



Doctoral Thesis

Assessment of regional water endowments, crop water productivity, and implications for intra-country virtual water trade in Iran

Author(s):

Faramarzi, Monireh

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006044590> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 18834

**ASSESSMENT OF REGIONAL WATER ENDOWMENTS, CROP
WATER PRODUCTIVITY, AND IMPLICATIONS FOR INTRA-
COUNTRY VIRTUAL WATER TRADE IN IRAN**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Monireh Faramarzi

M.Sc. in Irrigation and Drainage Engineering, Isfahan University of Technology, Iran
born 12 December 1974
citizen of Iran

to be accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner
Prof. Dr. Raghavan Srinivasan, co-examiner
Dr. Hong Yang, co-examiner
Dr. Karim C. Abbaspour, co-examiner

2010

SUMMARY

Population growth and economic development are increasing demand for water resources. Although there is no global water scarcity as such, an increasing number of regions in arid and semi-arid countries are chronically short of water. Given this state of scarcity, agriculture as the biggest water user is becoming under severe scrutiny to account for the water it uses. As the demand for food is ever increasing, and there is no significant room to expand areas of cultivation, the increasing demand for food will have to be met through improved management of the available and limited resources, and/or through imports from outside.

Characterized by an arid and semi-arid environment, Iran is one of the countries stressed by an increasing water scarcity. Limitations in water resources are posing a major constraint to the expansion of crop land and food production in Iran. Agriculture is by far the largest water user in Iran, accounting for more than 90% of the total water withdrawal. Increasing the production of cereal crops, however, is of vital national interest. Wheat is the main food crop, and self-sufficiency in wheat production is a national objective of prime importance. Although this goal was temporarily achieved in 2004, there is general doubt about Iran's ability to sustain this level of production in view of the increasing water scarcity and other obstacles. In general, agricultural water use efficiency is low in Iran (i.e. 15%-36%). Efforts to increase agricultural water use efficiency have been made through increasing crop water productivity (*CWP*) at plant and field levels, but this has not so far alleviated the water scarcity in the country.

This thesis addresses the issue of water scarcity by looking for ways of alleviating it through virtual water trade strategy (VWTS) across regions/provinces within the country. This strategy calls in part for the adjustment of the structure of cropping pattern (ASCP) and interregional food trade where crop yield and crop water productivity as well as local economic and social conditions are considered. The core of VWT is the idea that intensive crops are produced in the regions with high *CWP* and exported to the regions with low *CWP*. Hence, water scarce regions import water-intensive products rather than producing them locally for optimum utilization of their limited water resources. VWTS can be considered as an instrument to overcome the imbalances of water availability across regions. We consider the intra-country VWTS as a policy option to mitigate the chronic water shortages in water scarce regions of Iran. This calls for an adjustment in the structure of cropping production within the country. A sound knowledge of water

resources availability and crop water use is a necessary basis for adjusting cropping structures across regions in line with the VWTS. New modeling tools allow the assessment of large scale, complex, and intensively managed systems.

The main goal of this study was to examine the feasibility of applying intra-country VWTS to alleviate water shortage in Iran. To attain this goal, the specific objectives were: i) to model the temporal and spatial availability of different water resources components such as blue water flow, green water flow and green water storage; ii) to assess the impact of the climate change on water availability; iii) to model cereal crop yields and crop water productivity in Iran at a high spatial and temporal resolution; and iv) to construct a systematic framework for regional crop structural adjustment that is in line with the VWTS.

In the first part of this study the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used in combination with the Sequential Uncertainty Fitting program (SUFI-2) to calibrate and validate a hydrologic model of Iran based on river discharges and wheat yield, taking into consideration dam operations and irrigation practices. Uncertainty analyses were also conducted to assess the performance of the model. The results were satisfactory for most of the river basins across the country. We quantified all components of the water balance including blue water flow (water yield plus deep aquifer recharge), green water flow (actual and potential evapotranspiration), and green water storage (soil moisture) at the sub-basin level with monthly time steps. The spatially aggregated water resources and simulated wheat yield compared well with the existing data. The study period was 1990-2002 for calibration and 1980-1989 for validation. The results show that irrigation practices have a significant impact on the water balances of the provinces with irrigated agriculture and must be considered in the SWAT model. Concerning the staple food crop in the country, 55% of irrigated wheat and 57% of rain-fed wheat are produced every year in water scarce regions.

To obtain the second objective, climate scenarios were generated for the periods 2010-2040 and 2070-2100 using the Canadian Global Coupled Model (CGCM 3.1). We chose scenarios A1B, B1 and A2 for the climate projection. They were downscaled for 37 climate stations across the country. The calibrated hydrologic model was then applied to the specified periods to analyze the effect of future climate on precipitation, blue water, green water, and wheat yield across the country. We found that wet regions of the country will, in general, receive more rainfall while dry regions will receive less. Analysis of daily rainfall intensities indicated more frequent larger-intensity floods in the

wet regions and more prolonged droughts in the dry regions. When aggregated to provincial levels, the differences in predictions due to the three future scenarios were smaller than the uncertainty in the hydrologic model. However, at the sub-basin level the three climate scenarios produced quite different results for dry regions of the country, while the results were more or less similar for wet regions.

To achieve the third objective we modeled the yield for irrigated and rainfed wheat (Y) and consumptive water use (ET) at a sub-basin level in Iran. Simulated Y and ET were used to calculate crop water productivity (CWP). The model was then used to analyze the impact of various policies to improve the agricultural system in Iran. Our analysis of the ratio of water use to internal renewable water resources revealed that 23 out of 30 provinces are using more than 40% of their water resources for agriculture. Twelve provinces reach a ratio of 100% and more, indicating severe water scarcity and groundwater resource depletion. An analysis of Y - CWP relationship showed that a better water management in rainfed wheat, where yield is currently small, could lead to a larger marginal return for the consumed water. An assessment of improvement in soil available water capacity (AWC) showed that 18 out of 30 provinces are more certain to save water while increasing the AWC through proper soil management practices. This will save about 5-6% of the total irrigation water use for wheat, when aggregating to national level. Furthermore, we estimated the water required to reach wheat self-sufficiency by the year 2020 (keeping all factors except population constant). The results showed that 88% of the additional wheat production would need to be produced in water-scarce provinces. Therefore, a strategic planning in the national agricultural crop production and food trade to ensure sustainable water use is needed.

In the last part of this study, we constructed a systematic framework to assess the adjustment to the structure of cropping pattern (ASCP) that are in line with the VWTS under various driving forces and constraints. A “mixed-integer, multi-objective, linear optimization model” was developed and solved by linear programming (LP), using Lingo 9 software. The annual data for 1990-2004 were used to account for yearly fluctuations of water availability and food production. Five scenarios were designed for adjusting provincial cropping structure to maximize national cereal production while meeting certain levels of wheat self-sufficiency under various water and land constraints. In these scenarios we accounted for the performance of individual provinces in crop yield and crop water productivity. The results showed that Iran could follow a sustainable water use policy while producing an amount of cereal equivalent to the average production in

the study period covering about 90% of what is needed for wheat self-sufficiency. This is larger than the average (76%) during the study period. However, the scenario that assumes a substantial improvement in irrigation water use efficiency suggests a promising outcome in terms of sustaining the country's total cereal production and achieving 100% wheat self-sufficiency while alleviating water stress in water scarce provinces. Based on the adjusted cropping structures in the various scenarios studied, we quantified the amount of virtual water that could be transferred from surplus provinces to deficit provinces. At the national level, depending on the scenarios, wheat surplus provinces as a whole could compensate 31% to 100% of the total wheat shortage in the deficit provinces. As a result, wheat-deficit provinces would receive $3.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $5.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ of virtual water by importing wheat from the surplus provinces.

ZUSAMMENFASSUNG

Bevölkerungswachstum und wirtschaftliche Entwicklung führen in den meisten Entwicklungsländern zu einem steigenden Bedarf an Wasserressourcen, die vor allem in semiariden und ariden Gebieten ohnehin bereits sehr knapp sind. Zusätzliche landwirtschaftliche Nutzflächen sind gewöhnlich kaum vorhanden, so dass der steigende Nahrungsmittelbedarf primär mit Hilfe verbesserten Managements der knappen verfügbaren Wasserressourcen gedeckt werden muss. Als mehrheitlich arides bis semi-arides Land hat auch Iran nur sehr begrenzte Wasserressourcen, was die wesentlichste Einschränkung für eine Ausweitung der Kulturlächen und damit auch der Nahrungsmittelproduktion darstellt. Die Landwirtschaft beansprucht mit 90% des gesamten Wasserverbrauchs den grössten Anteil dieser Ressource. Obwohl Selbstversorgung in der Produktion von Weizen ein erklärtes Ziel der iranischen Politik ist und eine solche im Jahr 2004 auch tatsächlich einmal erreicht wurde, bestehen angesichts der zunehmenden Wasserknappheit und anderer Einschränkungen grundlegende Zweifel, dass dieses Ziel auch in Zukunft aufrechtzuerhalten ist. Grundsätzlich ist die Effizienz in der Wassernutzung der Landwirtschaft gering (i.d.R. 15-36%). Alle Anstrengungen zur Steigerung der Effizienz, namentlich in der Pflanzen-Wasser-Produktivität (engl. crop water productivity, CWP) konnten die angespannte Wassersituation im Land bisher nicht lindern.

Die hier vorliegende Studie befasst sich mit dem Thema Wasserknappheit und ihrer Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion unter dem Gesichtspunkt des virtuellen Wasserhandels (engl. virtual water trade, VWT) als mögliche Strategie eines möglichst effizienten Umgangs mit der Ressource Wasser. Die Strategie des VWT beruht darauf, dass Pflanzen in Regionen mit hohem CWP angebaut und in Regionen mit tiefem CWP exportiert werden. Dies führt dazu, dass wasserarme Regionen wasserintensive Pflanzenprodukte importieren anstatt sie lokal zu produzieren, was eine optimale Nutzung der begrenzten lokalen Wasserressourcen erlaubt. Landesweit gesehen ist so ein Ausgleich in der ungleich verteilten Ressource Wasser zwischen den verschiedenen Regionen möglich. Die Neuzuteilung der Produktionsstandorte und -mengen erfordert aber eine genaue Kenntnis der lokal vorhandenen Ressourcen und Infrastrukturen. Dies ist mit den heute zur Verfügung stehenden Modellierungstechniken auch auf grosser Skala für intensiv bewirtschaftete und komplexe Agrarsysteme möglich.

Das Hauptziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, ob VWT innerhalb eines

Landes eine durchführbare Option zur Linderung der Wasserknappheit ist. Im Rahmen dieser allgemeinen Zielsetzung wurden als Teilziele die Verfügbarkeit an Wasserressourcen, der Einfluss des Klimawandels auf die künftige Wasserverfügbarkeit, und die räumliche Verteilung der Getreideproduktion und ihre Beziehung zur Wasserverfügbarkeit im Iran untersucht, sowie ein systematischer Rahmen für eine VWT-Strategie innerhalb des Landes erstellt.

Hierzu wurde mit Hilfe des Soil Water Assessment Tools (SWAT) ein hydrologisches Modell des Studiengebietes (Iran) erstellt und mittels Abflussmessungen und Getreideertrag kalibriert, wobei auch Staudämme und Bewässerungen berücksichtigt wurden. Eine Unsicherheitsanalyse zeigte, dass die Qualität der Modellresultate für die meisten Flüsse im Land zufriedenstellend war. Das erstellte Modell quantifiziert in monatlichen Zeitschritten auf der Ebene von Einzugsgebieten die Flüsse an „blauem Wasser“ (insbesondere Eintrag an Wasser und Grundwasserneubildung), die Flüsse an „grünem Wasser“ (insbesondere Evapotranspiration) und die Speicherung von grünem Wasser (Bodenwasser). Die auf Ebene Provinzen aggregierten Resultate bezüglich Wasserressourcen und Getreideerträgen stimmten gut mit vorhandenen statistischen Daten überein. Für die Kalibration wurde die Periode 1990-2002 und für die Validation die Periode 1980-1989 gewählt. Die Modellrechnungen ergaben, dass in Gebieten mit künstlicher Bewässerung die Bewässerungsmethode einen wesentlichen Einfluss auf die lokale Wasserbilanz hat und dass dies im SWAT-Modell berücksichtigt werden muss und dass 55% des bewässerten Weizens und 57% des unbewässerten Weizens des Grundnahrungsbedarfes in Regionen mit akuter Wasserknappheit angebaut werden.

Um das zweite Teilziel dieser Arbeit zu erreichen, wurden Klimaprognosen des Canadian Global Coupled Model (CGCM 3.1) für die Zeiträume 2010-2040 und 2070-2100 auf 37 Klimastationen in Iran heruntergerechnet. Dazu wurden die Klimaszenarien A1B, B1 und A2 des CGCM 3.1 verwendet. Für jedes der Szenarien wurde dann mit dem SWAT-Modell der zu erwartende Effekt des prognostizierten Klimawandels auf den Niederschlag, die Flüsse an blauem und grünem Wasser sowie auf die Getreideerträge bestimmt. Grundsätzlich kann auf Grund dieser Rechnungen für alle Szenarien gesagt werden, dass es in den feuchteren Regionen in Zukunft mehr und in trockeneren Gebieten noch weniger Niederschlag zu erwarten ist. Zudem ist zu erwarten, dass es in den feuchteren Gebieten zu häufigeren und grösseren Fluten kommen wird, während dem die Dürren in den trockeneren Gebieten länger anhalten werden. Auf regionaler Ebene ergaben sich Unsicherheiten in den Vorhersagen, die grösser waren als die Unterschiede

zwischen den einzelnen Klimaszenarien. Nur für die trockeneren Gebieten ergaben die verschiedenen Szenarien grössere Differenzen, während sie sich für die feuchteren Gebiete in ihren hydrologischen Auswirkungen kaum unterschieden.

Im dritten Teil der Arbeit wurden die Erträge an Weizen und der Wasserverbrauch in künstlich bewässerten und allein durch Regenwasser versorgten Kulturen untersucht. Daraus wurde dann die Wasserproduktivität für den Weizenanbau auf der Ebene der Einzugsgebiete berechnet. Es ergab sich, dass in 23 von 30 Regionen in Iran mehr als 40% der erneuerbaren Wasserressourcen für die Bewässerung verwendet werden. In 12 Regionen überstieg dieses Verhältnis sogar 100%, was nicht nur eine gravierende Wasserknappheit, sondern darüber hinaus auch eine Übernutzung der Grundwasserreserven anzeigt. Die Betrachtung des Verhältnisses zwischen Getreideertrag und CWP zeigt, dass sich in 18 der 30 Regionen durch besseres Wassermanagement der regenbewässerten Anbauflächen, auf welchen der Ertrag zur Zeit gering ist, der Ertrag an Weizen bei gleich bleibendem Wasserverbrauch noch stark steigern liesse und sich durch eine Verbesserung der Bodenbewirtschaftung zudem die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens erhöhen liesse. Um abzuschätzen, ob die angestrebte Selbstversorgung mit Getreide bis ins Jahr 2020 realistisch ist, wurde der dazu notwendige Wasserbedarf bestimmt, wobei das Wachstum der Bevölkerung berücksichtigt, aber sonstige Faktoren konstant gehalten wurden. Dabei zeigt sich, dass 88% der erforderlichen Mehrerträge in wasserarmen Regionen produziert werden müssten. Dies dürfte nur mit einer entsprechenden strategischen Planung der nationalen landwirtschaftlichen Produktion möglich sein, in der eine nachhaltige Wassernutzung sichergestellt ist.

Der letzte Teil dieser Arbeit befasst sich damit, wie die räumliche Verteilung der Anbauggebiete für Getreide angepasst werden müsste, um mittels VWT unter verschiedenen Randbedingungen und Einschränkungen eine möglichst hohe Getreideproduktion bei möglichst geringem Wasserverbrauch zu erreichen. Um dieses „multi-objective optimization problem“ in der Anpassung in der räumlichen Struktur der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion (engl. crop structure adjustment, CSA) auf nationaler Ebene zu erreichen, wurde die Methode der linearen Programmierung (LP) mit Hilfe der Software Lingo 9 verwendet. Um von jährlichen Schwankungen in der Wasserverfügbarkeit und der Lebensmittelproduktion möglichst unabhängig zu sein, wurde die Periode 1990-2004 als Bezugsperiode verwendet. Die CSA-Optimierung wurde für 5 verschiedene Szenarien durchgeführt. Ziel war es jeweils, die nationale

Getreideproduktion zu maximieren, wobei jedoch in den einzelnen Regionen unter je nach Szenario verschiedenen Bedingungen ein Minimum an Selbstversorgung mit Weizen einzuhalten war. Tendenziell führten die Optimierungsrechnungen wie erwartet dazu, dass die Anbaufläche eines Getreides in Regionen, in welchen der Ertrag und der CWP über dem nationalen Durchschnitt lag, erhöht und in Regionen mit unterdurchschnittlichem Ertrag und CWP zu verringert werden müsste. Die Analysen ergaben, dass der Iran im Jahr 2020 eine Selbstversorgungsquote von 90-92% erreichen könnte, gegenüber 87% Selbstversorgung im Referenzzeitraum, ohne die Wasserknappheit zu verschärfen. Bei substanzieller Verbesserung der Bewässerungseffizienz könnte sogar 100% Selbstversorgung erreicht und gleichzeitig die Knappheit an Wasser verringert werden.

Je nach Szenario würden Regionen mit Weizenüberschuss 31-100% des Weizenmangels in den Regionen mit ungenügender Produktion ausgleichen. Dabei würden Regionen mit einem Defizit zwischen $3.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ und $5.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ virtuelles Wasser durch Importe aus den Regionen mit Weizenüberschuss erhalten.