

КОМПЛЕКСНЫЙ ИНЖЕНЕРНО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТОРГОВЛЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ВОДОЙ И ПРИОРИТИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В ИРАНЕ

© 2025 Н. Махмуди

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 20.04.2025

Иран сталкивается с серьёзным водным кризисом, усугубляемым изменением климата и неэффективным ведением сельского хозяйства. В данной работе предлагается комплексный инженерно-управленческий подход для оценки торговли виртуальной водой и приоритизации сельскохозяйственных культур в условиях климатических ограничений. Используя гидрологическое моделирование (ПО CROPWAT от ФАО), индекс давления виртуальной воды (VWPI) и метод многокритериального анализа (MCDA), исследуется водопотребление ключевых культур (рис, пшеница, ячмень, цитрусовые) в различных регионах страны. Результаты показывают неустойчивую зависимость выращивания риса от синих вод и сравнительно высокую эффективность цитрусовых и ячменя за счёт зелёной воды. Пространственный анализ позволяет рекомендовать дифференцированное планирование посевов с учётом региональных климатических условий. Исследование направлено на поддержку устойчивого управления ресурсами и развитие инструментов моделирования экологических проектов в Иране и Турции.

Ключевые слова: виртуальная вода, индекс VWPI, сельскохозяйственные культуры, управление водными ресурсами, изменение климата

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-117-123

EDN: PZVXOT

1. ВВЕДЕНИЕ

Вода является одним из важнейших элементов, необходимых для поддержания жизни. Чрезмерное и нерациональное потребление водных ресурсов приводит к серьёзным и порой необратимым последствиям, особенно в странах с ограниченными запасами пресной воды. Сельское хозяйство, потребляющее более 90% всех водных ресурсов Ирана, находится в центре водного кризиса, вызванного неэффективными методами орошения, устаревшими посевными структурами и климатическими изменениями [1,2].

Влияние изменения климата проявляется в снижении уровня осадков и повышении температуры, особенно в засушливых и полузасушливых регионах, таких как Исфахан, Мешхед и Тегеран [3]. Согласно оценкам, повышение температуры на 1 °C может снизить урожайность пшеницы на 6,0%, риса на 3,2%, кукурузы на 7,4% и сои на 3,1% [3,4].

Традиционные подходы к управлению водными ресурсами в таких условиях становятся недостаточными, что требует внедрения интегрированных инженерных и аналитических решений на основе научных данных и цифровых инструментов. Одним из таких подходов является анализ виртуальной воды, включающий как синюю воду (поверхностные и подземные источники), так и зелёную воду (влага почвы от осадков) [5].

Несмотря на то, что в ряде исследований проводилась оценка водного следа отдельных культур или регионов, системный подход, объединяющий гидрологическое моделирование (например, CROPWAT) и многокритериальный анализ (MCDA), до сих пор применяется редко. Такое сочетание позволяет более эффективно планировать распределение культур с учетом устойчивости водных ресурсов и климатических особенностей [1,6].

Настоящее исследование предлагает инженерно-менеджеральную модель, объединяющую:

- расчёт потребности в воде и виртуальной воды с использованием формулы Пенмана–Монтейта и ПО CROPWAT 8.0;
- анализ распределения зелёной и синей воды для основных культур (рис, пшеница, ячмень, цитрусовые);
- разработку индекса давления виртуальной воды (VWPI);
- применение многокритериального анализа (MCDA) для ранжирования культур и регионов по водной устойчивости.

Объектом исследования являются четыре ключевые провинции Ирана с различными климатическими и аграрными характеристиками:

- Мазандаран (влажный север), включая города Амоль, Амирабад, Бабольсар, Рамсар, Сари, Каемшехр и Ношехр;
- Тегеран (полузасушливый климат);
- Исфахан (засушливая центральная часть);
- Хорасан-Резави, включая город Мешхед (аридный северо-восток).

На основе метеорологических и агрономических данных за период 2007–2016 гг. рассчитываются зелёные и синие водные следы культур, а также значения VWPI. Анализ позволяет выявить регионы с наибольшим водным напряжением, оценить возможности изменения посевной структуры и предложить практические рекомендации по оптимизации водопользования.

Данное исследование направлено на:

- количественную оценку виртуального водопотребления сельскохозяйственных культур в различных регионах Ирана;
- разработку индекса VWPI как инструмента оценки водного давления;
- формирование управленческой модели для оптимизации структуры посевов с учётом доступности водных ресурсов;
- практическое применение в рамках диссертационного проекта: “Методология моделирования управления организационными проектами в области экологической устойчивости в Иране и Турции”.

Таким образом, исследование предлагает прикладную научную модель, связывающую гидрологический анализ, цифровые инструменты и стратегическое экологическое управление в условиях усиливающегося водного дефицита.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Район исследования и климатическая характеристика

В данном исследовании рассматриваются четыре провинции Ирана — Мазандаран, Тегеран, Исфахан и Хорасан-Резави — охватывающие широкий спектр климатических условий: от влажного умеренного климата на севере до засушливых зон в центральной и восточной частях страны. Такой выбор обусловлен как разнообразием агроклиматических параметров, так и значением этих регионов для обеспечения продовольственной безопасности страны [1]. Провинция Мазандаран была выбрана в качестве основной зоны детального анализа ввиду её ведущей роли в агропромышленном комплексе Ирана. Она отличается высоким уровнем аграрной активности, разнообразием культур и чувствительностью к водным рискам. В качестве районов исследования были отобраны города: Амоль, Амирабад, Бабольсар, Рамсар, Сари, Каемшехр и Ношехр [2]. Географически Мазандаран расположен между 35°46' и 36°58' северной широты и 50°21'–54°08' восточной долготы, и занимает территорию, простирающуюся вдоль южного побережья Каспийского моря [3]. Визуализация пространственного расположения агрометеостанций в провинции Мазандаран представлена на рисунке 1.

Климат региона классифицируется как влажный субтропический с умеренными зимами и тёплым летом. Среднегодовое количество осадков составляет около 977 мм, а средняя относительная влажность воздуха — около 80% [5,6]. Такие климатические условия создают благоприятную среду для выращивания риса, цитрусовых, пшеницы и других водоемких культур [7,8]. Однако в последние годы наблюдаются изменения в режимах осадков и температуры, что требует пересмотра существующих агроэкологических стратегий [9].

2.2 Агрономические и климатические факторы водопотребления

Потребность сельскохозяйственных культур в воде зависит от множества факторов, включая климат, тип растения, плодородие почвы, продолжительность вегетационного периода и особенности агротехники [3,10].

2.3 Методология оценки водопотребления

В настоящем исследовании применяются основные агрометеорологические формулы, рекомендованные ФАО [10], для расчёта водных параметров сельскохозяйственных культур. Расчёты основываются на модели CROPWAT и методике ФАО-56 [11], включая следующие формулы:

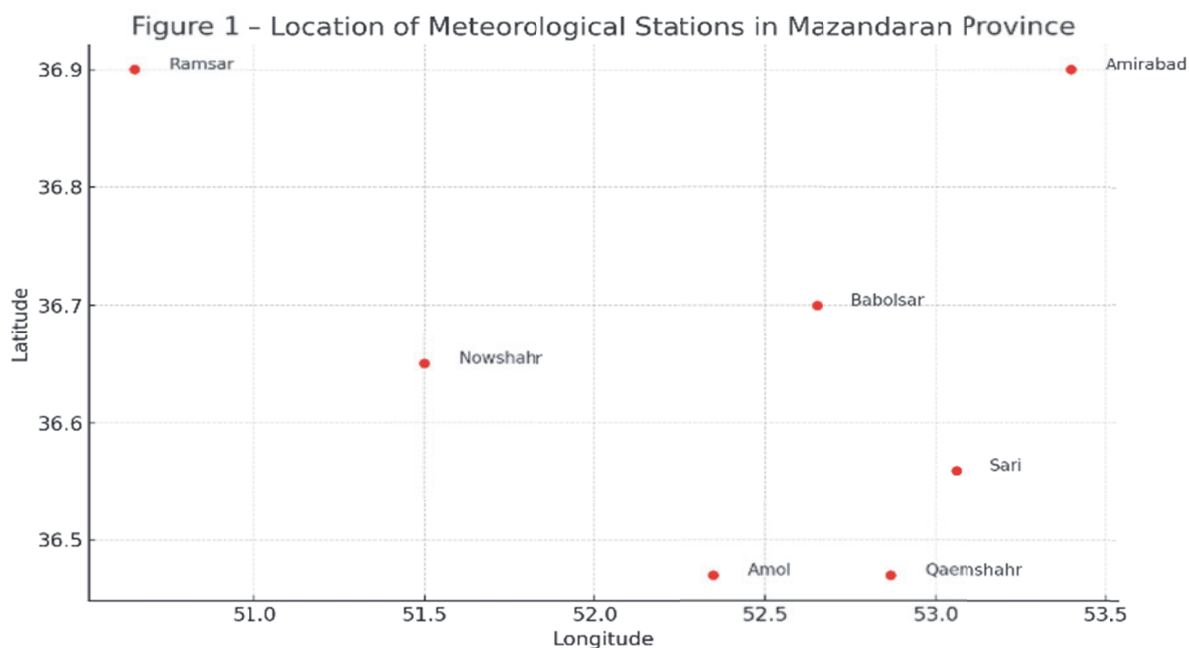


Рисунок 1 – Географическое распределение агрометеорологических станций в провинции Мазандаран

Расчет эталонной испаряемости (ET_0):

по формуле Пенмана–Монтейта [11]:

$$ET_0 = [0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times (900 / (T + 273)) \times U_2 \times (e_s - e_a)] / [\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times U_2)].$$

Расчет испаряемости конкретной культуры

$$(ET_c): ET_c = K_c \times ET_0.$$

Расчет суммарной потребности в воде (CWR):

$$CWR = \sum (ET_c \times n),$$

где:

ET_0 — эталонная испаряемость, мм/день;

ET_c — испаряемость культуры, мм/день;

K_c — коэффициент культуры;

CWR — водная потребность, мм;

Δ — наклон кривой давления пара, кПа/°C;

R_n — чистая радиация, МДж/м²/день;

G — поток тепла в почве, МДж/м²/день;

γ — психрометрическая константа, кПа/°C;

T — средняя температура воздуха, °C;

U_2 — скорость ветра на высоте 2 м, м/с;

e_s — давление насыщенного пара, кПа;

e_a — текущее давление пара, кПа;

n — количество дней в каждом этапе роста.

2.4 Используемые модели и программное обеспечение

Для всех расчётов использовалась программа CROPWAT 8.0, разработанная отделом земельных и водных ресурсов ФАО. Она применяется специалистами по ирригации, агрономами и экологами более чем в 144 странах. Для стратегического анализа применялась модель многокритериального анализа (MCDA), включающая следующие критерии: VWPI (35%), соотношение синий/зелёный воды (25%), экономическая продуктивность (25%) и климатическая совместимость (15%).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Общее водопотребление по культурам

Согласно расчётам, выполненным с использованием модели CROPWAT и отчётных данных ФАО [13], рис демонстрирует наивысший уровень водопотребления среди исследуемых культур. Индекс давления виртуальной воды (VWPI) для риса составляет 17.99, что указывает

на его критическую зависимость от водных ресурсов. Для сравнения, цитрусовые имеют минимальный VWPI = 0.40, а ячмень и пшеница — промежуточные значения (2.15 и 4.20 соответственно). Детализированная информация представлена в таблице 1. Как показано на рисунке 2, структура водопотребления риса состоит преимущественно из синей воды (72%), в то время как зелёная вода составляет лишь 28%. Это подчёркивает специфику орошаемого земледелия в регионе и потенциальные риски при дефиците поверхностных и подземных водных ресурсов.

Среднее водопотребление по городам провинции Мазандаран представлено на рисунке 3. Наблюдается выраженная пространственная вариативность: наибольшие значения зафиксированы в Амирабаде и Каэмшехре, в то время как наименьшие в Ношехре и Бабольсаре. Это может быть связано как с различиями в агроклиматических условиях, так и с интенсивностью ведения сельского хозяйства. Годовая динамика водопотребления для риса в период 2008–2016 гг. представлена на рисунке 4. Наблюдается умеренная тенденция к снижению — с 1300 до 1220 мм, особенно в последние годы. Такая динамика может быть результатом климатических изменений, внедрения более эффективных систем орошения и корректировки агротехнических практик. Эти данные играют ключевую роль при планировании адаптивных стратегий управления водными ресурсами и выбора культур в условиях ограниченного водоснабжения.

Таблица 1 – Индекс VWPI и структура водопотребления по культурам

Культура	VWPI	Синяя вода (%)	Зелёная вода (%)
Рис	17.99	72	28
Цитрусовые	0.4	3	97
Пшеница	4.2	38	62
Ячмень	2.15	30	70

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование демонстрирует значимость инженерно-аналитического подхода к оценке устойчивости сельскохозяйственного водопользования, особенно в контексте климатических ограничений. В центре внимания — не просто объёмы водопотребления, а их структура, пространственное распределение и последствия для аграрной политики.

Согласно результатам VWPI (таблица 1), рис остаётся самой уязвимой культурой из-за высокой зависимости от синей воды (более 70%), что подчёркивает её чувствительность к изменению доступности оросительных ресурсов (рис. 2). Эта структура водопотребления должна учитываться при разработке стратегий модернизации систем орошения. На противоположном полюсе — цитрусовые и ячмень, использующие преимущественно зелёную воду (80% и 70% соответственно), что делает их предпочтительными в регионах с ограниченными запасами орошаемых вод. Пшеница занимает промежуточную позицию, сохраняя потенциал для экспорта виртуальной воды при умеренной нагрузке на ресурсы.

Пространственный анализ (рис. 3) подтвердил вариативность потребления между городами провинции Мазандаран, а также выявил климатическое преимущество западных районов, где осадки используются более эффективно. Такая неоднородность требует территориально адаптированных стратегий. Динамика годовой потребности в воде для риса (рис. 4) демонстрирует не только снижение объёмов, но и возможное влияние управленческих решений в агротехнике, что требует дальнейшего изучения.

Сопоставление этих результатов с данными Hoekstra и Chapagain [2,16] подчеркивает необходимость перехода к системной аграрной политике, ориентированной на культуры с низким VWPI и устойчивым водным следом. Таким образом, разработанная методология синтеза VWPI, CROPWAT и MCDA служит прочной основой для принятия стратегических решений на региональном уровне, объединяя технический, экологический и управленческий подход. Это особенно актуально для стран, сталкивающихся с водными вызовами, подобными иранским и турецким реалиям.

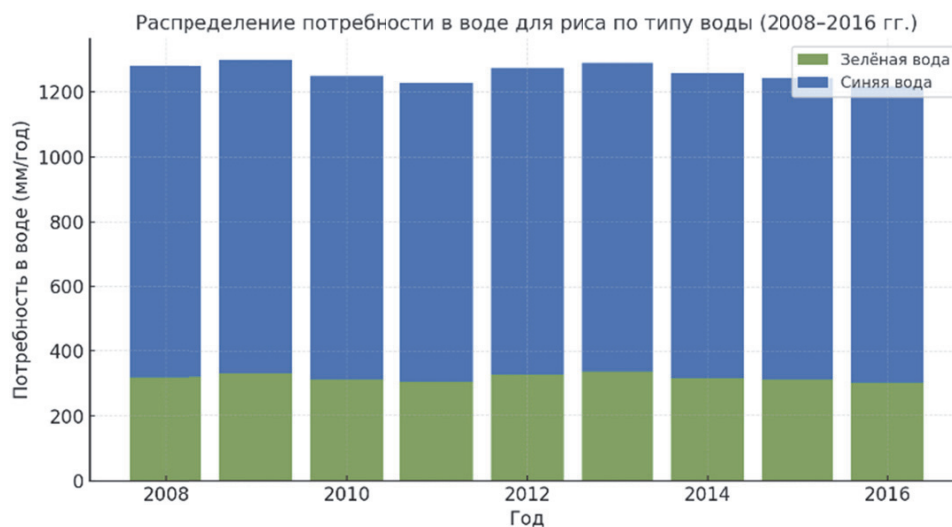


Рисунок 2 – Распределение потребности в воде для риса по типу воды (зелёная и синяя) в провинции Мазандаран (2008–2016 гг.)

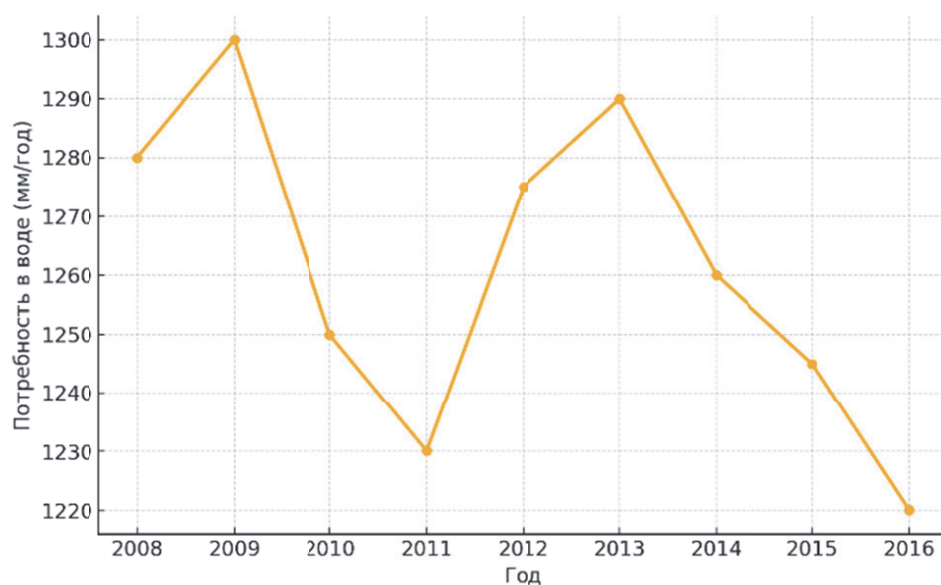


Рисунок 3 – Динамика годовой потребности в воде для риса в провинции Мазандаран (2008–2016 гг.)

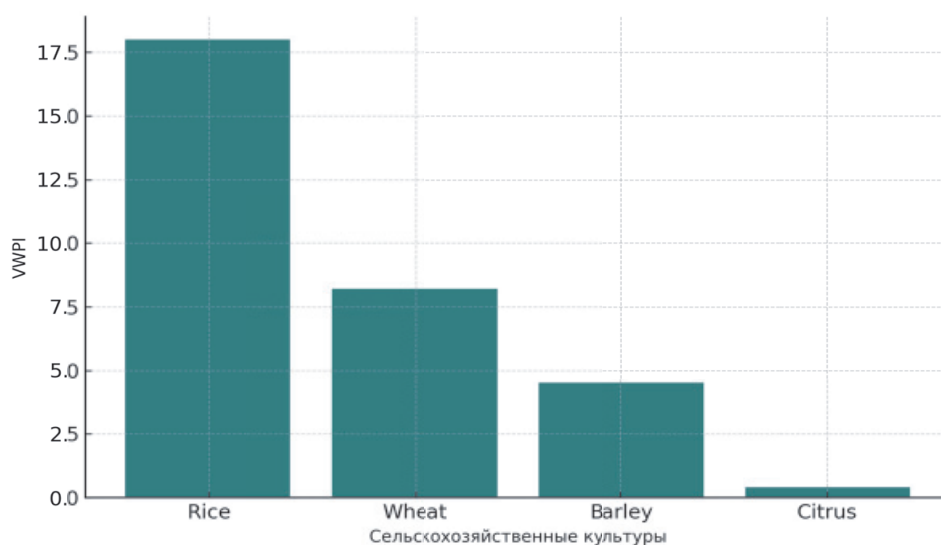


Рисунок 4 – Индекс давления виртуальной воды (VWPI) по культурам

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подчёркивает важность комплексного инженерно-управленческого подхода к управлению водными ресурсами в аграрных регионах с климатической уязвимостью. Использование модели CROPWAT, индекса VWPI и многокритериального анализа (MCDA) позволило оценить не только общий объём водопотребления, но и его структуру, пространственную дифференциацию и устойчивость ключевых культур. Установлено, что рис оказывает наибольшее водное давление (VWPI = 17.99) и в основном зависит от синей воды, что делает его уязвимым к снижению доступности ирригационных ресурсов. В отличие от этого, цитрусовые, пшеница и ячмень демонстрируют более устойчивый водный профиль за счёт высокой доли зелёной воды и низких значений VWPI. Эти культуры могут быть приоритетными с точки зрения устойчивого аграрного развития. Анализ годовой динамики и региональных различий (рис. 3 и 4) показал необходимость адаптивного планирования посевных структур с учётом климатических и географических особенностей. На западе Мазандарана наблюдается лучшая осадочная эффективность, что открывает возможности для выращивания влаголюбивых культур при меньшей нагрузке на водные ресурсы. Оптимизация агропроизводства с учётом пространственно-временных факторов и внедрение технологий бережливого земледелия, в том числе цифровых инструментов моделирования, может существенно повысить водную и продовольственную безопасность региона. Разработанная модель может быть масштабирована и применена в других регионах Ирана и Турции, а также использоваться в качестве практического инструмента в рамках межгосударственных проектов устойчивого агропромышленного развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohammadi-Kanigolzar F., Ameri J.D., Motee N. Virtual water trade as a strategy to water resource management in Iran // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2014. – Vol. 6, no. 2. – P. 141–148.
2. Wang Y., Chen Y., Peng S. A GIS framework for changing cropping pattern under different climate conditions and irrigation availability scenarios // *Water Resources Management*. – 2011. – Vol. 25. – P. 3073–3090.
3. Zhao C., Liu B., Piao S., Wang X., Lobell D.B., Huang Y., Huang M., Yao Y., Bassu S., Ciais P., Durand J.L. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2017. – Vol. 114, no. 35. – P. 9326–9331.
4. Asseng S., Ewert F., Martre P., Rötter R.P., Lobell D.B., Cammarano D., Kimball B.A., Ottman M.J., Wall G.W., White J.W., Reynolds M.P. Rising temperatures reduce global wheat production // *Nature Climate Change*. – 2015. – Vol. 5, no. 2. – P. 143–147.
5. Hoekstra A.Y., Chapagain A.K. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 220 p.
6. Khalili P., Konar M., Faramarzi M. Modelling the impacts of future droughts and post-droughts on hydrology, crop yields, and their linkages through assessing virtual water trade in agricultural watersheds of high-latitude regions // *Journal of Hydrology*. – 2024. – Vol. 639. – P. 131530.
7. Souissi A., Chebil A., Mtimet N., Thabet C. Virtual water flows and water value in Tunisia: The case of wheat and olive // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12. – P. 1–10.
8. Nasrollahi M., Zolfaghari A.A., Yazdani M.R. Spatial and temporal properties of reference evapotranspiration and its related climatic parameters in the main agricultural regions of Iran // *Pure and Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 178, no. 10. – P. 4159–4179.
9. El-Fadel M., Maroun R. Virtual water trade as an adaptation demand management of climate change impact on water resources in the Middle East // *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa*. – Berlin: Springer, 2008. – P. 93–108.
10. Shahid S. Impact of climate change on irrigation water demand of dry season Boro rice in northwest Bangladesh // *Climatic Change*. – 2011. – Vol. 105, no. 3. – P. 433–453.
11. Tukimat N.N.A., Harun S., Shahid S. Modeling irrigation water demand in a tropical paddy cultivated area in the context of climate change // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2017. – Vol. 143, no. 7. – P. 05017003.
12. Yeganegi V., Sharifzadegan M.H., Mobarghei N. Assessing the quality of drought adaptation in regional plans – Case study of Chaharmahal and Bakhtiari Province // [publication info missing – уточните].
13. Nouri M., Homaei M., Bannayan M. Quantitative trend, sensitivity and contribution analyses of reference evapotranspiration in some arid environments under climate change // *Water Resources Management*. – 2017. – Vol. 31. – P. 2207–2224.

14. *Ahmadi H., Baaghideh M.* Assessment of anomalies and effects of climate change on reference evapotranspiration and water requirement in pistachio cultivation areas in Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – Vol. 13. – P. 1–11.
15. *Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. – FAO Irrigation and Drainage Paper 56. – Rome: FAO, 1998. – 300 p.
16. *Amini Parsa V., Yavari A., Nejadi A.* Spatio-temporal analysis of land use/land cover pattern changes in Arasbaran Biosphere Reserve: Iran // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2016. – Vol. 2. – P. 1–13.
17. *Ahmadaali K., Eskandari Damaneh H., Ababaei B., Eskandari Damaneh H.* Impacts of droughts on rainfall use efficiency in different climatic zones and land uses in Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14. – P. 1–15.
18. *Karami H., Sayahnia R., Barghjelveh S.* Integrating climate change adaptation policies in spatial development planning in hyperarid regions of Kerman province, Iran // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, no. 9.

HYBRID ENGINEERING–MANAGERIAL APPROACH TO VIRTUAL WATER TRADE AND CROP PRIORITIZATION UNDER CLIMATE CONSTRAINTS IN IRAN

© 2025 N. Mahmoudi

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

Iran is facing a severe water crisis, exacerbated by climate change and inefficient agricultural practices. This study proposes a hybrid engineering–managerial approach to assess virtual water trade and crop prioritization under climate constraints. Using hydrological modeling (CROPWAT software by FAO), the Virtual Water Pressure Index (VWPI), and the Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) method, the water consumption of key crops (rice, wheat, barley, citrus) is analyzed across different regions. The results reveal the vulnerable dependency of rice cultivation on blue water sources and the comparatively high efficiency of citrus and barley due to green water usage. Spatial analysis enables region-specific crop planning based on climatic variations. The research supports sustainable resource management and the development of modeling tools for ecological projects in Iran and Turkey.

Keywords: virtual water, VWPI index, agricultural crops, water resource management, climate change.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-117-123

EDN: PZVXOT