome the dichotomy between the increase in agricultural production and the negative environmental impacts. This is achieved through better regulation of biogeochemical cycles, an increase in habitat diversity and trophic networks, and a greater resilience of the system against socio-economic or climate change induced risks and hazards [163]. Case studies from France and Brazil show that increasing the interactions between subsystems decreased dependence on external inputs and increased the efficiency of the farm, leading to a good economic, as well as environmental, performance and an increased resilience against market shocks [79]. Studies from the USA show that integrating livestock in corn cropping systems via cool season pasture significantly increases soil quality indicators, such as organic matter and nutrient content [164]. In Australia, the dual-purpose use of cereals and canola for forage during the vegetative stage while still harvesting for grain afterwards is practiced. This provides risk management benefits, improves soil properties, and is able to increase both the livestock and crop productivity of farms by 25–75% with little increase in inputs [165]. Additionally, findings from Asia show that the integration of fish into rice cropping systems increases crop yields through improved weed and pest regulation, increased nutrient availability, and improved water flows, while additionally yielding fish without additional feed or fertilizer [166–168]. Furthermore, a meta-analysis identified a strong potential of within-field crop diversification (polyculture) for win-win relationships between the yield of a focal crop species and the biocontrol of crop pests [169].

A recent study on 35 self-identified permaculture farms in the United States shows, that most of them rely on mixed annual and perennial cropping, the integration of perennial and animal food crops or even an the integration of production and services such as education [170].

3.1.9. Permaculture Principle IX: Use Small and Slow Solutions

This principle is derived from a fundamental pattern found in living organisms: Cellular design [72]. Functions are covered on the smallest possible level, while larger-scale functions are provided through replication and diversification. This principle includes the assumption that small-scale systems are potentially more intense and productive (such as marked gardening or gardening for self-sufficiency), while slow growing systems are potentially more stable and effective (such as tree-based systems) [81].

Small farms (1–2 ha) cultivate 12% and even smaller family farms (less than 1 ha) cultivate 72% of the world's agricultural land [171], and therefore secure nutrition for the biggest share of the world's population. In the scientific literature, the relationship between farm size and land productivity (output per area) has been widely investigated. An inverse productivity-size relationship, stating that smaller farms are more productive per area, has been observed in Africa [172–175], Asia [176–178], Europe [179], and Latin America [180]. Smaller farms, and therefore field sizes, also lead to a higher amount of field edges, inducing beneficial effects, which will be discussed with principle 11.

Modern arable farming systems undermine ecosystem functioning through the adverse effects of intensive industrial production, such as soil erosion, climate change, and loss of biodiversity [181,182]. Agroforestry systems are slower developing compared to modern arable farming, taking some years to reach full productivity and profitability [183]. However, through the maintenance of ecosystem services, such as erosion control, climate change mitigation, biodiversity, and soil fertility, they maintain ecosystem functioning [90,184]. At the same time, agroforestry systems are proposed to be more resilient to climate change [90,185]. In the long run, agroforestry systems have the potential to be even more productive, when compared to exclusively agricultural systems [183].

The application of animal manure or legumes as fertilizer is another example of a slower solution, compared to the fast availability of nutrients from synthetic or mineral fertilizer. Long term studies show that it takes some years until manure or legume fertilized systems (in this case corn) reach a

comparable productivity to systems fertilized with mineral fertilizers [139]. However, in the end, manure and legume fertilized systems were both more resistant to draughts, maintaining their yields in drought years [130]. As mentioned above (see Section 3.1.6) the application of manure also maintains and enhances soil quality and fertility.

As this principle is also aimed at farm setup and development, it is also necessary to investigate from an economical perspective whether small and slow developing farms are more economically stable. Recent results of a case study in France show that it is possible for one person to earn a living from agriculture with relatively low input (e.g., no motorization) on 0.1 ha when using permaculture [186,187].

3.1.10. Permaculture Principle X: Use and Value Diversity

This principle is based on the assumption that diversity is one of the foundations of adaptability and the stability of ecosystems. This is why, also in agroecosystems, the habitat and structural diversity should be maintained, as well as the age, species, variety, and genetic diversity [81].

Many ecosystem services maintaining the functioning of our agroecosystems are related to biodiversity. A meta-analysis shows that increasing biodiversity, in many cases of plant species, has positive effects on productivity in terms of producer and consumer abundance, on erosion control through increased plant root biomass, on nutrient cycling through increased mycorrhizal abundance and decomposer activity, and on ecosystem stability through increased consumption and invasion resistance [188]. It has also been shown that increasing pollinator diversity has significant positive effects on the yields of various pollination dependent crops [189,190]. Habitat diversity, in terms of landscape complexity, has positive effects on ecological pest control [191]. As an example, increasing the habitat and flowering plant diversity through artificial wildflower strips can increase yields by 10% in nearby wheat fields through enhanced ecological pest control [136].

The increasing awareness of the importance of this principle – to use and value diversity—can also be seen in the development of diversified farming systems. Diversified farming systems use practices developed via traditional and/or agroecological scientific knowledge to intentionally include functional biodiversity at multiple spatial and/or temporal scales [192]. Several studies show that these attempts in increasing agrobiodiversity and therefore ecosystem services, such as soil quality, carbon sequestration, water-holding capacity in surface soils, pollination, pest control, energy-use efficiency, and resistance and resilience to climate change, are successful [193,194].

The already mentioned study of 36 self-identified permaculture farms in the United States also shows that, apart from diversifying the farming system, this principle is also used to create a high diversity of income. The study indicated significant positive effects of production diversity on labour productivity, probably through production synergies [170,195].

3.1.11. Permaculture Principle XI: Use Edges and Value the Marginal

Edges are potentially more diverse and productive, as resources and functions of both adjacent ecosystems are present. As in agroforestry systems, these edge zones can be increased on purpose to take advantage of this effect. Edge zones can also be planned as an appropriate separation of elements, such as woody strips in between meadows. This principle is also aimed at valuing margins for their often invisible advantages and functions instead of trying to minimize them [81].

Recent scientific results show that increasing farmland configurational heterogeneity (higher field border density) increases the pollination ecosystem service through higher wild bee abundance and an improved seed set of test plants, probably through enhanced connectivity [196]. Investigations at the former Iron Curtain in Germany, where the East switched to large-scale farming while the West maintained small-scale agriculture with >70% longer field edges, show similar results. Here, higher biodiversity was found in the region with small scale agriculture, while the species richness and abundance were also higher in field edges compared to field interiors, indicating a link between biodiversity increase and field edge density [197].

Beyond field edge densities, field margins, often seen as unproductive areas, are also of great importance in maintaining ecosystem services. Margins have a range of associated fauna, some of which may be pest species, while many are beneficial either as crop pollinators or as pest predators, and therefore contribute to the sustainability of production by enhancing beneficial species within crops and reducing pesticide use [198].

Edges with other ecosystems may even have a stronger effect on ecosystems services supporting the agroecosystem. Pollination of coffee in terms of fruit set increased in the transition zone to forest ecosystems due to higher functional pollinator diversity [199], while the quantity and quality of strawberries was higher near pond edges through a higher abundance of pollinators [200]. Increasing edges with other, especially natural, ecosystems leads, in most cases, to a fragmentation of those habitats. Habitat fragmentation is often associated with habitat loss, which has large negative effects on biodiversity [201]. However, an investigation of 118 studies on habitat fragmentation, independent of habitat amount, showed that 76% of significant biodiversity responses to habitat fragmentation were positive [202]. Negative effects of habitat fragmentation per se are likely due to habitat size becoming too small to sustain a local population (e.g., mammalian predators [203]) or to negative edge effects (e.g., increased predation of forest birds at edges [201,204]).

As edges appear to have positive effects, it should be mentioned that edges also have the potential to produce negative effects on agricultural production. In transition zones from forests to agricultural areas, changes in the microclimate and matter cycling occur, some of which are not favorable for crop production, such as shade and resource competition [205,206].

3.1.12. Permaculture Principle XII: Creatively Use and Respond to Change

Natural ecosystems are stable and resilient despite constant change and the influence of disturbances. The potential for evolutionary change is essential for the dynamic stability of ecosystems. That is why such systems should not be considered as being in a fixed state, but as an evolutionary process. The implications for agroecosystem design are to include flexibility to create resilience and to deliberately use natural change, such as succession [81].

Our earth's ecosystems are complex, which means that their responses to human use are generally not linear, predictable, or controllable [207]. Another property of complex systems is the existence of momentum, leading to a temporal dynamic of the system. Coupled with the high replication time of ecological experiments, this limits applied ecological research, leading to a permanent existence of uncertainties associated with ecological systems [208,209]. Therefore, it is essential when dealing with ecological systems to apply decision theory's principles of decision-making under uncertainty [210,211], which will not be worked out in detail here [195]. To be able to creatively use and respond to change, systems need to be monitored and assessed (adaptive management, see Section 3.1.1) [209]. Actions should also be favored that are reversible and robust to uncertainties [212], and that increase the resilience of the (socio-)ecological system [190]. Ecological resilience can be defined as the magnitude of disturbance that an ecosystem can withstand without changing self-organized processes and structures [213]. In general, ecological resilience is based on two pillars: The diversity of habitats, species, and genes [207,209,214] and reservoirs, such as fertile soil, water, or biomass [207].

In the case of natural succession, one example of how to use the dynamics and changes in natural ecosystems through successive planting and the facilitation of usable annuals, herbaceous perennials, shrubs, and trees has already been given. In Mexico, indigenous people use and direct natural succession to create a highly efficient land use system (see Section 3.1.2). Another example on a much smaller temporal scale is rotational or cell grazing (see Section 3.1.7), where only a short, but intense, pulse of disturbance is used to set the grassland system back to an earlier stage of succession, leaving it with enough resources (nutrients) to restart development again [159].

4. Conclusions

Agroecology had been a scientific discipline for a few decades when agroecology principles were defined for the redesign of farming systems. Permaculture is another design approach for sustainable agriculture, which has always been isolated from scientific research. This review has shown that there is scientific evidence for all twelve permaculture principles introduced by David Holmgren. As Ferguson and Lovell have already pointed out, there is a strong overlap with agroecological principles. This holds especially true for principles related to the diversity of habitats, species, genes, the cycling of biomass and nutrients, the build-up of storages of fertile soil and water, and the integration of different elements to create synergies. However, permaculture additionally includes principles to guide the design, implementation, and maintenance of resilient agroecological systems, such as observing and interacting to enable coping with change, using small and slow solutions, and designing from patterns to details. This also shows that permaculture's central focus, in contrast to agroecology, is on the conscious design of agroecosystems, making it a possible link between agroecological research and theory and practical implementation in agriculture. To investigate this hypothesis, and to identify whether permaculture can produce resilient agricultural systems that also ensure a sufficient supply of food and resources for people, scientific research needs to be carried out on existing land use that is designed and managed with permaculture. This is also crucial as the presented permaculture principles were developed as a coordinated and interrelated set. Therefore, the impact of the application of the whole set of principles has to be investigated, rather than the principles investigated separately. Possibly due to the separation from science, and therefore from official education and external funding, known examples for the application of permaculture in agriculture are still rare. However, the results of a recent case study show that it is possible for one person to earn a living from agriculture with relatively low input (e.g., no motorization) on 0.1 ha in France when using permaculture. This example indicates that further research on permaculture systems might be valuable for the sustainable development of agriculture.

Author Contributions: J.K. conceptualized the review and conducted the literature search for the permaculture principles; S.L. drafted the introduction and the agroecology section. Both authors equally contributed to the writing.

Funding: The TU Braunschweig has funded the costs to publish in open access.

Acknowledgments: We would like to thank our supervisors Martin Entling and Boris Schröder-Esselbach for their support and their contributions to editing this review. Also, we would like to thank our three reviewers for their valuable suggestions which have enriched this article and Paul Mason for language support.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Hermann, A. Haber und Bosch: Brot aus Luft-Die Ammoniaksynthese. *Physikalische Blätter* **1965**, *21*, 168–171. [[CrossRef](#)]
2. Weiner, J. Ecology—The science of agriculture in the 21st century. *J. Agric. Sci.* **2003**, *141*, 371–377. [[CrossRef](#)]
3. Beddington, J.R.; Asaduzzaman, M.; Clark, M.E.; Fernández Bremauntz, A.; Guillou, M.D.; Howlett, D.J.B.; Jahn, M.M.; Lin, E.; Mamo, T.; Negra, C.; et al. Agriculture. What next for agriculture after Durban? *Science* **2012**, *335*, 289–290. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Campbell, B.M.; Beare, D.J.; Bennett, E.M.; Hall-Spencer, J.M.; Ingram, J.S.I.; Jaramillo, F.; Ortiz, R.; Ramankutty, N.; Sayer, J.A.; Shindell, D. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *E&S* **2017**, *22*, 8. [[CrossRef](#)]
5. Conway, G. *The Doubly Green Revolution: Food for All in the Twenty-First Century*; Comstock Pub. Associates: Ithaca, NY, USA, 1998.
6. Foley, J.A.; DeFries, R.; Asner, G.P.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S.R.; Chapin, F.S.; Coe, M.T.; Daily, G.C.; Gibbs, H.K.; et al. Global consequences of land use. *Science* **2005**, *309*, 570–574. [[CrossRef](#)]

7. Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C.; et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **2011**, *478*, 337–342. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Matson, P.A. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* **1997**, *277*, 504–509. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Bennett, E.M.; Carpenter, S.R.; Caraco, N.F. Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective. *BioScience* **2001**, *51*, 227–234. [[CrossRef](#)]
10. Power, A.G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* **2010**, *365*, 2959–2971. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Zhang, W.; Ricketts, T.H.; Kremen, C.; Carney, K.; Swinton, S.M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecol. Econ.* **2007**, *64*, 253–260. [[CrossRef](#)]
12. Emmerson, M.; Morales, M.B.; Oñate, J.J.; Batáry, P.; Berendse, F.; Liira, J.; Aavik, T.; Guerrero, I.; Bommarco, R.; Eggers, S.; et al. How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services. *Adv. Ecol. Res.* **2016**, *55*, 43–97.
13. Pimm, S.L.; Raven, P. Biodiversity. Extinction by numbers. *Nature* **2000**, *403*, 843–845. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Tilman, D. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1999**, *96*, 5995–6000. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Wagner, D.L. Trends in Biodiversity: Insects. In *Encyclopedia of the Anthropocene*; Elsevier: Oxford, UK, 2018; pp. 131–143.
16. Grab, H.; Danforth, B.; Poveda, K.; Loeb, G. Landscape simplification reduces classical biological control and crop yield. *Ecol. Appl.* **2018**, *28*, 348–355. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Tschamntke, T.; Tylianakis, J.M.; Rand, T.A.; Didham, R.K.; Fahrig, L.; Batáry, P.; Bengtsson, J.; Clough, Y.; Crist, T.O.; Dormann, C.F.; et al. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes—eight hypotheses. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* **2012**, *87*, 661–685. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Tschamntke, T.; Klein, A.M.; Kruess, A.; Steffan-Dewenter, I.; Thies, C. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity—Ecosystem service management. *Ecol. Lett.* **2005**, *8*, 857–874. [[CrossRef](#)]
19. Assandri, G.; Bogliani, G.; Pedrini, P.; Brambilla, M. Beautiful agricultural landscapes promote cultural ecosystem services and biodiversity conservation. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *256*, 200–210. [[CrossRef](#)]
20. Monck-Whipp, L.; Martin, A.E.; Francis, C.M.; Fahrig, L. Farmland heterogeneity benefits bats in agricultural landscapes. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *253*, 131–139. [[CrossRef](#)]
21. Kahnonitch, I.; Lubin, Y.; Korine, C. Insectivorous bats in semi-arid agroecosystems—Effects on foraging activity and implications for insect pest control. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *261*, 80–92. [[CrossRef](#)]
22. Evans, A.N.; Llanos, J.E.; Kunin, W.E.; Evison, S.E. Indirect effects of agricultural pesticide use on parasite prevalence in wild pollinators. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *258*, 40–48. [[CrossRef](#)]
23. Reeves, D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* **1997**, *43*, 131–167. [[CrossRef](#)]
24. Pan, G.; Smith, P.; Pan, W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2009**, *129*, 344–348. [[CrossRef](#)]
25. Bauer, A.; Black, A.L. Quantification of the Effect of Soil Organic Matter Content on Soil Productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1994**, *58*, 185–193. [[CrossRef](#)]
26. Barros, V.R.; Field, C.B.; Dokke, D.J.; Mastrandea, M.D.; Mach, K.J.; Bilir, T.E.; Chatterjee, M.; Ebi, K.L.; Estrada, Y.O.; Genova, R.C. *Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*; Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
27. Shi, P.; Schulin, R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management. *Sci. Total Environ.* **2018**, *618*, 210–218. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Allison, S.D.; Jastrow, J.D. Activities of extracellular enzymes in physically isolated fractions of restored grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* **2006**, *38*, 3245–3256. [[CrossRef](#)]
29. Anderson-Teixeira, K.J.; Davis, S.C.; Masters, M.D.; Delucia, E.H. Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *GCB Bioenergy* **2009**, *1*, 75–96. [[CrossRef](#)]
30. Kantola, I.B.; Masters, M.D.; Delucia, E.H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture. *Soil Biol. Biochem.* **2017**, *113*, 184–191. [[CrossRef](#)]

31. McArthur, J.W.; McCord, G.C. Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *J. Dev. Econ.* **2017**, *127*, 133–152. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Antonelli, M.; Tamea, S.; Yang, H. Intra-EU agricultural trade, virtual water flows and policy implications. *Sci. Total Environ.* **2017**, *587–588*, 439–448. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Hathaway, M.D. Agroecology and permaculture: Addressing key ecological problems by rethinking and redesigning agricultural systems. *J. Environ. Stud. Sci.* **2016**, *6*, 239–250. [[CrossRef](#)]
34. Singh, A. Alternative management options for irrigation-induced salinization and waterlogging under different climatic conditions. *Ecol. Indic.* **2018**, *90*, 184–192. [[CrossRef](#)]
35. Postel, S.L.; Daily, G.C.; Ehrlich, P.R. Human Appropriation of Renewable Fresh Water. *Science* **1996**, *271*, 785–788. [[CrossRef](#)]
36. Iglesias, A.; Garrote, L. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agric. Water Manag.* **2015**, *155*, 113–124. [[CrossRef](#)]
37. Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Farahani, E.; Kadner, S.; Seyboth, K.; Adler, A.; Baum, I.; Brunner, S.; Eickemeier, P.; et al. (Eds.) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
38. Rojas-Downing, M.M.; Nejadhashemi, A.P.; Harrigan, T.; Woznicki, S.A. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Clim. Risk Manag.* **2017**, *16*, 145–163. [[CrossRef](#)]
39. Fischer, G.; Shah, M.; Tubiello, F.N.; van Velhuizen, H. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: An integrated assessment, 1990–2080. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* **2005**, *360*, 2067–2083. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Mosier, A.; Kroeze, C.; Nevison, C.; Oenema, O.; Seitzinger, S.; van Cleemput, O. Closing the global N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **1998**, *52*, 225–248. [[CrossRef](#)]
41. Swaney, D.P.; Hong, B.; Ti, C.; Howarth, R.W.; Humborg, C. Net anthropogenic nitrogen inputs to watersheds and riverine N export to coastal waters: A brief overview. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2012**, *4*, 203–211. [[CrossRef](#)]
42. Bodirsky, B.L.; Popp, A.; Weindl, I.; Dietrich, J.P.; Rolinski, S.; Scheffele, L.; Schmitz, C.; Lotze-Campen, H. N₂O emissions from the global agricultural nitrogen cycle—Current state and future scenarios. *Biogeosciences* **2012**, *9*, 4169–4197. [[CrossRef](#)]
43. Shuncai, S.; Chen, Z. Nitrogen distribution in the lakes and lacustrine of China. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2000**, *57*, 23–31. [[CrossRef](#)]
44. Withers, P.; Neal, C.; Jarvie, H.; Doody, D. Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? *Sustainability* **2014**, *6*, 5853–5875. [[CrossRef](#)]
45. Ward, M.H.; Brender, J.D. Drinking Water Nitrate and Human Health. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*; Elsevier: Amsterdam Netherlands, 2013.
46. Ward, M.H.; deKok, T.M.; Levallois, P.; Brender, J.; Gulis, G.; Nolan, B.T.; VanDerslice, J. Workgroup Report: Drinking-Water Nitrate and Health—Recent Findings and Research Needs. *Environ. Health Perspect.* **2005**, *113*, 1607–1614. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. Carpenter, S.R.; Caraco, N.F.; Correll, D.L.; Howarth, R.W.; Sharpley, A.N.; Smith, V.H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* **1998**, *8*, 559–568. [[CrossRef](#)]
48. Conley, D.J.; Paerl, H.W.; Howarth, R.W.; Boesch, D.F.; Seitzinger, S.P.; Havens, K.E.; Lancelot, C.; Likens, G.E. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science* **2009**, *323*, 1014–1015. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Gilbert, N. Environment: The disappearing nutrient. *Nature* **2009**, *461*, 716–718. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
50. Cordell, D.; Drangert, J.-O.; White, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.* **2009**, *19*, 292–305. [[CrossRef](#)]
51. Ferguson, R.S.; Lovell, S.T. Permaculture for agroecology: Design, movement, practice, and worldview. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2014**, *34*, 251–274. [[CrossRef](#)]
52. Bensen, B.M. *Agroecological Characteristics Description and Classification of the Local Corn Varieties Chorotypes*; Prague, Czech Republic, (Publisher unknown); 1928.
53. Bensen, B.M. Possibilities for international cooperation in agroecological. *Int. Rev. Agr. Mo. Bull. Agr. Sci. Pract. (Rome)* **1930**, *21*, 277–284.
54. Klages, K.H.W. *Ecological Crop Geography*; The Macmillan Company: New York, NY, USA, 1942.

55. Tischler, W. Ergebnisse und Probleme der Agrarökologie. *Schrift. Landwirtschaft. Fakultät Kiel* **1950**, 3, 1950.
56. Tischler, W. Neue Ergebnisse agrarökologischer Forschung und ihre Bedeutung für den Pflanzenschutz. *Mitteilung. Biol. Zentralanst.* **1953**, 75, 7–11.
57. Tischler, W. Stand und Möglichkeiten agrarökologischer Forschung. *Naturwissenschaft. Rundschau* **1959**, 12, 291–295.
58. Tischler, W. Pflanzenschutz in Nordwestdeutschland aus agrarökologischer Sicht. *Schrift. Landwirtschaft. Fakultät Kiel* **1961**, 28, 55–70.
59. Vogt, G. *Entstehung und Entwicklung des Ökologischen Landbaus im Deutschsprachigen Raum*; Stiftung Ökologie und Landbau: Bad Dürkheim, Germany, 2000.
60. Altieri, M.A. Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* **1989**, 27, 37–46. [[CrossRef](#)]
61. Callicott, J.B. Agroecology in context. *J. Agric. Ethics* **1988**, 1, 3–9. [[CrossRef](#)]
62. Dover, M.J.; Talbot, L.M. *To Feed the Earth: Agro-Ecology for Sustainable Development*; World Resources Inst: Washington, DC, USA, 1987.
63. Sillanpää, M.; Vlek, P.L. 6. Micronutrients and the agroecology of tropical and Mediterranean regions. *Fertil. Res.* **1985**, 7, 151–167. [[CrossRef](#)]
64. Altieri, M.A. *Agroecology. The Science of Sustainable Agriculture*, 2nd ed.; Westview Press: Boulder, CO, USA, 1995.
65. Yunlong, C.; Smit, B. Sustainability in agriculture: A general review. *Agric. Ecosyst. Environ.* **1994**, 49, 299–307. [[CrossRef](#)]
66. Rosset, P.; Martinez-Torres, M. La Via Campesina and Agroecology. *La Via Campesina's Open Book Celebrating* **2013**, 20, 1–22.
67. Rosemeyer, M.; Gliessman, S.R. (Eds.) *The Conversion to Sustainable Agriculture: Principles, Processes, and Practices*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010.
68. Altieri, M.A. Beyond agroecology: Making sustainable agriculture part of a political agenda. *Am. J. Altern. Agric.* **1988**, 3, 142–143. [[CrossRef](#)]
69. Wezel, A.; Bellon, S.; Doré, T.; Francis, C.; Vallod, D.; David, C. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2009**, 29, 503–515. [[CrossRef](#)]
70. Wezel, A.; Casagrande, M.; Celette, F.; Vian, J.F.; Ferrer, A.; Peigné, J. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2014**, 34, 1–20. [[CrossRef](#)]
71. Gliessman, S.R. *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*, 3rd ed.; CRC Press: Hoboken, NJ, USA, 2015.
72. Lamine, C.; Bellon, S. Conversion to organic farming: A multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2009**, 29, 97–112. [[CrossRef](#)]
73. Nicholls, C.I.; Altieri, M.A.; Vazquez, L. Agroecology: Principles for the Conversion and Redesign of Farming Systems. *J. Ecosyst. Ecography* **2016**. [[CrossRef](#)]
74. Reijntjes, C.; Haverkort, B.; Waters-Bayer, A. *Farming for the Future: An Introduction to Low-External-Input and Sustainable Agriculture*; Macmillan: London, UK, 1992.
75. Altieri, M.A.; Nicholls, C.I. *Agroecology and the Search for a Truly Sustainable Agriculture*, 1st ed.; United Nations Environmental Programme, Environmental Training Network for Latin America and the Caribbean: Mexico City, Mexico, 2005.
76. Vandermeer, J. The Ecological Basis of Alternative Agriculture. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **1995**, 26, 201–224. [[CrossRef](#)]
77. Pretty, J.N. *Regenerating Agriculture: Policies and Practice for Sustainability and Self-Reliance*; Earthscan: London, UK, 1996.
78. Fischer, J.; Lindenmayer, D.B.; Manning, A.D. Biodiversity, ecosystem function, and resilience: Ten guiding principles for commodity production landscapes. *Front. Ecol. Environ.* **2006**, 4, 80–86. [[CrossRef](#)]
79. Bonaudo, T.; Bendahan, A.B.; Sabatier, R.; Ryschawy, J.; Bellon, S.; Leger, F.; Magda, D.; Tichit, M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur. J. Agron.* **2014**, 57, 43–51. [[CrossRef](#)]
80. Malézieux, E. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* **2012**, 32, 15–29. [[CrossRef](#)]

81. Holmgren, D. *Permaculture—Principles and Pathways beyond Sustainability*; Holmgren Design Services: Victoria, Australia, 2002.
82. Mollison, B.C. *Permaculture: A Designers' Manual*; Tagari Publ: Tyalgum, Australia, 1992.
83. Morel, K.; Léger, F.; Ferguson, R.S. Permaculture. *Ref. Module Earth Syst. Environ. Sci.* **2018**, in press.
84. Bane, P.; Holmgren, D. *The Permaculture Handbook: Garden Farming for Town and Country*; New Society Publishers: Gabriola Island, BC, Canada, 2012.
85. Hatton, T.J.; Nulsen, R.A. Towards Achieving Functional Ecosystem Mimicry with Respect to Water Cycling in Southern Australian Agriculture. *Agrofor. Syst.* **1999**, *45*, 203–214. [[CrossRef](#)]
86. Lefroy, E.C. Agroforestry and the functional mimicry of natural ecosystems. In *Agroforestry for Natural Resource Management*; Nuberg, I., George, B., Reid, R., Eds.; CSIRO Publishing: Melbourne, Australia, 2009.
87. Hemenway, T. *Gaia's Garden: A Guide to Home-Scale Permaculture*, 2nd ed.; Chelsea Green Publishing Co.: White River Junction, VT, USA, 2009.
88. Ewel, J.J. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agrofor. Syst.* **1999**, *45*, 1–21. [[CrossRef](#)]
89. Picasso, V.D.; Brummer, E.C.; Liebman, M.; Dixon, P.M.; Wilsey, B.J. Diverse perennial crop mixtures sustain higher productivity over time based on ecological complementarity. *Renew. Agric. Food Syst.* **2011**, *26*, 317–327. [[CrossRef](#)]
90. Schoeneberger, M.; Bentrup, G.; de Gooijer, H.; Soolanayakanahally, R.; Sauer, T.; Brandle, J.; Zhou, X.; Current, D. Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *J. Soil Water Conserv.* **2012**, *67*, 128A–136A. [[CrossRef](#)]
91. Aranya. *Permaculture Design: A Step-by-Step Guide*; Permanent Publications: East Meon, UK, 2012.
92. Dörner, D. *Die Logik des Mißlingens: Strategisches Denken in Komplexen Situationen*, 15th ed.; Rowohlt: Reinbek bei Hamburg, Germany, 2002.
93. Morrow, R. *Earth User's Guide to Permaculture*; Kangaroo Press: East Roseville, CA, USA, 2000.
94. Whitefield, P. *The Earth Care Manual: A Permaculture Handbook for Britain & Other Temperate Climates*; Permanent Publications: East Meon, UK, 2016.
95. Williams, B.K.; Szaro, R.C.; Shapiro, C.D. *Adaptive Management*; US Department of the Interior, Adaptive Management Working Group: Washington, DC, USA, 2007.
96. Westgate, M.J.; Likens, G.E.; Lindenmayer, D.B. Adaptive management of biological systems: A review. *Biol. Conserv.* **2013**, *158*, 128–139. [[CrossRef](#)]
97. Perkins, A.J.; Maggs, H.E.; Watson, A.; Wilson, J.D. Adaptive management and targeting of agri-environment schemes does benefit biodiversity: A case study of the corn bunting *Emberiza calandra*. *J. Appl. Ecol.* **2011**, *48*, 514–522. [[CrossRef](#)]
98. Ripoché, A.; Rellier, J.-P.; Martin-Clouaire, R.; Paré, N.; Biarnès, A.; Gary, C. Modelling adaptive management of intercropping in vineyards to satisfy agronomic and environmental performances under Mediterranean climate. *Environ. Model. Softw.* **2011**, *26*, 1467–1480. [[CrossRef](#)]
99. Berkes, F.; Colding, J.; Folke, C. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecol. Appl.* **2000**, *10*, 1251–1262. [[CrossRef](#)]
100. Teague, R.; Provenza, F.; Kreuter, U.; Steffens, T.; Barnes, M. Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *J. Environ. Manag.* **2013**, *128*, 699–717. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
101. Ji, S.; Unger, P.W. Soil Water Accumulation under Different Precipitation, Potential Evaporation, and Straw Mulch Conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2001**, *65*, 442–448. [[CrossRef](#)]
102. Tolk, J.; Howell, T.; Evett, S. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize. *Soil Tillage Res.* **1999**, *50*, 137–147. [[CrossRef](#)]
103. Unger, P.W. Straw-mulch Rate Effect on Soil Water Storage and Sorghum Yield 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1978**, *42*, 486–491. [[CrossRef](#)]
104. Huang, Z.; Xu, Z.; Chen, C. Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia. *Appl. Soil Ecol.* **2008**, *40*, 229–239. [[CrossRef](#)]
105. Bot, A.; Benites, J. *The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-Resistant Soil and Sustained Food Production*; Food Agriculture Organization: Rome, Italy, 2005.

106. Tiessen, H.; Cuevas, E.; Chacon, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* **1994**, *371*, 783–785. [CrossRef]
107. Adams, J.E. Influence of Mulches on Runoff, Erosion, and Soil Moisture Depletion 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1966**, *30*, 110–114. [CrossRef]
108. Döring, T.F.; Brandt, M.; Heß, J.; Finckh, M.R.; Saucke, H. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Res.* **2005**, *94*, 238–249. [CrossRef]
109. Lal, R. Mulch Requirements for Erosion Control with the No-till System in the Tropics: A Review. In Proceedings of the Harare Symposium, Harare, Zimbabwe, 23–27 July 1984.
110. Mannering, J.V.; Meyer, L.D. The Effects of Various Rates of Surface Mulch on Infiltration and Erosion 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1963**, *27*, 84–86. [CrossRef]
111. Vohland, K.; Barry, B. A review of in situ rainwater harvesting (RWH) practices modifying landscape functions in African drylands. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2009**, *131*, 119–127. [CrossRef]
112. Falkenmark, M.; Fox, P.; Persson, G.; Rockström, J. *Water Harvesting for Upgrading of Rainfed Agriculture Problem Analysis and Research Needs*; Stockholm International Water Institute (SIWI): Stockholm, Sweden, 2001.
113. Ellis-Jones, J.; Tengberg, A. The impact of indigenous soil and water conservation practices on soil productivity: Examples from Kenya, Tanzania and Uganda. *Land Degrad. Dev.* **2000**, *11*, 19–36. [CrossRef]
114. Rockström, J.; Folke, C.; Gordon, L.; Hatibu, N.; Jewitt, G.; Penning de Vries, F.; Rwehumbiza, F.; Sally, H.; Savenije, H.; Schulze, R. A watershed approach to upgrade rainfed agriculture in water scarce regions through Water System Innovations: An integrated research initiative on water for food and rural livelihoods in balance with ecosystem functions. *Phys. Chem. Earth Parts A/B/C* **2004**, *29*, 1109–1118. [CrossRef]
115. Van Dijk, J.A. Opportunities for Expanding Water Harvesting in Sub-Saharan Africa: The Case of the Teras of Kassala. 1993. Available online: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XL2012002896> (accessed on 07 April 2018).
116. Kunze, D. Methods to Evaluate the Economic Impact of Water Harvesting. *Q. J. Int. Agric.* **2000**, *39*, 69–91.
117. Cofie, O.O.; Barry, B.; Bossio, D.A. Human Resources as a Driver of Bright Spots: The Case of Rainwater Harvesting in West Africa. Presented at the NEPAD/IGAD Regional Conference “Agricultural successes in the Greater Horn of Africa”, Nairobi, Kenya, 22–25 November 2004.
118. Zaal, F.; Oostendorp, R.H. Explaining a Miracle: Intensification and the Transition Towards Sustainable Small-scale Agriculture in Dryland Machakos and Kitui Districts, Kenya. *World Dev.* **2002**, *30*, 1271–1287. [CrossRef]
119. Botha, J.; van Rensburg, L.D.; Anderson, J.J.; Groenewald, D.C.; Kundhlande, G.; Baiphethi, M.N.; Viljoen, M.F. Evaluating the Sustainability of the In-Field Rainwater Harvesting Crop Production System. In Proceedings of the ICID-FAO International Workshop on Water Harvesting and Sustainable Agriculture, Moscow, Russia, 5–11 September 2004.
120. Wakindiki, I.I.C.; Ben-Hur, M. Indigenous soil and water conservation techniques: Effects on runoff, erosion, and crop yields under semi-arid conditions. *Aust. J. Soil Res.* **2002**, *40*, 367–379. [CrossRef]
121. Schiettecatte, W.; Ouessar, M.; Gabriels, D.; Tanghe, S.; Heirman, S.; Abdelli, F. Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: A case study on a micro catchment in southeastern Tunisia. *J. Arid Environ.* **2005**, *61*, 297–313. [CrossRef]
122. Zougmore, R.; Zida, Z.; Kambou, N.F. Role of nutrient amendments in the success of half-moon soil and water conservation practice in semiarid Burkina Faso. *Soil Tillage Res.* **2003**, *71*, 143–149. [CrossRef]
123. Herweg, K.; Steiner, K. *Impact Monitoring & Assessment: Instruments for Use in Rural Development Projects with a Focus on Sustainable Land Management. Volume 1: Procedure*; Center for Development and Environment (CDE)/Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (GTZ): Bern, Switzerland, 2002.
124. Pandey, D.N. A Bountiful Harvest of Rainwater. *Science* **2001**, *293*, 1763. [CrossRef] [PubMed]
125. Griscom, B.W.; Adams, J.; Ellis, P.W.; Houghton, R.A.; Lomax, G.; Miteva, D.A.; Schlesinger, W.H.; Shoch, D.; Siikamäki, J.V.; Smith, P.; et al. Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2017**, *114*, 11645–11650. [CrossRef] [PubMed]
126. Odum, H.T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*; Wiley: New York, NY, USA, 1996.
127. Brown, M.; Ulgiati, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecol. Eng.* **1997**, *9*, 51–69. [CrossRef]

128. Martin, J.F.; Diemont, S.A.; Powell, E.; Stanton, M.; Levy-Tacher, S. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2006**, *115*, 128–140. [[CrossRef](#)]
129. Björklund, J. *Emergy Analysis to Assess Ecological Sustainability: Strengths and Weaknesses*; Acta Universitatis Agriculturae Sueciae; Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 2000.
130. Nigh, R.B. The Evolutionary Potential of Lacandon Maya Sustained-Yield Tropical Forest Agriculture. *J. Anthropol. Res.* **1980**, *36*, 1–30. [[CrossRef](#)]
131. Diemont, S.A.; Martin, J.F.; Levy-Tacher, S.I. Emergy Evaluation of Lacandon Maya Indigenous Swidden Agroforestry in Chiapas, Mexico. *Agrofor. Syst.* **2006**, *66*, 23–42. [[CrossRef](#)]
132. Spangenberg, J.H.; Settele, J. Precisely incorrect?: Monetising the value of ecosystem services. *Ecol. Complex.* **2010**, *7*, 327–337. [[CrossRef](#)]
133. Biggs, R.; Schlüter, M.; Biggs, D.; Bohensky, E.L.; BurnSilver, S.; Cundill, G.; Dakos, V.; Daw, T.M.; Evans, L.S.; Kotschy, K.; et al. Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2012**, *37*, 421–448. [[CrossRef](#)]
134. Garibaldi, L.A.; Aizen, M.A.; Klein, A.M.; Cunningham, S.A.; Harder, L.D. Global growth and stability of agricultural yield decrease with pollinator dependence. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2011**, *108*, 5909–5914. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
135. Garibaldi, L.A.; Steffan-Dewenter, I.; Kremen, C.; Morales, J.M.; Bommarco, R.; Cunningham, S.A.; Carvalheiro, L.G.; Chacoff, N.P.; Dudenhöffer, J.H.; Greenleaf, S.S.; et al. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecol. Lett.* **2011**, *14*, 1062–1072. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
136. Tschumi, M.; Albrecht, M.; Bärtschi, C.; Collatz, J.; Entling, M.H.; Jacot, K. Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2016**, *220*, 97–103. [[CrossRef](#)]
137. Mudahar, M.S.; Hignett, T.P. Fertilizer and Energy Use. In *Energy in Plant Nutrition and Pest Control. Energy in World Agriculture*; Helsel, J.R., Ed.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 1987; Volume 2.
138. Schlesinger, W.H. Carbon sequestration in soils: Some cautions amidst optimism. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2000**, *82*, 121–127. [[CrossRef](#)]
139. Pimentel, D.; Hepperly, P.; Hanson, J.; Seidel, R.; Douds, D. *Organic and Conventional Farming Systems: Environmental and Economic Issues*; The Rodale Institute: Kutztown, PA, USA, 2005.
140. Nayyar, V.K.; Arora, C.L.; Katak, P.K. Management of Soil Micronutrient Deficiencies in the Rice-Wheat Cropping System. *J. Crop Prod.* **2008**, *4*, 87–131. [[CrossRef](#)]
141. Turk, M.A.; Assaf, T.A.; Hameed, K.M.; Al-Tawaha, A.M. Significance of Mycorrhizae. *World J. Agric. Sci.* **2006**, *2*, 16–20.
142. Egerton-Warburton, L.M.; Johnson, N.C.; Allen, E.B. Mycorrhizal community dynamics following nitrogen fertilization: A cross-site test in five grasslands. *Ecol. Monogr.* **2007**, *77*, 527–544. [[CrossRef](#)]
143. Jayne, B.; Quigley, M. Influence of arbuscular mycorrhiza on growth and reproductive response of plants under water deficit: A meta-analysis. *Mycorrhiza* **2014**, *24*, 109–119. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
144. Kaya, C.; Higgs, D.; Kirnak, H.; Tas, I. Mycorrhizal Colonisation Improves Fruit Yield and Water Use Efficiency in Watermelon (*Citrullus Lanatus*) Grown under Well-Watered and Water-Stressed Conditions. *Plant Soil* **2003**, *253*, 287–292. [[CrossRef](#)]
145. Spugnoli, P.; Dainelli, R. Environmental comparison of draught animal and tractor power. *Sustain. Sci.* **2013**, *8*, 61–72. [[CrossRef](#)]
146. Bolan, N.S.; Szogi, A.A.; Chuasavathi, T.; Seshadari, B.; Rothrock, M.J. Uses and management of poultry litter. *Worlds Poult. Sci. J.* **2010**, *66*, 673–698. [[CrossRef](#)]
147. Jongbloed, A.W.; Lenis, N.P. Environmental concerns about animal manure. *J. Anim. Sci.* **1998**, *76*, 2641–2648. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
148. Haynes, R.J.; Naidu, R. Influence of Lime, Fertilizer and Manure Applications on Soil Organic Matter Content and Soil Physical Conditions: A Review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **1998**, *51*, 123–137. [[CrossRef](#)]
149. Limon-Ortega, A.; Govaerts, B.; Sayre, K.D. Crop Rotation, Wheat Straw Management, and Chicken Manure effects on Soil Quality. *Agron. J.* **2009**, *101*, 600–606. [[CrossRef](#)]
150. Maillard, É.; Angers, D.A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* **2014**, *20*, 666–679. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

151. Sommer, S.G.; Petersen, S.O.; Sørensen, P.; Poulsen, H.D.; Møller, H.B. Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid manure storage. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2007**, *78*, 27–36. [[CrossRef](#)]
152. Jensen, P.K.M.; Phuc, P.D.; Knudsen, L.G.; Dalsgaard, A.; Konradsen, F. Hygiene versus fertiliser: The use of human excreta in agriculture—a Vietnamese example. *Int. J. Hyg. Environ. Health* **2008**, *211*, 432–439. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
153. Heinson-Tanski, H.; van Wijk-Sijbesma, C. Human excreta for plant production. *Bioresour. Technol.* **2005**, *96*, 403–411. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
154. Dumontet, S.; Dinel, H.; Baloda, S.B. Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. *Biol. Agric. Hortic.* **1999**, *16*, 409–430. [[CrossRef](#)]
155. Jjemba, P.K. The potential impact of veterinary and human therapeutic agents in manure and biosolids on plants grown on arable land: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2002**, *93*, 267–278. [[CrossRef](#)]
156. Bahrami, Y.; Foroozandeh, A.-D.; Zamani, F.; Modarresi, M.; Eghbal-Saeid, S.; Chekani-Azar, S. Effect of diet with varying levels of dried grape pomace on dry matter digestibility and growth performance of male lambs. *J. Anim. Plant Sci.* **2010**, *6*, 605–610.
157. Esteban, M.B.; García, A.J.; Ramos, P.; Márquez, M.C. Evaluation of fruit-vegetable and fish wastes as alternative feedstuffs in pig diets. *Waste Manag.* **2007**, *27*, 193–200. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
158. García, A.J.; Esteban, M.B.; Márquez, M.C.; Ramos, P. Biodegradable municipal solid waste: Characterization and potential use as animal feedstuffs. *Waste Manag.* **2005**, *25*, 780–787. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
159. McCosker, T. Cell Grazing—The first 10 years in Australia. *Trop. Grassl.* **2000**, *34*, 207–218.
160. Shepard, M. *Restoration Agriculture: Real-World Permaculture for Farmers*; Acres U.S.A.: Austin, TX, USA, 2013.
161. Falanruw, M.V.C. Food Production and Ecosystem Management on Yap. *SLA J. Micrones. Stud.* **1994**, 2–22.
162. De Foresta, H.; Michon, G. The agroforest alternative to Imperata grasslands: When smallholder agriculture and forestry reach sustainability. *Agrofor. Syst.* **1996**, *36*, 105–120. [[CrossRef](#)]
163. Lemaire, G.; Franzluebbers, A.; de Faccio Carvalho, P.C.; Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2014**, *190*, 4–8. [[CrossRef](#)]
164. Maughan, M.W.; Flores, J.P.C.; Anghinoni, I.; Bollero, G.; Fernández, F.G.; Tracy, B.F. Soil Quality and Corn Yield under Crop–Livestock Integration in Illinois. *Agron. J.* **2009**, *101*, 1503–1510. [[CrossRef](#)]
165. Bell, L.W.; Moore, A.D.; Kirkegaard, J.A. Evolution in crop–livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. *Eur. J. Agron.* **2014**, *57*, 10–20. [[CrossRef](#)]
166. Berg, H. Rice monoculture and integrated rice–fish farming in the Mekong Delta, Vietnam—Economic and ecological considerations. *Ecol. Econ.* **2002**, *41*, 95–107. [[CrossRef](#)]
167. Frei, M.; Becker, K. Integrated rice–fish culture: Coupled production saves resources. *Nat. Resour. Forum* **2005**, *29*, 135–143. [[CrossRef](#)]
168. Kadir Alsagoff, S.A.; Clonts, H.A.; Jolly, C.M. An integrated poultry, multi-species aquaculture for Malaysian rice farmers: A mixed integer programming approach. *Agric. Syst.* **1990**, *32*, 207–231. [[CrossRef](#)]
169. Iverson, A.L.; Marín, L.E.; Ennis, K.K.; Gonthier, D.J.; Connor-Barrie, B.T.; Remfert, J.L.; Cardinale, B.J.; Perfecto, I.; Wilson, J. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* **2014**, *51*, 1593–1602. [[CrossRef](#)]
170. Ferguson, R.S.; Lovell, S.T. Livelihoods and production diversity on U.S. permaculture farms. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **2017**, *41*, 588–613. [[CrossRef](#)]
171. Lowder, S.K.; Skoet, J.; Raney, T. The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Dev.* **2016**, *87*, 16–29. [[CrossRef](#)]
172. Ali, D.A.; Deininger, K. Is There a Farm Size–Productivity Relationship in African Agriculture?: Evidence from Rwanda. *Land Econ.* **2015**, *91*, 317–343. [[CrossRef](#)]
173. Barrett, C.B.; Bellemare, M.F.; Hou, J.Y. Reconsidering Conventional Explanations of the Inverse Productivity–Size Relationship. *World Dev.* **2010**, *38*, 88–97. [[CrossRef](#)]
174. Collier, P. Malfunctioning of African rural factor markets: theory and a Kenyan example. *Oxf. Bull. Econ. Stat.* **1983**, *45*, 141–172. [[CrossRef](#)]
175. Kimhi, A. *Plot Size and Maize Productivity in Zambia: The Inverse Relationship Re-Examined*; The Hebrew University of Jerusalem: Jerusalem, Israel, 2003.
176. Benjamin, D.; Brandt, L. Property rights, labour markets, and efficiency in a transition economy: The case of rural China. *Can. J. Econ.* **2002**, *35*, 689–716. [[CrossRef](#)]

177. Carter, M.R. Identification of the Inverse Relationship between Farm Size and Productivity: An Empirical Analysis of Peasant Agricultural Production. *Oxf. Econ. Pap.* **1984**, *36*, 131–145. [[CrossRef](#)]
178. Heltberg, R. Rural market imperfections and the farm size—Productivity relationship: Evidence from Pakistan. *World Dev.* **1998**, *26*, 1807–1826. [[CrossRef](#)]
179. Alvarez, A. Technical efficiency and farm size: A conditional analysis. *Agric. Econ.* **2004**, *30*, 241–250. [[CrossRef](#)]
180. Berry, R.A.; Cline, W.R. *Agrarian Structure and Productivity in Developing Countries*; Johns Hopkins University Press: Baltimore, MD, USA, 1979.
181. Rockström, J.; Williams, J.; Daily, G.; Noble, A.; Matthews, N.; Gordon, L.; Wetterstrand, H.; DeClerck, F.; Shah, M.; Steduto, P.; et al. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* **2017**, *46*, 4–17. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
182. Tilman, D.; Fargione, J.; Wolff, B.; D’Antonio, C.; Dobson, A.; Howarth, R.; Schindler, D.; Schlesinger, W.H.; Simberloff, D.; Swackhamer, D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* **2001**, *292*, 281–284. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
183. Rigueiro-Rodríguez, A.; Fernández-Núñez, E.; González-Hernández, P.; McAdam, J.H.; Mosquera-Losada, M.R. Agroforestry Systems in Europe: Productive, Ecological and Social Perspectives. In *Agroforestry in Europe*; Rigueiro-Rodríguez, A., McAdam, J., Mosquera-Losada, M.R., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008; pp. 43–65.
184. Torralba, M.; Fagerholm, N.; Burgess, P.J.; Moreno, G.; Plieninger, T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services?: A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2016**, *230*, 150–161. [[CrossRef](#)]
185. Nguyen, Q.; Hoang, M.H.; Öborn, I.; van Noordwijk, M. Multipurpose agroforestry as a climate change resiliency option for farmers: An example of local adaptation in Vietnam. *Clim. Chang.* **2013**, *117*, 241–257. [[CrossRef](#)]
186. Morel, K.; Guégan, C.; Léger, F.G. Can an organic market garden based on holistic thinking be viable without motorization?: The case of a permaculture farm. *Acta Hort.* **2016**, *1137*, 343–346. [[CrossRef](#)]
187. Morel, K.; Léger, F. A conceptual framework for alternative farmers’ strategic choices: The case of French organic market gardening microfarms. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **2016**, *40*, 466–492. [[CrossRef](#)]
188. Balvanera, P.; Pfisterer, A.B.; Buchmann, N.; He, J.-S.; Nakashizuka, T.; Raffaelli, D.; Schmid, B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecol. Lett.* **2006**, *9*, 1146–1156. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
189. Garibaldi, L.A.; Carvalheiro, L.G.; Vaissière, B.E.; Gemmill-Herren, B.; Hipólito, J.; Freitas, B.M.; Ngo, H.T.; Azzu, N.; Sáez, A.; Åström, J.; et al. Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science* **2016**, *351*, 388–391. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
190. Hoehn, P.; Tschamtkke, T.; Tylianakis, J.M.; Steffan-Dewenter, I. Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield. *Proc. Biol. Sci.* **2008**, *275*, 2283–2291. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
191. Bianchi, F.J.J.A.; Booij, C.J.H.; Tschamtkke, T. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc. Biol. Sci.* **2006**, *273*, 1715–1727. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
192. Kremen, C.; Iles, A.; Bacon, C. Diversified Farming Systems: An Agroecological, Systems-based Alternative to Modern Industrial Agriculture. *E&S* **2012**, *17*. [[CrossRef](#)]
193. Kremen, C.; Miles, A. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *E&S* **2012**, *17*. [[CrossRef](#)]
194. Lichtenberg, E.M.; Kennedy, C.M.; Kremen, C.; Batáry, P.; Berendse, F.; Bommarco, R.; Bosque-Pérez, N.A.; Carvalheiro, L.G.; Snyder, W.E.; Williams, N.M.; et al. A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Glob. Chang. Biol.* **2017**, *23*, 4946–4957. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
195. Ferguson, R.S.; Lovell, S.T. Diversification and labor productivity on US permaculture farms. *Renew. Agric. Food Syst.* **2017**, *18*, 1–12. [[CrossRef](#)]
196. Hass, A.L.; Kormann, U.G.; Tschamtkke, T.; Clough, Y.; Baillod, A.B.; Sirami, C.; Fahrig, L.; Martin, J.-L.; Baudry, J.; Bertrand, C.; et al. Landscape configurational heterogeneity by small-scale agriculture, not crop diversity, maintains pollinators and plant reproduction in western Europe. *Proc. Biol. Sci.* **2018**, *285*. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

197. Batáry, P.; Gallé, R.; Riesch, F.; Fischer, C.; Dormann, C.F.; Mußhoff, O.; Császár, P.; Fusaro, S.; Gayer, C.; Happe, A.-K.; et al. The former Iron Curtain still drives biodiversity-profit trade-offs in German agriculture. *Nat. Ecol. Evol.* **2017**, *1*, 1279–1284. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
198. Marshall, E.; Moonen, A. Field margins in northern Europe: Their functions and interactions with agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2002**, *89*, 5–21. [[CrossRef](#)]
199. Klein, A.-M.; Steffan-Dewenter, I.; Tschardtke, T. Fruit set of highland coffee increases with the diversity of pollinating bees. *Proc. Biol. Sci.* **2003**, *270*, 955–961. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
200. Stewart, R.I.; Andersson, G.K.; Brönmark, C.; Klatt, B.K.; Hansson, L.-A.; Zülsdorff, V.; Smith, H.G. Ecosystem services across the aquatic–terrestrial boundary: Linking ponds to pollination. *Basic Appl. Ecol.* **2017**, *18*, 13–20. [[CrossRef](#)]
201. Fahrig, L. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **2003**, *34*, 487–515. [[CrossRef](#)]
202. Fahrig, L. Ecological Responses to Habitat Fragmentation Per Se. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **2017**, *48*, 1–23. [[CrossRef](#)]
203. Gehring, T.M.; Swihart, R.K. Body size, niche breadth, and ecologically scaled responses to habitat fragmentation: Mammalian predators in an agricultural landscape. *Biol. Conserv.* **2003**, *109*, 283–295. [[CrossRef](#)]
204. Chalfoun, A.D.; Thompson, F.R.; Ratnaswamy, M.J. Nest Predators and Fragmentation: A Review and Meta-Analysis. *Conserv. Biol.* **2002**, *16*, 306–318. [[CrossRef](#)]
205. Schmidt, M.; Jochheim, H.; Kersebaum, K.-C.; Lischeid, G.; Nendel, C. Gradients of microclimate, carbon and nitrogen in transition zones of fragmented landscapes—A review. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *232*, 659–671. [[CrossRef](#)]
206. Miller, A.W.; Pallardy, S.G. Resource competition across the crop-tree interface in a maize-silver maple temperate alley cropping stand in Missouri. *Agrofor. Syst.* **2001**, *53*, 247–259. [[CrossRef](#)]
207. Folke, C.; Carpenter, S.; Elmqvist, T.; Gunderson, L.; Holling, C.S.; Walker, B. Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *Ambio* **2002**, *31*, 437–440. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
208. Hilborn, R.; Ludwig, D. The Limits of Applied Ecological Research. *Ecol. Appl.* **1993**, *3*, 550–552. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
209. Schindler, D.E.; Hilborn, R. Prediction, precaution, and policy under global change. *Science* **2015**, *347*, 953–954. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
210. Berger, J.O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*; Springer: New York, NY, USA, 1985.
211. Parmigiani, G.; Inoue, L.Y.T.; Lopes, H.F. *Decision theory: Principles and approaches*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2010.
212. Ludwig, D.; Hilborn, R.; Walters, C. Uncertainty, resource exploitation, and conservation: Lessons from history. *Science* **1993**, *260*, 17–36. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
213. Holling, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **1973**, *4*, 1–23. [[CrossRef](#)]
214. Duru, M.; Therond, O.; Martin, G.; Martin-Clouaire, R.; Magne, M.-A.; Justes, E.; Journet, E.-P.; Aubertot, J.-N.; Savary, S.; Bergez, J.-E.; et al. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2015**, *35*, 1259–1281. [[CrossRef](#)]



پرماکالچر شواهد علمی اصول طراحی اگرواکولوژیک سیستمهای کشاورزی

چکیده

کشاورزی صنعتی مدرن تا حد زیادی مسئول مشکلات محیطی، مانند کاهش تنوع زیستی، تخریب خاک و تغییر در چرخه های بیوژئوشیمیایی یا انتشار گازهای گلخانه ای است. اگرواکولوژی، هم به عنوان یک رشته علمی و هم به عنوان یک رویه و جنبش کشاورزی، به عنوان پاسخی به این مسائل پدید آمد؛ با هدف ایجاد کشاورزی پایدارتر. پاسخ دیگر، ظهور پرماکالچر بود؛ یک سیستم طراحی مبتنی بر اصول طراحی، و نیز چارچوبی برای روش های تقلید اکوسیستم و بهینه سازی سیستم های پیچیده. تمرکز آن، که بر طراحی آگاهانه اگرواکوسیستمها است، تفاوت اصلی آن با دیگر رویکردهای جایگزین کشاورزی است. اگرواکولوژی از چند دهه پیش به عنوان یک رشته علمی مطرح بوده است، اما تنها اخیراً اصول طراحی برای سازماندهی مجدد سیستمهای کشاورزی تدوین شده اند، در حالیکه متخصصین پرماکالچر مدتهاست از اصول طراحی استفاده میکنند، بدون آنکه این اصول تاکنون مورد بررسی و واریسی علمی قرار گرفته باشند. در اینجا، ما ادبیات علمی را مرور میکنیم تا مبنای علمی اصول پیشنهادی دیوید هولمگر بنیانگذار پرماکالچر—ارزیابی شود. شواهد علمی برای هر دوازده اصل ارائه خواهد شد. با اینکه اصول پرماکالچر که ساختار تا حد زیادی با رویکرد اگرواکولوژیک مشابه بودند، پرماکالچر در کنار آن اصولی نیز برای هدایت طراحی، اجرا و نگهداشت سیستم های مقاوم اگرواکولوژیک فراهم میکند.

کلیدواژه ها: کشاورزی؛ اگرواکولوژی؛ پرماکالچر؛ اصول طراحی

1- مقدمه در اواخر قرن نوزدهم، روشن شد که به یک نظام کشاورزی کارآمدتر برای تغذیه مردم—به ویژه در نیمکره جنوبی جهان نیاز است. در دهه 1960 انقلاب سبز که با اختراع ارقام پربازده، آفتکشهای سنتتیک و کودها، و نیز ماشین آلات مدرن همراه بود، به نظر میرسید راه حل گرسنگی و پیشگیری از درگیریها بر سر منابع تغذیه باشد. با افزایش عملکرد به ازای هر واحد زمین، کاهش بار کاری و بهبود ایمنی غذایی، این راه حلهای فنی یک پیشرفت آشکار به نظر میرسیدند. با این حال، متأسفانه این مزایا با یک قیمت پیشبینی نشده همراه بودند. بسیاری از مشکلات محیطی که امروز بشر با آنها مواجه است، به کشاورزی مدرن و صنعتی مربوط میشوند؛ کشاورزی که بر کشت گسترده تک کشته با ماشین آلات سنگین و نیز مقدار زیادی از مواد شیمیایی کشاورزی، مانند کودهای سنتتیک و آفتکشا استوار است. همچنین، تغییر مداوم کاربری زمین، اکوسیستمهای زمین را به مرزهای ظرفیتشان نزدیک میکند. کشاورزی اثر به خصوص قوی ای بر تنوع زیستی، ماده آلی خاک، مخازن آب، گازهای گلخانه ای، چرخه نیتروژن، و چرخه فسفر دارد

1-1- از دست رفتن تنوع زیستی

کاهش شدید تنوع زیستی در دهه های اخیر، عمدتاً ناشی از گسترش کشاورزی است. تبدیل اراضی طبیعی به کاربریهای کشاورزی به ویژه تهدیدی جدی برای تعداد زیادی از جوامع گیاهی و جانوری (و خدمات اکوسیستم هایی که در آنها تحقق مییابند) محسوب میشود. تغییرات ساختاری مرتبط با تشدید کشاورزی، به ساده سازی چشم اندازها (landscape) منجر میشود و در نتیجه این چشم اندازها میتوانند گونه های کمتری را در خود جای دهند. آنچه بیش از همه نگران کننده است، کاهش قابل توجه تنوع در گونه های «مهاجر بالقوه» به زیستگاههاست (potential habitat colonists). این بدان معناست که زیستگاهها در چشم اندازهای پیچیده، میتوانند تنوع بیشتری از گونه ها دوباره اشغال شوند

از دست رفتن تنوع زیستی، خطری برای رفاه انسان به همراه دارد، زیرا با تعدادی از خدمات حیاتی اکوسیستم مانند کنترل طبیعی آفات، گرده افشانی و چرخه مواد مغذی پیوند خورده است. همین عوامل، تولید کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار میدهند. این خدمات اکوسیستمی زمانی از دست میروند که چشم انداز کشاورزی از عناصر طبیعی خالی میشود

با این حال، تنها تغییر کاربری زمین نیست که تنوع زیستی را تهدید میکند؛ استفاده ی شدید از آفتکشها نیز حشرات مفید را تهدید میکند و در نتیجه منبع غذایی شکارچیان در سطوح بالاتر شبکه ی غذایی را کاهش میدهد. این اثر آبخاری موجودات غیرهدف را نیز از طریق استفاده از آفت کشها تهدید کرده و تعداد گردهافشانهای مفید را کاهش میدهد

1-2 از دست رفتن ماده آلی خاک

نوع و شدت کشت، تأثیر عمده ای بر از دست رفتن قابل توجه ماده آلی خاک دارد. نسبت بالای ماده آلی خاک، یکی از مهمترین شاخصهای حاصلخیزی خاک است و به افزایش عملکرد کشاورزی منجر میشود. در کشاورزی مدرن، بخش زیادی از ماده آلی خاک از بین میرود؛ بخشی از طریق فرسایش و بخشی دیگر از طریق استخراج ماده آلی از طریق برداشت محصولات یا برهمزدن خاک در اثر عملیات زراعی. عملکردهای بالا تنها از طریق افزودن کودهای شیمیایی سنتتیک امکانپذیر است

1-3 استفاده از آب

در اقلیم های خشک، عملکردهای بالای کشاورزی تا حد زیادی با آبیاری وسیع خاکها مرتبط است؛ وضعیتی که هنگام مبادله ی کالاهای کشاورزی، به تجارت «آب مجازی» میان کشورها منجر میشود. برخی از ارقام جدید محصولات، حتی به مقادیر بیشتری آب نیاز دارند. در بسیاری از مناطق، این آبیاری بیش از حد به شوری خاک و کاهش جدی ذخائر آب موجود منجر میشود. این توسعه خطرات قابل توجهی را به ویژه در موضوع تغییر اقلیم تحمیل میکند

1-4 انتشار گازهای گلخانه ای

در حال حاضر کشاورزی مسئول حدود یک چهارم انتشار خالص گازهای گلخانه ای است و بدین ترتیب سهم چشمگیری در تغییر اقلیم دارد. این امر ناشی از استفاده و تولید کودهای شیمیایی سنتتیک، استفاده از ماشین آلات وابسته به سوخت های فسیلی، تخریب خاک و دامپروری است. شواهد قوی وجود دارد که تغییر اقلیم به نوبه ی خود تأثیر منفی بر عملکردهای کشاورزی دارد و پیشبینی میشود این اثرها در آینده افزایش یابد

1-5 چرخه نیتروژن

استخراج نیتروژن از هوا با استفاده از فرآیند هابر-بوش، منجر به تولید مقادیر زیاد کودهای شیمیایی شده است. آثار این مداخله به طور فزاینده ای آشکار میشود. تا نیمی از نیتروژنی که به محیط وارد میشود به صورت ترکیبات NOx از دست میرود و به تغییر اقلیم کمک میکند. افزون بر این، مازاد نیتروژن نیز به حوضه های آبریز و آب های ساحلی رها میشود یا از طریق رواناب سطحی و فرسایش خاک از دست میرود. در بسیاری از موارد، هر دو فرایند منجر به یوتروفیکاسیون آبهای مجاور و آلودگی بیش از حد آب آشامیدنی به نیترات میشوند که خطرات جدی برای سلامت انسان به همراه دارد

1-6 فسفر

نه تنها استخراج و استفاده از فسفر به عنوان کود، چرخه فسفر زمین را دگرگون کرده است، بلکه جابه جایی سایر محصولات کشاورزی، مانند خوراک دام و محصولات زراعی نیز به افزایش ذخیره خالص فسفر در اکوسیستم های خشکی و آب های شیرین کمک می کند. یک مطالعه برآورد می کند که ذخیره فسفر قابل دسترس زیستی حداقل ۷۵٪ بیشتر از سطح ذخیره سازی دوره پیشاصنعتی است. مشابه نیتروژن، فسفر اضافی از طریق رواناب سطحی و نشت مواد مغذی، وارد جریان های آب خشکی و در نهایت به آب های ساحلی منتقل می شود. غنی شدن مصبها و آب های ساحلی با فسفر موجب افزایش شکوفه های سمی سیانوباکتری می شود. در عین حال، فسفات یک ماده مغذی محدودکننده رشد گیاه است و به صورت سنگ فسفات، منبعی غیرقابل تجدید به شمار می رود. توان استخراج آن احتمالاً در سال ۲۰۳۰ به اوج خواهد رسید، در حالی که قیمت استخراج در حال افزایش و کیفیت فسفات از هم اکنون رو به کاهش است. افزون بر این، فرآیندهای استخراج و پالایش، محصولات جانبی

سمی مانند فسفوژپسوم تولید می‌کنند و خود فسفات‌ها نیز با عناصر رادیواکتیو آلوده‌اند که هنگام استفاده به‌عنوان کود وارد خاک می‌شوند. برای نمونه، استفاده از کود فسفوری نه تنها توازن جهانی فسفر را تغییر می‌دهد، بلکه به آلودگی شیمیایی خاک و انباشت روزافزون ذخایر سمی فسفوژپسوم نیز کمک می‌کند؛ ذخایری که خطر نشت به آب‌های زیرزمینی را به‌دنبال دارند. تمام این عوامل خطر نابودی کارکردهای حیاتی اکوسیستم‌های زمین و تهدید عرضه غذایی انسان را در پی دارند. بنابراین، لازم است سیستم‌های کشاورزی دوباره طراحی شوند. به‌عنوان جایگزینی برای طراحی سیستم‌های بهره‌برداری از زمین، «اگرو اکولوژی» اغلب در علم مورد بحث قرار می‌گیرد و بسیاری از روش‌های آن به‌طور دقیق مطالعه شده‌اند. در مقابل، پرماکالچر به‌عنوان رویکرد دیگری که راه‌حل‌های پایدار برای تأمین منابع و کالاهای انسانی ارائه می‌دهد، تنها به‌طور حاشیه‌ای در ادبیات علمی مطرح شده است.

هدف نخست این مرور، تحلیل این موضوع است که پرماکالچر تا چه حد بر شواهد علمی استوار است. سپس بر همین اساس، هدف دوم ما شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌ها با اصول اگرو اکولوژیک است. در حوزه اگرو اکولوژی، کاربرد اصول به‌عنوان چارچوبی برای طراحی دوباره کشاورزی طی سال‌های اخیر شکل گرفته است. بنیان‌گذاران پرماکالچر چنین اصولی را از دهه ۱۹۸۰ مطرح کرده‌اند. این اصول به‌طور پیوسته بهبود یافته و سپس در طراحی سیستم‌های بهره‌برداری از زمین به‌کار گرفته شده‌اند. اگرچه این اصول به‌صورت مجموعه‌ای کامل هنوز به‌طور جامع بررسی نشده‌اند، بسیاری از مطالعات امکان ارزیابی هر اصل به‌طور جداگانه را در زمینه علمی فراهم می‌کنند. نشان داده می‌شود که با وجود کم‌رنگ بودن حضور پرماکالچر در دنیای علم، شواهدی وجود دارد که بیان می‌کند پرماکالچر پتانسیل مشارکت در گذار پایدار کشاورزی را دارد.

2- اگرو اکولوژی

اصطلاح «اگرو اکولوژی» زمانی وارد علم شد که مفاهیم بوم‌شناسی در دانش کشاورزی به‌کار گرفته شدند. برای حدود سه دهه، این واژه بیشتر برای اشاره به بوم‌شناسی سیستم‌های کشاورزی به‌کار می‌رفت؛ یعنی مطالعه خاک، گیاه، حشرات و تعامل میان آن‌ها. در نیمه دوم قرن گذشته و هم‌زمان با رشد کشاورزی ارگانیک، مفهوم اگرو اکولوژی نیز گسترش یافت. برخی پژوهشگران از آن برای ترویج تغییر پارادایم در کشاورزی استفاده کردند؛ تغییری از کشاورزی صنعتی و مبتنی بر انقلاب سبز به سوی کشاورزی پایدار و مبتنی بر اصول بوم‌شناختی. با این حال، برخی دیگر همچنان بر معنای اولیه آن یعنی مطالعه روابط بوم‌شناختی در کشاورزی تأکید داشتند.

امروزه اگرو اکولوژی به‌عنوان یک رشته علمی شناخته می‌شود که اصول، کارکردها و فرآیندهای بوم‌شناختی را در سیستم‌های کشاورزی بررسی می‌کند تا این سیستم‌ها پایدارتر شوند. علاوه بر جنبه علمی، کاربرد نتایج پژوهش در عمل سبب شده که اگرو اکولوژی به مجموعه‌ای از روش‌های کشاورزی تبدیل شود که هدف آن تنها تولید نیست، بلکه حفاظت از اکوسیستم نیز هست.

از آنجا که این رویکرد غالباً توسط کشاورزان خرد در سراسر جهان به‌کار گرفته می‌شود، به‌تدریج به یک جنبش اجتماعی نیز تبدیل شده است. این جنبش به دنبال ایجاد نظام غذایی عادلانه‌تر و پایدارتر است، به‌ویژه در کشورهای جنوب جهان. مفهوم اگرو اکولوژی نه تنها تولید، بلکه فرآوری، توزیع، مدیریت پسماند و همچنین سیاست‌های اجتماعی مشارکت‌محور را نیز در بر می‌گیرد. این ابعاد اجتماعی زمانی بیشتر مورد توجه قرار گرفت که پیامدهای منفی کشاورزی مدرن آشکار شد و نیاز به روش‌های جدید و پایدارتر محسوس گردید.

آخرین تفسیرهای اگرواکولوژی، تمام جنبه‌های مختلف را به رسمیت می‌شناسند و آن را به عنوان یک رشته علمی، کاربرد عملی و جنبش توصیف می‌کنند. برای شرح تفصیلی تاریخ اگرواکولوژی، می‌توان به منابع تخصصی رجوع کرد.

با توجه به کاربرد در زمینه‌های مختلف، باید چندمعنایی اگرواکولوژی پذیرفته شود. با این حال، وجه مشترک همه تعاریف در تأکید بر نظام کشاورزی‌ای است که با پایداری اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی سازگار باشد. در سطح اکولوژیکی، مسئله درباره روش‌های کشاورزی با نهاده کم است که از تولید، بازسازی و عملکردهای تنظیمی طبیعت حمایت می‌کند، به جای حفظ مداوم نظام‌هایی که برای استفاده از ماشین‌آلات و از طریق مقادیر زیاد انرژی خارجی بهینه‌سازی شده‌اند.

تلاش برای عدالت اجتماعی، مشارکت و خودمختاری، به‌ویژه در میان کشاورزان دهقانی و جامعه رو به رشد زنان کشاورز دهقانی، به‌طور گسترده‌ای با اگرواکولوژی مرتبط است. علاوه بر این، تعهد قوی برای استقلال اقتصادی کشاورزان دهقانی در جامعه اگرواکولوژیکی وجود دارد. شرکت‌های کشاورزی به‌طور ویژه تهدید وابستگی اقتصادی را تشدید می‌کنند، در حالی که کنشگران اگرواکولوژیکی تلاش می‌کنند بر منطق رشد اقتصادی و پول به‌عنوان اصل راهنمای عمل غلبه کنند. این اصل با عدالت اجتماعی و پایداری اکولوژیکی جایگزین می‌شود.

اصول اگرواکولوژی

امروزه اگرواکولوژی هنوز یک پدیده حاشیه‌ای است، حداقل در کشورهای صنعتی. حتی اگر گذار به سمت کشاورزی پایدار به‌شدت مورد نیاز باشد، وابستگی‌های مسیری و فقدان یا کُندی اقدامات سیاستی، اجرای آن را با مانع مواجه می‌کند. با این حال، حتی اگر این چالش‌های اجتماعی قابل غلبه باشند، تبدیل کشاورزی از یک نظام مدیریت تک‌محصولی با نهاده بالا به یک نظام متنوع با نهاده خارجی کم به یک چارچوب جامع نیاز دارد. گلیسمن ضرورت استفاده از فرآیندها و عملکردهای اکوسیستمی را به‌عنوان راهنما برای بازطراحی نظام‌های کشاورزی توضیح می‌دهد؛ زیرا صرفاً جایگزینی نهاده‌های خارجی با ابزارهای زیستی و افزایش بهره‌وری برای دستیابی به پایداری کافی نیست. رایج‌نیتس و همکاران پیشنهاد کرده‌اند که از مجموعه زیر از اصول اکولوژیکی استفاده شود:

۱- افزایش بازیافت زیست‌توده و بهینه‌سازی دسترسی به عناصر غذایی و متعادل‌سازی جریان عناصر

۲- تأمین شرایط مطلوب خاک برای رشد گیاه، به‌ویژه از طریق مدیریت ماده آلی و افزایش فعالیت زیستی خاک

۳- به حداقل رساندن تلفات ناشی از جریان تابش خورشیدی، هوا و آب از طریق مدیریت ریزاقلیم، برداشت آب و مدیریت خاک از طریق افزایش پوشش خاک

۴- تنوع‌بخشی گونه‌ای و ژنتیکی اگرواکوسیستم در زمان و مکان

۵- تقویت تعاملات و هم‌افزایی‌های زیستی مفید بین اجزای تنوع زیستی کشاورزی، در نتیجه ارتقای فرآیندها و خدمات اکولوژیکی کلیدی. برای آلتری و نیکولز، این اصول منجر به تکنیک‌های خاص اگرواکولوژیکی می‌شوند، مانند کشت مخلوط، تناوب زراعی، جنگل‌کاری کشاورزی، کشت پوششی و ادغام دام. علاوه بر این، طبق نظر برخی پژوهشگران، پایداری باید فراتر از شکل کشت به نظام‌های کشاورزی بپردازد:

-بهینه‌سازی استفاده از منابع محلی موجود با ترکیب اجزای مختلف نظام مزرعه؛

-کاهش استفاده از نهاده‌های خارج از مزرعه، خارجی و غیرقابل تجدید با بیشترین پتانسیل آسیب به محیط‌زیست یا آسیب به سلامت کشاورزان مصرف‌کنندگان؛

-تکیه اصلی بر منابع درون اگرواکوسیستم با جایگزینی نهاده‌های خارجی با بازیافت عناصر، حفاظت بهتر و استفاده گسترده‌تر از منابع محلی؛

-تلاش برای ارزش‌گذاری و حفاظت از تنوع زیستی، هم در حالت وحشی و هم در مناظر اهلی‌شده، و استفاده بهینه از پتانسیل زیستی و ژنتیکی گونه‌های گیاهی و حیوانی.

-بهبود تطابق بین الگوهای کشت و ظرفیت تولیدی و محدودیتهای محیطی

- بهره گیری حداکثری از دانش و شیوه های بومی از جمله رویکردهای نوآورانه ای که هنوز از سوی دانشمندان به خوبی درک نشده اند، هرچند به طور گسترده توسط کشاورزان به کار گرفته میشوند

در ارتباط با حفاظت از تنوع زیستی در چشم اندازهای تولیدی، فیشر و همکاران، راهبردهای الگو - محور و فرایند - محور را برای طراحی و مدیریت چشم اندازهای کشاورزی پیشنهاد کردند برای سیستم های یکپارچه زراعت - دام بوناودو و همکاران اصول طراحی را برای بهبود تاب آوری، خودکفایی، بهره وری و کارایی سیستم تولید پیشنهاد دادند. باید در نظر داشت که همه این مجموعه اصول، قرار نیست راه حلی فنی ارائه دهند که در هر مکان و هر زمان به طور تضمینی کار کند، بلکه ایده هایی هستند درباره اینکه چگونه میتوان با به کارگیری آنها در یک منطقه خاص، کارکردهای کلیدی اکوسیستمهای پایدار را تقویت کرد. روشهای عملی مشتق شده از کاربرد این اصول متفاوت اند و برای هر وضعیت، ویژگی های خاص خود را خواهند داشت. علاوه بر رهنمودهایی برای طراحی سیستم های کشت، مالیزیوکس یک چارچوب سه مرحله ای برای عمل ارائه میکند تا راهنمایی برای وارد کردن شیوه های جدید کشاورزی باشد گام ۱ مشاهده اکوسیستم طبیعی موجود گام ۲ توسعه و آزمون فنون جدید در آزمایشها گام ۳ به کارگیری فنون جدید توسط کشاورزان

۳- پرماکالچر

پرماکالچر مفهوم پرماکالچر از ترکیب دو واژه "permanent" و "agriculture" پدید آمده و هم یک سیستم طراحی و هم یک چارچوب بهترین شیوه ها را برای ایجاد و مدیریت اکوسیستم های پایدار و تاب آور توصیف میکند. هم بنیانگذار آن، دیوید هولمگرن پرماکالچر را چنین تعریف میکند: چشم اندازهایی که آگاهانه طراحی شده به گونه ای که الگوها و روابط موجود در طبیعت را تقلید کنند، در حالیکه فراوانی ای از غذا، الیاف و انرژی برای تأمین نیازهای محلی فراهم میآورند. اگرچه پرماکالچر به عنوان روشی برای کشاورزی پایدار آغاز شد، اما به مرور به یک فرایند طراحی کل نگر برای سیستم های پیچیده تبدیل شده و امروزه برای طراحی سیستم های اجتماعی نیز به کار گرفته میشود. پرماکالچر مدعی است که مفهومی برای طراحی سیستم های کاربری اراضی اجتماعی - بومشناختی پایدار است و اذعان میکند که سیستم های کاربری اراضی هرگز از سیستم های اجتماعی جدا نیستند. به همین دلیل، سه هنجار اخلاقی پایه تدوین شده که در طراحی و مدیریت سیستم های پرماکالچر باید آنها را در نظر گرفت: مراقبت از زمین مراقبت از انسانها و تعیین حد برای مصرف و افزایش مازاد بازتوزیع و جمعیت

مهمترین جنبه های پرماکالچر در برنامه ریزی اکوسیستمها عبارتند از ویژگی های سایت تعامل بین عناصر منفرد در سطوح مختلف، از کشت مخلوط در مقیاس مزرعه تا تنوع کاربری اراضی در مقیاس اکوسیستم، و آرایش فضایی عناصر به عنوان محرک های تعیین کننده برای چندکارکردی بودن. این ویژگیها فرایندها و کارکردهای طبیعی در چشم انداز را تقویت میکنند. تنوع کاربری اراضی در پرماکالچر بهصورت یک ادغام نزدیک بین سیستم های خشکی و آبی، دامپروری و زراعت با گیاهان یکساله و چندساله توصیف میشود. تقریباً هیچیک از روش هایی که در پرماکالچر به کار میرود، توسط خود این جنبش ابداع نشده است. بلکه میتوان پرماکالچر را یک چارچوب مفهومی برای ارزیابی و پذیرش روشهای موجود دانست. برای این منظور، دو معیار اصلی به کار گرفته میشود. نخست، تقلید از اکوسیستمهای طبیعی که به عنوان الگویی برای سیستم هایی عمل میکنند که ساختار و کارکرد مشابه دارند، اما از گونه هایی تشکیل شده اند که برای انسان محصول تولید می کنند دوم، بهینه سازی سیستم به این معنا که نقاط شروعی جست وجو میشود که در آن عملکرد محصولات مطلوب با حداقل تلاش به دست آید و کارکردها بتوانند حتی فراتر از حد اکوسیستمهای طبیعی بهبود یابند. این امر منجر به تمرکز بر کشتهای مخلوط و گونه های گیاهی چندساله

در سیستم های پرماکالچر میشود موضوعی که در ادبیات علمی نیز به طور فرایندهای مورد بحث قرار میگیرد. یکی از عناصر متمایز، فرایند طراحی پرماکالچر است این فرایند کل مسیر توسعه پروژه را، از نخستین مرحله مشاهده تا اجرا در بر میگیرد. در یک فاز تحلیلی روشهای متناسب با سایت انتخاب میشوند. فرایند طراحی پرماکالچر یک فرایند خطی نیست و روشهای مشاهده، تحلیل و طراحی به کار گرفته شده در آن باید از بروز خطاهای معمول در مواجهه با سیستم های پیچیده جلوگیری کنند به گفته فرگوسن و الول، این سیستم طراحی عمدتاً از اصول پرماکالچر و راهبردهای فضاییتشکیل شده است پرماکالچر به یک جنبش بین المللی با علاقه عمومی فراوان تبدیل شده است با این حال، پوشش پرماکالچر در ادبیات علمی بسیار کم است. کنشگران پرماکالچر معتقدند که دانشمندان و مؤسسات، پیشنهادهای رادیکالی را که پرماکالچر مطرح میکند، ارج نمینهند؛ در حالیکه از سوی دیگر، اعتبار کنشگران پرماکالچر به دلیل استفاده نامتعارف از اصطلاحات علمی یا انتشار ادعاهایی که از نظر علمی اثبات نشده اند، خدشه دار میشود

۳-۱- اصول پرماکالچر

پرماکالچر میکوشد سیستم های زنده تابآوری را ایجاد کند که از فرایندها، ساختارها و الگوهای مشاهده شده در طبیعت الهام گرفته اند. اصول طراحی ای شکل گرفته اند که به عنوان چارچوبی برای طراحی اکوسیستمهای پیچیده به کار میروند. برخی طراحان پرماکالچر مجموعه اصول ویژه خود را بسته به تمرکز کارشان توسعه داده اند رایجترین مجموعه اصول پرماکالچر توسط بنیانگذار آن، دیوید هولمگرن، توسعه یافته است این دوازده اصل به عنوان نتیجه تحلیل عمیق محیط طبیعی و جوامع پیشاصنعتی و پایدار، کاربرد نظریه اکوسیستم و تفکر طراحی ارائه میشوند. این اصول مدعی اند که چارچوبی برای طراحی کاربری اراضی پایدار و جامعه ای در محدوده های بومشناختی فراهم میکنند. اصول، گزاره های کوتاهی هستند که هنگام کار با سیستم های پیچیده جهتگیری کلی را نشان میدهند و مجموعه ای از گزینه های کنش را در اختیار قرار میدهند. شش اصل نخست، رویکردی از پایین به بالا دارند، در حالیکه شش اصل پایانی را میتوان از منظر یک طراح با رویکرد بالا به پایین نگریست. به همین دلیل، برخی همپوشانی ها میان اصول رخ میدهد. در فرایند طراحی، مهم است که تمرکز فقط بر یک یا چند اصل نباشد، بلکه مجموعه اصول به صورت یک کل در نظر گرفته شده و توازن درون سیستم ایجاد شود. اگرچه فرگوسن و الول جدایی پرماکالچر از علم را تشخیص داده اند [ما این فرضیه را مطرح میکنیم که شواهد علمی قدرتمندی برای هر یک از اصول منفرد وجود دارد که قابلیت به کارگیری آنها را در بازطراحی سیستم های کشاورزی به سوی پایداری تأیید میکند. در بخش بعد، همه دوازده اصل را از طریق مرور مطالعات علمی بررسی خواهیم کرد تا وجود شواهد علمی تأییدکننده این اصول را نشان دهیم. در مواردی که حجم یافته های علمی مرتبط بسیار گسترده است، تنها به چند نمونه منتخب اشاره میکنیم.

۳-۱-۱ اصل اول پرماکالچر (مشاهده و تعامل):

این اصل نمایانگر روشی است که در آن مشاهده و تعامل متناوب با یک سیستم مشخص، برای تولید دانش و تجربه درباره آن سیستم انجام میشود. رویکرد مدیریت علمی مرتبط با این اصل "مدیریت سازگار شونده" نام دارد که رویکردی نظام مند برای بهبود مدیریت منابع از طریق یادگیری از پیامدهای مدیریت است. بنابراین، چندین گزینه مدیریتی مختلف برای دستیابی به اهداف مشخص مدیریت اجرا میشود. پایش پاسخ سیستم به گزینه های مدیریتی، راهنمای تصمیم گیری برای تعدیل شیوه های مدیریت فراهم میآورد. مدیریت سازگار شونده، برای مثال، با موفقیت برای بررسی و بهبود کارایی طرح های زیست محیطی کشاورزی در حفاظت از corn bunting، با نام علمی *calandra Emberiza*، در بریتانیا به کار رفته است. نتایج شبیه سازی نشان میدهد که رویکرد مدیریت سازگار شونده در شرایط خشکسالی شدید در تاکستانها بهترین موازنه بین تولید کشاورزی و خدمات محیط زیستی را فراهم میکند. با این حال، این رویکرد با تأکید بر یادگیری مبتنی بر بازخورد برای مواجهه با پیشبینی ناپذیری و عدم قطعیتی که ذاتی همه اکوسیستمهاست، رویکرد جدیدی نیست. در برخی سیستم های مدیریت سنتی، جهتگیری مدیریت منابع با استفاده از دانش بومشناختی محلی برای تفسیر و پاسخ به بازخورد محیط هدایت میشود هرچند هنوز موانعی

مانند ضرورت حفظ پایش بلندمدت برای استقرار مدیریت سازگار شونده وجود دارد، پتانسیل بزرگ این رویکرد برای بهبود درک ما از فرایندهای بومشناختی مهمی که برای مدیریت مؤثر سیستم های زیستی لازم است، هم اکنون آشکار است. بررسی ها در سیستم های چرای دام نیز نشان میدهد که نبود مدیریت سازگار شونده در آزمایشهای علمی، توضیح میدهد که چرا آن آزمایشها نتوانستند اثرات مثبت گزارش شده توسط بهره برداران باتجربه را بازتولید کنند. با این حال، یک افزودنی مفید به این اصل، که فقط از مشاهده و تعامل تشکیل شده، مستندسازی و انتشار نتایج مشاهده شده است تا تضمین شود دانشی که تولید میشود، بتواند برای دیگرانی که با وضعیتهای مشابه مواجه اند، مفید باشد. نتایج پژوهشهایی که درباره مدیریت سازگار شونده انجام شده نشان میدهد که این رویکرد پتانسیل بهبود مدیریت کشاورزی، به ویژه برای تاب آوری اکولوژیکی را دارد. با این حال، برای اثبات اهمیت این اصل «مشاهده و تعامل» لازم است مزارعی که به طور سختگیرانه از این اصل پیروی میکنند، از نظر تابآوری اکولوژیکی و نیز بهره وری، به صورت علمی پایش و با مزارعی که از این اصل پیروی نمیکنند مقایسه شوند

۳-۱-۲ اصل دوم پرماکالچر (دریافت و ذخیره انرژی) :

این اصل به منابع مختلف انرژی میپردازد؛ مانند انرژی خورشیدی، آب، باد، زیست توده زنده و پسماندها. مطابق این اصل، انرژی باید تا حد امکان درون سیستم نگه داشته شود. این امر برای آن ضروری است که بتوان آن را تا حد ممکن طولانی و کارآمد استفاده کرد و کارکردهایی چون تعدیل رویدادهای حدی (buffering extreme events) را حفظ نمود. مهمترین ذخایر ارزش آینده خاک حاصلخیز با محتوای هوموس بالا، اگر سیستمهای چندساله؛ بهویژه درختان و ذخایر آب مانند آب زیرزمینی و water bodies هستند. یکی از روشهای دریافت و ذخیره انرژی به صورت آب، عناصر غذایی و ماده آلی، در حالیکه ذخیره موجود خاک حاصلخیز را محافظت میکند، استفاده از مالچ آلی است. کاربرد مالچ، کارایی ذخیره آب در خاک و نیز کارایی مصرف آب محصولات را به طور چشمگیر افزایش میدهد و در نتیجه، عملکرد محصولات را نیز بالا میبرد. کاربرد مالچ همچنین به افزایش محتوای ماده آلی خاک می انجامد و در نتیجه، زیست توده میکروبی، تنوع کارکردی میکروبی خاک و چرخه نیتروژن را تقویت میکند. محتوای بالاتر ماده آلی خاک به عملکردهای بالاتر و پایدارتر در کشاورزی منجر میشود. یکی از توضیحات این امر، ظرفیت بیشتر خاک های غنی از ماده آلی برای تعدیل تنش خشکی است. حاصلخیزی خاک مستقیماً به ماده آلی خاک پیوند خورده است. آزمایشها نشان میدهد که بدون حفظ چرخه طبیعی عناصر غذایی از طریق تجزیه litter و بدون کوددهی تکمیلی، کشاورزی تنها برای ۶۵ سال در چمنزارهای معتدل، برای شش سال در جنگل خارزار نیمه خشک مناطق گرمسیری و برای حداکثر سه سال در جنگل بارانی آمازون از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. همزمان، کاربرد مالچ نشان داده است که در جلوگیری از فرسایش خاک از طریق کاهش رواناب و افزایش نفوذ بسیار مؤثر است. دریافت و ذخیره آب باران در خاک را میتوان از طریق اقدامات برداشت آب باران (RWH) افزایش داد. این اقدامات شامل سازه های خطی روی خطوط تراز مانند بندها یا نوارهای علفی، تراسبندی، بندهای نیم دایره ای و حفر گودال است. این اقدامات عمدتاً به عبور از دوره های خشکسالی کمک میکند و در نتیجه، به افزایش امنیت غذایی و درآمد کشاورزان می انجامد. با این حال، اقدامات برداشت آب باران RWH همچنین خدمات اکوسیستمی مانند تغذیه آب زیرزمینی، بازیافت عناصر غذایی و تنوع زیستی را ارتقا میدهد. گنجاندن عناصر چوبی مانند درختان، درختچه ها و پرچینها در کشاورزی نیز، در کنار دیگر مزایا، نمونه ای از کاربرد این اصل است؛ از جمله از طریق ذخیره کربن. گزینه های مختلف land stewardship پتانسیل بالایی برای کاهش تغییر اقلیم دارند که در میان آنها، جنگلکاری مجدد بیشترین پتانسیل کلی را دارد و گنجاندن درختان در زمین های زراعی یکی از بالاترین پتانسیلها را برای کشاورزی و مراتع دارد. علاوه بر پتانسیل بسیار مورد نیاز برای کاهش تغییر اقلیم، این اقدامات مزایایی همچون فراهم کردن زیستگاه برای تنوع زیستی، بهبود کیفیت خاک و هوا و بهبود چرخه آب را نیز به همراه دارند

۳-۱-۳ اصل سوم پرماکالچر (به دست آوردن عملکرد)

سیستم های کشاورزی که با پرماکالچر طراحی و مدیریت میشوند باید محصول کافی به دست آورند و انسانها را با غذا، انرژی و منابع تأمین کنند. با این حال، این اصل همچنین بر کارایی تولید تأکید دارد، زیرا اگر مجبور باشیم تلاش، انرژی و منابع زیادی صرف کنیم تا محصولی به دست آوریم، عملکرد ما پایین است. افزون بر این، این اصل خواستار درکی کل نگرتر از عملکرد است؛ نه فقط عملکرد اقتصادی، بلکه عملکردهای بومشناختی و اجتماعی. تحلیل *emergy* یک روش حسابداری محیط زیستی فارغ از ارزشگذاری مبتنی بر مفهوم سیستم های کل نگر است که برای سنجش محصول اکوسیستمها، از منظر کارایی، مناسب است. انرژی، بنا بر تعریف هاوارد اودوم، مقدار انرژی در دسترس از یک نوع است که پیشتر برای ساخت یک محصول یا ارائه یک خدمت مصرف شده است. انرژی معمولاً با ژول انرژی خورشیدی (*sej*) اندازه گیری میشود و امکان محاسبه شاخصهای مختلف را فراهم میکند. نسبت بازده انرژی (*EYR*) اطلاعاتی درباره اینکه سیستم به ازای هر واحد ورودی از اقتصاد، چه میزان خروجی انرژی تولید میکند، فراهم میآورد، در حالی که شاخص تجدیدپذیری *REN* سهم انرژی خروجی را که از منابع یا خدمات طبیعی تجدیدپذیر فراهم شده است، نشان میدهد. پژوهشهای اخیر نشان میدهد سیستم های مدرن تولید غذا از نظر مصرف منابع و انرژی بسیار ناکارآمد هستند. تولید ذرت در ایالت متحده آمریکا، نسبت بازده انرژی تنها ۱,۰۷ با *REN* معادل ۵٪ داشته است در حالیکه *EYR* تولید خوک به شیوه متعارف حتی پایینتر و برابر ۱,۰۴ با *REN* معادل ۲۶٪ بوده است. بسیاری از روشهای مورد استفاده در پرماکالچر از بومیان سرچشمه گرفته اند، مانند اکوسیستمهای کشاورزی سنتی مایاها در مکزیک. این سیستمها در سه مرحله تولید، شامل محصولات زراعی، سپس درختچه ها و در نهایت درختان، چرخیده و دوباره به محصولات زراعی بازمی گردند. این چرخه، جانشینی طبیعی را هدایت می کند و قادر است از یک کشاورزی چندکشتی با ۶۰ گونه گیاهی، بدون نیاز به بذر، کود یا آفت کش، منابعی را تولید کند. برای شش سیستم مورد تجزیه و تحلیل، بازده انرژی (*EYR*) از ۴,۵ تا ۵۰,۷ و بازده نسبی (*REN*) از ۰,۷۲ تا ۰,۹۷ متغیر بوده است، که نشان دهنده سطح بالایی از پایداری است. با این حال، بهره وری زمین از نظر کالری تولیدی در این سیستمها، در مقایسه با تولید ذرت مدرن بسیار کمتر است. از آنجایی که این اصل همچنین خواستار تولید محصول برای تغذیه مردم است، باید ترکیبی از کارایی، پایداری و بهره وری زمین حاصل شود. با این حال، این ترکیب احتمالاً دشوارترین بخش در سیستمهای اکرواکولوژیکی است، حداقل در مقایسه با تولید کشاورزی مدرن و صنعتی. در نگاه اول، این به نظر تأییدی بر رویکرد «اشتراک گذاری زمین» است. با این حال، پرماکالچر یک سیستم طراحی وابسته به مکان و زمینه است. بنابراین، ما نتیجه می گیریم که بسته به زمینه مزرعه و/یا منطقه، اینکه کدام رویکرد «اشتراک گذاری زمین»، «قلمروسازی» یا ترکیبی از هر دو، مطلوب تر است، بستگی دارد تا به هدف اطمینان از تاب آوری کل سیستم، ضمن تولید غذای کافی، دست یافت. فراخوان برای درک جامع تر از بازده مرتبط با این اصل، با مفهوم خدمات اکوسیستم قابل مقایسه است. دانشمندان تلاش می کنند از این مفهوم برای ارزش گذاری خدمات اکولوژیکی و فرهنگی استفاده کنند تا قدردانی از خدمات رایگان طبیعت را پیش ببرند. بدین ترتیب، درک جامع از بازده اکوسیستمها نیز مورد نیاز است. این اصل به ویژه حیاتی است زیرا خواستار بازده کافی محصولات کشاورزی ضمن حفظ کارایی بالا از نظر مصرف منابع و انرژی، و همچنین «بازده» اکولوژیکی و اجتماعی است. برای بررسی بیشتر این اصل، تحقیقات باید انجام شود، از جمله ارزیابی بهره وری زمین در پرماکالچر یا سیستمهای مشابه. این امر برای ارزیابی اینکه آیا چنین سیستمهایی، علاوه بر بهبود عملکرد اکولوژیکی، پتانسیل تغذیه جمعیت رو به رشد جهان را دارند، حیاتی است

۴.۱.۳. اصل چهارم پرماکالچر: اعمال خودتنظیمی و پذیرش بازخورد

هدف پرماکالچر، ایجاد سیستمهایی است که تا حد امکان پایدار و خودتنظیم باشند. بازخورد مثبت، رشد و تجمع انرژی را در سیستمهای کشاورزی تسریع می کند. این بهترین استفاده را در فاز اولیه دارد. بازخورد منفی، که مهم تر است، سیستم را در برابر بی ثباتی یا کمبود ناشی از استفاده نادرست یا بیش از حد محافظت می کند. علاوه بر این، هر عنصر در یک سیستم کاربری زمین باید تا حد امکان متکی به خود باشد تا انعطاف پذیری در برابر اختلالات افزایش یابد

تقویت خدمات اکوسیستمی تنظیم‌کننده، مانند کنترل طبیعی آفات، گرده‌افشانی، چرخه مواد مغذی، و تنظیم کیفیت خاک و آب، رایج‌ترین کاربردهای این اصل هستند. تقویت بازخوردهای تثبیت‌کننده در سیستم‌های اکولوژیکی، مانند آن‌هایی که خدمات اکوسیستمی را تنظیم می‌کنند، به حفظ یک رژیم مطلوب و پایدار از اکوسیستم کمک کرده و استحکام آن را در برابر استرس‌های خارجی، مانند تغییرات آب و هوایی، افزایش می‌دهد.

در مورد گرده‌افشانی حشرات، این خدمت اکوسیستمی به‌طور مشترک مسئول یک محصول پایدار (با تغییرات کم) در محصولات وابسته است. افزایش نزدیکی و اشتراک‌گذاری زیستگاه‌های طبیعی می‌تواند یکی از راه‌های اعمال خودتنظیمی باشد، زیرا پایداری زمانی و مکانی (قابلیت پیش‌بینی بالا و تنوع کم در طول روز و بین گیاهان، به ترتیب) سرویس گرده‌افشانی را افزایش می‌دهد. در مورد گرده‌افشانی حشرات، این خدمت اکوسیستمی به‌طور مشترک مسئول یک محصول پایدار (با تغییرات کم) در محصولات وابسته است. افزایش نزدیکی و اشتراک‌گذاری زیستگاه‌های طبیعی می‌تواند یکی از راه‌های اعمال خودتنظیمی باشد، زیرا پایداری زمانی و مکانی (قابلیت پیش‌بینی بالا و تنوع کم در طول روز و بین گیاهان، به ترتیب) سرویس گرده‌افشانی را افزایش می‌دهد. معرفی مجدد زیستگاه‌های غنی از گل به اکوسیستم کشاورزی، اقدام دیگری برای اعمال خودتنظیمی از طریق تقویت خدمات اکوسیستمی تثبیت‌کننده کنترل طبیعی آفات است. نوارهای گل وحشی چندساله و گونه‌غنی توانسته‌اند کنترل طبیعی آفات را تقویت کرده و در نتیجه، عملکرد مزارع گندم مجاور را ۱۰٪ افزایش دهند.

معرفی مجدد زیستگاه‌های غنی از گل به اکوسیستم کشاورزی، اقدام دیگری برای اعمال خودتنظیمی از طریق تقویت خدمات اکوسیستمی تثبیت‌کننده کنترل طبیعی آفات است. نوارهای گل وحشی چندساله و گونه‌غنی توانسته‌اند کنترل طبیعی آفات را تقویت کرده و در نتیجه، عملکرد مزارع گندم مجاور را ۱۰٪ افزایش دهند. کاهش نیاز به استفاده از آفت‌کش‌ها منجر به تأثیر کمتر بر تنوع زیستی شده و از این طریق، ثبات اکوسیستم را از طریق خدمات اکوسیستمی مرتبط با تنوع زیستی، مانند گرده‌افشانی و کنترل آفات، دوباره افزایش می‌دهد. همزمان، وابستگی مزرعه به مواد شیمیایی کشاورزی کاهش یافته و خود مزرعه متکی به خودتر می‌شود.

۵.۱.۳. اصل پنجم پرماکالچر: استفاده و ارزش‌گذاری منابع و خدمات تجدیدپذیر

استفاده از منابع و خدمات تجدیدپذیر برای توقف بهره‌برداری از منابع غیرتجدیدپذیر، که در درازمدت عملکرد کل سیستم را تضعیف می‌کند، ضروری است. گیاهان می‌توانند به عنوان منبع انرژی، مصالح ساختمانی و بهبوددهنده خاک مورد استفاده قرار گیرند، در حالی که مثال‌هایی برای حیوانات شامل سگ‌های گله، حیوانات برای شخم زدن زمین و حیوانات بارکش است. این اصل همچنین شامل استفاده از منابع وحشی (ماهی، شکار، چوب) است که باید به طور پایدار استفاده شوند تا تجدیدپذیری این منابع حفظ شود. در مجموع، این اصل بر به حداکثر رساندن استفاده و عملکرد خدمات اکوسیستم تمرکز دارد. یکی از مثال‌های خوب بررسی شده برای این اصل، استفاده از گیاهان تثبیت‌کننده نیتروژن (حبوبات) یا کود حیوانی به جای کود نیتروژن معدنی است. اولاً، کود نیتروژن معدنی ۴۰ تا ۶۸ درصد از تقاضای انرژی مزرعه را تأمین می‌کند و در نتیجه سهم بزرگی در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی ناشی از سیستم‌های کشاورزی دارد. در مقابل، تقاضای انرژی برای تثبیت نیتروژن توسط حبوبات توسط تابش خورشید تأمین می‌شود و کود حیوانی به عنوان محصول جانبی در دسترس است. همزمان، کود حیوانی و سیستم‌های مبتنی بر حبوبات، تاب‌آوری بیشتری در برابر تنش خشکی و همچنین افزایش ذخایر کربن خاک نشان می‌دهند. کود حیوانی همچنین به عنوان منبعی تجدیدپذیر برای توقف کاهش ریزمغذی‌های خاک پیشنهاد شده است، که این موضوع در حال حاضر با سوءتغذیه جمعیت در برخی مناطق جهان درهم تنیده است. باید در نظر داشت که در مورد این جایگزین‌های کود معدنی، مصالحه وجود دارد. حبوبات در صورتی که فقط برای جایگزینی کود استفاده شوند و به عنوان محصول برداشت نشوند، کارایی استفاده از زمین را کاهش می‌دهند. در درازمدت، کود حیوانی تنها زمانی تجدیدپذیر است که تولید دام، از جمله تولیدخواراک، صرفاً بر اساس منابع تجدیدپذیر باشد. مسائل دیگر مربوط به کود حیوانی در بخش ۶.۱.۳ مورد بحث قرار گرفته است.

ارائه‌دهندگان خدمات تجدیدپذیر دیگر مرتبط با این موضوع، قارچ‌های میکوریزی هستند. قارچ‌های میکوریزی با کوددهی آلی فراوان‌ترند، در حالی که کوددهی نیتروژن معدنی تنوع قارچ‌های میکوریزی را کاهش می‌دهد. میکوریزا جذب آب و مواد مغذی گیاهان را افزایش داده و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را، به‌ویژه در شرایط خشکی، بهبود می‌بخشد.

نتایج علمی کمی در مورد حیوانات کار به عنوان منابع تجدیدپذیر وجود دارد. بیشتر آن‌ها حیوانات بارکش در کشورهای جنوب جهانی را مورد بررسی قرار می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که مصرف اولیه انرژی هنگام استفاده از گاو برای شخم زنی در مقایسه با تراکتورها کمتر است. با این حال ما شواهد علمی کافی برای مقایسه کار حیوانات با ماشین‌آلات در کشاورزی پیدا نکردیم. مسائل مهمی که باید بر اساس این مقایسه مورد بررسی قرار گیرند عبارتند از: بهره‌وری انرژی و مصرف منابع، بهره‌وری نیروی کار، و اثرات زیست‌محیطی، مانند فرسایش خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای

۳-۱-۶- اصل ششم پرماکالچر: عدم تولید زباله

این اصل با تقلید از الگوی طبیعی تبادل و چرخه ماده و انرژی، هدف‌گذاری می‌کند. در سیستم‌های زنده طبیعی، هیچ زباله‌ای تولید نمی‌شود، زیرا هر خروجی یک عنصر (یک گونه) توسط عنصر دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل، زباله را می‌توان به عنوان خروجی‌ای دید که توسط سیستم استفاده نمی‌شود. بر این اساس، تمام زباله‌ها باید به عنوان منبعی دیده شوند که باید برای حداکثر کارایی مورد استفاده قرار گیرند.

مهم‌ترین نمونه برای این اصل در کشاورزی مدرن، احتمالاً کود حیوانی است. از طریق جداسازی تولید گیاهی و حیوانی در کشاورزی صنعتی، کود حیوانی به زباله و مشکل تبدیل شده است. این امر به دلیل سیستم‌های عظیم تولید حیوانات است که در برخی مناطق متمرکز شده‌اند، در حالی که خوراک، بسته به ورودی کود، در مناطق دیگر تولید می‌شود. از طریق کاربرد زمینی، مقدار زیاد کود حیوانی تولید شده در برخی مناطق منجر به مشکلات زیست‌محیطی می‌شود، مانند یوفیکاسیون (شکوفایی جلبکی) آب‌های زیرزمینی و سطحی، تجمع فلزات سنگین در لایه‌های بالایی خاک، و انتشار آمونیاک، گازهای گلخانه‌ای و بوهای نامطبوع. با این حال، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که در مناطق دیگر و در خشکی با تراکم کمتر، استفاده از کود حیوانی فواید زیادی دارد. این یک منبع ارزشمند برای افزایش در دسترس بودن مواد مغذی گیاهی (از جمله ریزمغذی‌ها)، ظرفیت نگهداری آب، ساختار خاک، محتوای مواد آلی، و ذخیره کربن است. حتی اگر کود حیوانی در نرخ‌های معقول در زمین‌های کشاورزی استفاده شود، ذخیره‌سازی و حمل و نقل همچنان می‌تواند باعث مشکلات زیست‌محیطی، مانند انتشار آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای شود. با طراحی سیستم‌های کشاورزی کوچک‌تر و یکپارچه (به بخش‌های ۸.۱.۳ و ۹.۱.۳ مراجعه کنید)، کود حیوانی می‌تواند خاصیت زباله بودن خود را از دست بدهد و در عین حال کیفیت بالای خاک و حاصلخیزی آن را حفظ کند. حتی مهم‌تر از آن، مقدار زیاد زباله ناشی از فضولات انسانی است. فضولات انسانی منبع ارزشمندی از مواد مغذی مورد نیاز در تولید کشاورزی است. استفاده از فضولات انسانی به عنوان کود هنوز در بخش‌هایی از جهان، به عنوان مثال در ویتنام، رایج است. ادرار به خصوص ارزشمند است زیرا ۵۰ تا ۹۰ درصد مواد مغذی فضولات انسانی را در خود دارد. همچنین دارای کیفیت بهداشتی بالایی است زیرا فقط حاوی تعداد کمی میکروارگانیسم روده‌ای است. برای بهبود کیفیت بهداشتی مدفوع انسانی، یک عمل رایج کمپوست کردن فضولات انسانی است که می‌تواند به شدت باکتری‌های بیماری‌زا و انگل‌ها را کاهش دهد. با این حال، کاربرد زمینی فضولات انسانی همچنان یک موضوع حساس است زیرا هنوز شواهد کافی در مورد سرنوشت عوامل درمانی وجود ندارد. بسیاری از نمونه‌های دیگر استفاده از محصولات جانبی و زباله در کشاورزی مستند شده است. تغذیه ۱۰٪ تفاله انگور خشک شده، عملکرد رشد و شاخص‌های سلامتی بره‌های نر را افزایش می‌دهد. ضایعات سبزیجات و میوه‌ها که در مقادیر زیاد در تولید صنعتی رخ می‌دهند نیز می‌توانند به عنوان خوراک دام استفاده شوند.

۳-۱-۷- اصل هفتم پرماکالچر: طراحی از الگوها به جزئیات

اکوسیستم‌های طبیعی باید به عنوان الگوهایی برای استفاده پایدار از زمین مورد استفاده قرار گیرند، زیرا اکوسیستم‌های طبیعی در طول زمان طولانی تکامل یافته‌اند تا تحت شرایط محیطی خاصی عمل کنند.

علاوه بر این، الگوهای منظره، مانند ژئومورفولوژی (ریخت‌شناسی زمین)، حوضه‌های آبریز، و روش‌هایی مانند منطقه‌بندی و بخش‌بندی باید در طراحی پرماکالچر برای برنامه‌ریزی مؤثر سایت مورد استفاده قرار گیرند.

در ادبیات علمی، این اصل به عنوان "تقلید از اکوسیستم طبیعی" شناخته می‌شود. الگوها/مدل‌های اصلی قابل استفاده برای اکوسیستم‌های کشاورزی عبارتند از: چمنزارها، مانند ساوانا یا دشت، جنگل‌های خشک، و جنگل‌های بارانی استوایی. مناطق وسیعی از زمین به طور طبیعی برای کشاورزی خیلی سرد یا خیلی خشک هستند. این‌ها مناطقی هستند که چمنزارهای طبیعی در آن‌ها یافت می‌شوند زیرا آب و هوا برای درختان نیز مناسب نیست. الگوی طبیعی یافت شده در اینجا، چمنزارهایی است که توسط گله‌های بزرگ حیوانات چرنده قطع شده‌اند. استراتژی در اینجا استفاده از چرندگان بر روی پوشش گیاهی طبیعی و برداشت آن‌ها برای گوشت (مانند گاو، گوسفند، بز) یا متابولیت‌های آن‌ها (مانند شیر) است. برخی نویسندگان کاربرد الگوی طبیعی گله‌های متراکم و در حال حرکت مداوم از طریق چرای چند-مرتعی، چرخی، سلولی یا گله‌ای را برای جلوگیری از بیابان‌زایی از طریق چرا پیشنهاد می‌کنند. مناطقی که خشک هستند، اما قادر به نگهداری برخی درختان هستند، معمولاً زیستگاه سیستم‌های ساوانا مانند هستند. علاوه بر چرندگان (یا در برخی موارد محصولات زراعی)، درختان برای حفظ عملکرد اکوسیستم، مانند تعادل هیدرولوژیکی مشابه جنگل‌های خشک، گنجانده می‌شوند در مناطق معتدل، جنگل‌ها ممکن است با ترکیب محصولات چوبی دائمی، مانند درختان آجیل و میوه، با انواع مختلف حیوانات، مانند گاو، گوسفند، طیور و خوک، به عنوان الگو برای آگرو اکوسیستم‌ها استفاده شوند.

همچنین مناطقی وجود دارند که برای کشاورزی خیلی مرطوب هستند، یعنی مناطق پست استوایی مرطوب. پیچیدگی تغذیه‌ای زیست‌بومی محلی (شامل آفات) و شستشوی مواد مغذی، مناسب بودن کشاورزی را محدود می‌کند. استراتژی در اینجا افزایش بهره‌وری قابل استفاده ضمن حفظ ساختار طبیعی با ایجاد جنگل‌های کشاورزی متنوع و پیچیده از نظر ساختاری است که عمدتاً حاوی گونه‌های دائمی هستند، همانطور که برای قرن‌ها توسط مردم محلی با موفقیت انجام شده است. برای استراتژی‌های برنامه‌ریزی دیگر، مانند منطقه‌بندی و بخش‌بندی، هیچ شواهد علمی یافت نشد. تحقیقات بیشتری باید انجام شود تا بررسی شود که آیا این استراتژی‌های برنامه‌ریزی منجر به بهره‌وری نیروی کار بالاتر از طریق بهبود لجستیک مزرعه، و همچنین عملکرد و تاب‌آوری بالاتر عناصر کشاورزی از طریق موقعیت‌یابی خاص سایت می‌شوند یا خیر.

۳-۱-۸- اصل هشتم پرماکالچر: ادغام به جای جداسازی

تعاملات بیولوژیکی، به ویژه تعاملات همزیست، باید برای افزایش بهره‌وری و پایداری آگرو اکوسیستم و ایجاد اثرات هم‌افزایی مورد استفاده قرار گیرند. ادغام عناصر امکان استفاده از چندکارکردی عناصر را فراهم می‌کند، مانند مرغ برای کنترل آفات هنگامی که در یک سیستم باغ ادغام می‌شود. ادغام همچنین اجازه می‌دهد تا عملکردهای مهم یک سیستم از طریق چندین عنصر حفظ شود، مانند مرغ و درختان میوه که هر دو عملکرد تولید غذا را پوشش می‌دهند. این امر از طریق کنترل آفات یکپارچه منجر به پایداری بالاتر آگرو اکوسیستم و تاب‌آوری اقتصادی بالاتر می‌شود، زیرا بازده به دو منبع توزیع می‌شود. این مزایای ادغام مجدد عناصر در کشاورزی، به ویژه محصولات زراعی و دام، در ادبیات علمی نیز ترویج شده است. این ادغام محصولات زراعی و دام برای کمک به غلبه بر دوگانگی بین افزایش تولید کشاورزی و اثرات زیست‌محیطی منفی پیشنهاد شده است. این امر از طریق تنظیم بهتر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، افزایش تنوع زیستگاه و شبکه‌های تغذیه‌ای، و تاب‌آوری بیشتر سیستم در برابر خطرات و بلایای ناشی از تغییرات اجتماعی-اقتصادی یا آب و هوایی حاصل می‌شود. مطالعات موردی از فرانسه و برزیل نشان می‌دهند که افزایش تعاملات بین زیرسیستم‌ها، وابستگی به ورودی‌های خارجی را کاهش داده و کارایی مزرعه را افزایش داده است، که منجر به عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی خوب و افزایش تاب‌آوری در برابر شوک‌های بازار شده است. مطالعاتی از ایالات متحده نشان می‌دهد که ادغام دام در سیستم‌های زراعت ذرت از طریق مراتع فصلی سرد، شاخص‌های کیفیت خاک مانند مواد آلی و محتوای مواد مغذی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد در استرالیا، استفاده دوگانه از غلات و کانولا برای علوفه در مرحله رویشی و سپس برداشت برای دانه پس از آن، انجام می‌شود. این امر مزایای مدیریت ریسک را فراهم می‌کند، خواص خاک را بهبود می‌بخشد و قادر است تولیدات دامی و زراعی مزارع را با افزایش اندکی در ورودی‌ها، ۲۵ تا ۷۵

درصد افزایش دهد. علاوه بر این، یافته‌هایی از آسیا نشان می‌دهد که ادغام ماهی در سیستم‌های زراعت برنج از طریق بهبود تنظیم علف‌های هرز و آفات، افزایش در دسترس بودن مواد مغذی، و بهبود جریان آب، باعث افزایش بازده محصولات می‌شود، ضمن اینکه ماهی را بدون خوراک یا کود اضافی تولید می‌کند. علاوه بر این، یک فراتحلیل پتانسیل قوی تنوع‌بخشی محصولات در داخل مزرعه (کشت مخلوط) را برای روابط برد-برد بین بازده یک گونه محصول متمرکز و کنترل بیولوژیکی آفات محصولات شناسایی کرده است.

مطالعه اخیر بر روی ۳۵ مزرعه پرماکالچر که خود را معرفی کرده‌اند در ایالات متحده نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها به کشت مخلوط سالانه و دائمی، ادغام محصولات دائمی و حیوانی یا حتی ادغام تولید و خدمات مانند آموزش متکی هستند.

۹.۱.۳. اصل نهم پرماکالچر: استفاده از راه‌حل‌های کوچک و کند

این اصل از یک الگوی بنیادی موجود در موجودات زنده نشأت می‌گیرد: طراحی سلولی. وظایف در کوچک‌ترین سطح ممکن پوشش داده می‌شوند، در حالی که وظایف در مقیاس بزرگ‌تر از طریق تکثیر و تنوع حاصل می‌گردند. این اصل این فرض را در بر می‌گیرد که سیستم‌های کوچک مقیاس به‌طور بالقوه شدیدتر و پربارتر هستند (مانند باغبانی در مقیاس کوچک یا باغبانی برای خودکفایی)، در حالی که سیستم‌های کندرشد به‌طور بالقوه پایدارتر و مؤثرتر هستند (مانند سیستم‌های مبتنی بر درخت). مزارع کوچک (۱-۲ هکتار) ۱۲٪ و حتی مزارع خانوادگی کوچک‌تر (کمتر از ۱ هکتار) ۷۲٪ از اراضی کشاورزی جهان را زیر کشت می‌برند و بنابراین تغذیه بخش بزرگی از جمعیت جهان را تأمین می‌کنند. در ادبیات علمی، رابطه بین اندازه‌مزرعه و بهره‌وری زمین (خروجی در واحد سطح) به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. یک رابطه معکوس بهره‌وری-اندازه، که بیان می‌کند مزارع کوچک‌تر در واحد سطح پربارتر هستند، در آفریقا، آسیا، اروپا و آمریکای لاتین مشاهده شده است. مزارع کوچک‌تر و در نتیجه ابعاد کوچک‌تر زمین، منجر به افزایش تعداد لبه‌های زمین می‌شوند که اثرات مفیدی را القا می‌کند که با اصل ۱۱ مورد بحث قرار خواهد گرفت.

سیستم‌های کشاورزی مدرن از طریق اثرات نامطلوب تولید صنعتی فشرده، مانند فرسایش خاک، تغییرات اقلیمی و از بین رفتن تنوع زیستی، عملکرد اکوسیستم را تضعیف می‌کنند. سیستم‌های جنگل‌کاری کشاورزی (Agroforestry) نسبت به کشاورزی مدرن، کندتر رشد می‌کنند و چند سال طول می‌کشد تا به بهره‌وری و سودآوری کامل برسند. با این حال، از طریق حفظ خدمات اکوسیستم، مانند کنترل فرسایش، کاهش تغییرات اقلیمی، تنوع زیستی و حاصلخیزی خاک، عملکرد اکوسیستم را حفظ می‌کنند. در عین حال، سیستم‌های جنگل‌کاری کشاورزی به‌عنوان مقاوم‌تر در برابر تغییرات اقلیمی پیشنهاد شده‌اند. در بلندمدت، سیستم‌های جنگل‌کاری کشاورزی پتانسیل دارند که حتی پربارتر از سیستم‌های صرفاً کشاورزی باشند. استفاده از کود حیوانی یا حبوبات به عنوان کود، نمونه دیگری از یک راه‌حل کندتر در مقایسه با در دسترس بودن سریع مواد مغذی از کودهای مصنوعی یا معدنی است. مطالعات بلندمدت نشان می‌دهد که چند سال طول می‌کشد تا سیستم‌های کوددهی شده با کود حیوانی یا حبوبات (در این مورد ذرت) به بهره‌وری قابل مقایسه‌ای با سیستم‌های کوددهی شده با کودهای معدنی برسند. با این حال، در نهایت، سیستم‌های کوددهی شده با کود حیوانی و حبوبات در برابر خشکسالی مقاوم‌تر بودند و بازده خود را در سال‌های خشکسالی حفظ کردند.

همانطور که در بالا ذکر شد (بخش ۳.۱.۶)، استفاده از کود حیوانی همچنین کیفیت و حاصلخیزی خاک را حفظ و بهبود می‌بخشد.

از آنجایی که این اصل به راه‌اندازی و توسعه مزرعه نیز می‌پردازد، بررسی اقتصادی اینکه آیا مزارع کوچک و با رشد کند از نظر اقتصادی پایدارتر هستند، ضروری است. نتایج اخیر یک مطالعه موردی در فرانسه نشان می‌دهد که امکان کسب درآمد از کشاورزی برای یک نفر با ورودی نسبتاً کم (مانند عدم استفاده از موتور) در ۰.۱ هکتار با استفاده از پرماکالچر وجود دارد.

این اصل بر این فرض استوار است که تنوع یکی از پایه‌های سازگاری و پایداری اکوسیستم‌ها است. به همین دلیل، در کشاورزی نیز باید تنوع زیستگاه و ساختار، و همچنین تنوع سنی، گونه‌ای، واریته‌ای و ژنتیکی حفظ شود.

بسیاری از خدمات اکوسیستمی که عملکرد کشاورزی ما را حفظ می‌کنند، به تنوع زیستی مرتبط هستند. یک تحلیل فراگیر (meta-analysis) نشان می‌دهد که افزایش تنوع زیستی، در بسیاری از موارد گونه‌های گیاهی، اثرات مثبتی بر بهره‌وری از نظر فراوانی تولیدکننده و مصرف‌کننده، کنترل فرسایش از طریق افزایش زیست‌توده ریشه گیاهان، چرخه مواد مغذی از طریق افزایش فراوانی میکوریز و فعالیت تجزیه‌کننده‌ها، و پایداری اکوسیستم از طریق افزایش مصرف و مقاومت در برابر هجوم (تهاجم گونه‌های مهاجم) دارد. همچنین نشان داده شده است که افزایش تنوع گرده‌افشان‌ها اثرات مثبت قابل توجهی بر بازده محصولات مختلف وابسته به گرده‌افشانی دارد. تنوع زیستگاه، از نظر پیچیدگی چشم‌انداز، اثرات مثبتی بر کنترل بیولوژیکی آفات دارد. به عنوان مثال، افزایش تنوع زیستگاه و گیاهان گلدار از طریق نوارهای گل وحشی مصنوعی می‌تواند با افزایش کنترل بیولوژیکی آفات، بازده را در مزارع گندم مجاور تا ۱۰٪ افزایش دهد.

آگاهی فزاینده از اهمیت این اصل - استفاده و ارزش گذاری بر تنوع - همچنین در توسعه سیستم‌های کشاورزی متنوع دیده می‌شود. سیستم‌های کشاورزی متنوع از شیوه‌های توسعه‌یافته از طریق دانش علمی سنتی و/یا کشاورزی زیست‌محیطی استفاده می‌کنند تا عمداً تنوع زیستی کاربردی را در مقیاس‌های فضایی و/یا زمانی متعدد بگنجانند. چندین مطالعه نشان می‌دهند که این تلاش‌ها در افزایش تنوع زیستی کشاورزی و در نتیجه خدمات اکوسیستمی، مانند کیفیت خاک، جذب کربن، ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های سطحی، گرده‌افشانی، کنترل آفات، بهره‌وری انرژی، و مقاومت و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی، موفقیت‌آمیز هستند.

مطالعه ذکر شده در مورد ۳۶ مزرعه خودشناس پرماکالچر در ایالات متحده نیز نشان می‌دهد که علاوه بر تنوع بخشیدن به سیستم کشاورزی، این اصل برای ایجاد تنوع بالای درآمد نیز استفاده می‌شود. این مطالعه اثرات مثبت قابل توجهی از تنوع تولید بر بهره‌وری نیروی کار را نشان داد، احتمالاً از طریق هم‌افزایی تولید.

۳-۱-۱۱- اصل یازدهم پرماکالچر: استفاده از لبه‌ها و ارزش گذاری بر حاشیه

لبه‌ها (مناطق برخورد دو اکوسیستم یا عنصر) پتانسیل بیشتری برای تنوع و بهره‌وری دارند، زیرا منابع و کارکردهای هر دو اکوسیستم مجاور در آن‌ها حضور دارند. همانند سیستم‌های جنگل‌داری کشاورزی (agroforestry)، می‌توان این نواحی لبه‌ای را به طور عمدی افزایش داد تا از این اثر بهره برد. نواحی لبه‌ای همچنین می‌توانند به عنوان جداسازی مناسب عناصر طراحی شوند، مانند نوارهای چوبی بین مراتع. این اصل همچنین با هدف ارزش‌گذاری بر حاشیه‌ها به دلیل مزایا و کارکردهای اغلب نامرئی آن‌ها، به جای تلاش برای به حداقل رساندن آن‌ها، به کار می‌رود.

نتایج علمی اخیر نشان می‌دهد که افزایش ناهمگونی پیکربندی زمین‌های کشاورزی (چگالی بالاتر مرزهای مزرعه) از طریق افزایش فراوانی زنبورهای وحشی و بهبود مجموع بذر گیاهان‌آزمایشی، احتمالاً به دلیل افزایش اتصال‌پذیری (connectivity)، خدمت اکوسیستمی گرده‌افشانی را افزایش می‌دهد. بررسی‌ها در منطقه پرده آهنین سابق در آلمان، جایی که شرق به سمت کشاورزی در مقیاس بزرگ روی آورد در حالی که غرب کشاورزی در مقیاس کوچک را با بیش از ۷۰٪ مرزهای مزرعه طولانی‌تر حفظ کرد، نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. در این منطقه، تنوع زیستی بالاتری در منطقه با کشاورزی در مقیاس کوچک یافت شد، در حالی که غنای گونه‌ای و فراوانی نیز در لبه‌های مزرعه در مقایسه با داخل مزارع بالاتر بود، که نشان‌دهنده ارتباط بین افزایش تنوع زیستی و چگالی لبه‌های مزرعه است.

فراتر از چگالی لبه‌های مزرعه، حاشیه‌های مزرعه که اغلب به عنوان مناطق غیرمولد دیده می‌شوند، در حفظ خدمات اکوسیستمی نیز اهمیت زیادی دارند. حاشیه‌ها میزبان طیف وسیعی از جانوران مرتبط هستند که برخی از آن‌ها ممکن است گونه‌های آفت باشند، در حالی که بسیاری از آن‌ها مفیدند، چه به عنوان گرده‌افشان محصولات و چه به عنوان شکارچی آفات، و بنابراین با تقویت گونه‌های مفید در محصولات و کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها، به پایداری تولید کمک می‌کنند. لبه‌ها با سایر اکوسیستم‌ها ممکن است تأثیر قوی‌تری بر خدمات اکوسیستمی حمایت‌کننده از کشاورزی داشته باشند. گرده‌افشانی قهوه از نظر تشکیل میوه در منطقه انتقالی به اکوسیستم‌های جنگلی به دلیل تنوع گرده‌افشان‌های کاربردی‌تر افزایش یافت [۱۹۹]، در حالی که کمیت و کیفیت توت‌فرنگی در نزدیکی لبه‌های حوضچه به دلیل فراوانی بیشتر گرده‌افشان‌ها بالاتر بود.

افزایش لبه‌ها با سایر اکوسیستم‌ها، به ویژه طبیعی، در بیشتر موارد منجر به تکه‌تکه شدن (fragmentation) آن زیستگاه‌ها می‌شود. تکه‌تکه شدن زیستگاه اغلب با از دست دادن زیستگاه همراه است که اثرات منفی زیادی بر تنوع زیستی دارد. با این حال، تحقیقی بر روی ۱۱۸ مطالعه در مورد تکه‌تکه شدن زیستگاه، مستقل از میزان زیستگاه، نشان داد که ۷۶٪ از پاسخ‌های معنی‌دار تنوع زیستی به تکه‌تکه شدن زیستگاه مثبت بود. اثرات منفی تکه‌تکه شدن زیستگاه فی‌نفسه احتمالاً به دلیل کوچک شدن بیش از حد اندازه زیستگاه برای حفظ جمعیت محلی (مثلاً شکارچیان پستاندار) یا اثرات لبه منفی (مانند افزایش شکار پرندگان جنگلی در لبه‌ها است).

از آنجایی که به نظر می‌رسد لبه‌ها اثرات مثبتی دارند، باید ذکر کرد که لبه‌ها همچنین پتانسیل ایجاد اثرات منفی بر تولید کشاورزی را دارند. در مناطق انتقالی از جنگل‌ها به مناطق کشاورزی، تغییراتی در ریزاقلیم و چرخه مواد رخ می‌دهد که برخی از آن‌ها برای تولید محصول مطلوب نیستند، مانند سایه و رقابت بر سر منابع.

۱-۱۲- اصل دوازدهم پرماکالچر: استفاده خلاقانه از تغییر و واکنش به آن

اکوسیستم‌های طبیعی علی‌رغم تغییرات مداوم و تأثیر اختلالات، پایدار و انعطاف‌پذیر هستند. پتانسیل تغییر تکاملی برای پایداری پویای اکوسیستم‌ها ضروری است. به همین دلیل، چنین سیستم‌هایی نباید در یک وضعیت ثابت در نظر گرفته شوند، بلکه به عنوان یک فرآیند تکاملی تلقی گردند. پیامدهای این اصل برای طراحی agroecosystem (سیستم‌های کشاورزی-بوم‌شناختی) شامل گنجاندن انعطاف‌پذیری برای ایجاد تاب‌آوری و استفاده عمدی از تغییرات طبیعی، مانند جانشینی (succession) است.

اکوسیستم‌های زمین ما پیچیده هستند، به این معنی که واکنش آن‌ها به استفاده انسانی عموماً خطی، قابل پیش‌بینی یا قابل کنترل نیست. یکی دیگر از ویژگی‌های سیستم‌های پیچیده، وجود “مومنتوم” (momentum) است که منجر به پویایی زمانی سیستم می‌شود. همراه با زمانبالاتی تکرار آزمایش‌های اکولوژیکی، این امر تحقیقات اکولوژیکی کاربردی را محدود می‌کند و منجر به وجود دائمی عدم قطعیت‌های مرتبط با سیستم‌های اکولوژیکی می‌شود. بنابراین، هنگام برخورد با سیستم‌های اکولوژیکی، ضروری است که اصول نظریه تصمیم‌گیری برای تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت اعمال شود که در اینجا به تفصیل به آن پرداخته خواهد شد. برای اینکه بتوان به طور خلاقانه از تغییر استفاده کرد و به آن واکنش نشان داد، سیستم‌ها باید پایش و ارزیابی شوند (مدیریت تطبیقی، بخش ۱۰.۳ را ببینید).

اقداماتی که برگشت‌پذیر و در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم هستند و تاب‌آوری سیستم (اجتماعی-اکولوژیکی) را افزایش می‌دهند، باید مورد حمایت قرار گیرند. تاب‌آوری اکولوژیکی را می‌توان به عنوان میزان اختلالی که یک اکوسیستم می‌تواند بدون تغییر فرآیندها و ساختارهای خودسازمان‌یافته خود تحمل کند، تعریف کرد. به طور کلی، تاب‌آوری اکولوژیکی دو ستون استوار است: تنوع زیستگاه‌ها، گونه‌ها و ژن‌ها و مخازن، مانند خاک حاصلخیز، آب یا زیست‌توده.

در مورد جانشینی طبیعی، مثالی از نحوه استفاده از پویایی و تغییرات در اکوسیستم‌های طبیعی از طریق کاشت متوالی و تسهیل گیاهان یک‌ساله قابل استفاده، گیاهان چندساله علفی، درختچه‌ها و درختان، قبلاً ارائه شده است. در مکزیک، مردم بومی از جانشینی طبیعی برای ایجاد یک سیستم استفاده از زمین بسیار کارآمد استفاده و آن را هدایت می‌کنند (بخش ۲.۱.۳ را ببینید). مثال دیگر در مقیاس زمانی بسیار کوچکتر، چرای چرخشی یا سلولی (بخش ۷.۱.۳ را ببینید) است، که در آن تنها یک دوره کوتاه اما شدید اختلال برای بازگرداندن سیستم چمنزار به مرحله اولیه جانشینی استفاده می‌شود و به آن منابع کافی (مواد مغذی) برای شروع مجدد توسعه می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

اگرچه چندین دهه از پیدایش اگرواکولوژی به عنوان یک رشته علمی می‌گذرد، اما اصول پرماکالچر برای بازطراحی سیستم‌های کشاورزی تعریف شده‌اند. پرماکالچر رویکرد طراحی دیگری برای کشاورزی پایدار است که همواره از تحقیقات علمی جدا بوده است. این مرور نشان داد که برای هر دوازده اصل پرماکالچر که توسط دیوید هولمگرن معرفی شده‌اند، شواهد علمی وجود دارد. همانطور که فرگوسن و لاول اشاره کرده‌اند، همپوشانی قوی با اصول اگرواکولوژی وجود دارد. این همپوشانی به ویژه برای اصولی که مربوط به تنوع زیستگاه‌ها، گونه‌ها، ژن‌ها، چرخه زیست‌توده و مواد مغذی، انباشت ذخایر خاک حاصلخیز و آب، و ادغام عناصر مختلف برای ایجاد هم‌افزایی است، صدق می‌کند. با این حال، پرماکالچر علاوه بر این‌ها، اصولی را برای هدایت طراحی، اجرا و نگهداری سیستم‌های اگرواکولوژیکی تاب‌آور شامل می‌شود، مانند مشاهده و تعامل برای مقابله با تغییر، استفاده از راه‌حل‌های کوچک و آهسته، و طراحی از الگوها به جزئیات. این امر همچنین نشان می‌دهد که تمرکز اصلی پرماکالچر، برخلاف اگرواکولوژی، بر طراحی آگاهانه اگروسیستم‌ها است و این امر می‌تواند آن را به پیوندی بین تحقیقات و تئوری اگرواکولوژی و پیاده‌سازی عملی در کشاورزی تبدیل کند.

برای بررسی این فرضیه و شناسایی اینکه آیا پرماکالچر می‌تواند سیستم‌های کشاورزی تاب‌آوری را تولید کند که همچنین عرضه کافی غذا و منابع را برای مردم تضمین کند، تحقیقات علمی باید بر روی کاربری‌های زمینی موجود که با پرماکالچر طراحی و مدیریت می‌شوند، انجام شود. این امر همچنین حیاتی است زیرا اصول پرماکالچر معرفی شده به عنوان مجموعه‌ای هماهنگ و مرتبط توسعه یافته‌اند. بنابراین، تأثیر کاربرد کل مجموعه اصول باید مورد بررسی قرار گیرد، نه اینکه اصول به طور جداگانه بررسی شوند.

احتمالاً به دلیل جدایی از علم، و در نتیجه از آموزش رسمی و بودجه خارجی، نمونه‌های شناخته‌شده از کاربرد پرماکالچر در کشاورزی هنوز نادر هستند. با این حال، نتایج یک مطالعه موردی اخیر نشان می‌دهد که برای یک نفر امکان کسب درآمد از کشاورزی با ورودی نسبتاً کم (مانند عدم استفاده از ماشین‌آلات) در مساحت ۰.۱ هکتار در فرانسه با استفاده از پرماکالچر وجود دارد. این مثال نشان می‌دهد که تحقیقات بیشتر بر روی سیستم‌های پرماکالچر ممکن است برای توسعه پایدار کشاورزی ارزشمند

