علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدلQUAL2Kw

(مطالعه موردی: رودخانه شاهرود)

رزیتا آریایی نژاد[۱]

مهدی سرائی تبریزی[۲*]

M.sarai@srbiau.ac.ir

حسین بابازاده[۳]

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۲۹ **تاریخ پذیرش:۹۶/۰۹/۰۸**

چکیده

زمینه و هدف: مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها در جهت مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها و کاهش تبعات مسایل محیط زیستی ناشی از ورود آلاینده‌ها به آن مورد استفاده قرار گیرد. هدف از مقاله حاضر استفاده از مدل معتبر QUAL2Kw.5.1 در راستای مدل‌سازی کیفیت آب در رودخانه شاهرود می‌باشد.

روش بررسی: در مقاله حاضر ازمدل QUAL2Kw.5.1 برای مدل‌سازی هفت پارامتر کیفیت آب شامل اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، قلیاییت، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، فسفر کل و نیتروژن کل در چهار دوره زمانی در رودخانه شاهرود استفاده شده است. به منظور واسنجی مدل از داده‌های آبان ۱۳۸۶ و تیر ۱۳۸۷ و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ استفاده شده است. واسنجی خودکار ضرایب مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل انجام شده است. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهداتی از دو پارامتر آماری شامل ضریب تبیین و میانگین قدرمطلق خطا استفاده شده است.

یافته‌ها: مهم‌ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می‌باشد. مدل در شبیه‌سازی پارامترهای pH و هدایت هیدرولیکی با مقادیر میانگین قدرمطلق خطای ۰/۱۹ و ۱۶۳/۸۹ در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین دقت را از خود نشان داد. به طور میانگین حداقل و حداکثر اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده در رودخانه شاهرود در شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ و به‌ترتیب برابر ۶/۹۳ و ۹/۹۹ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین دقت مدل در شبیه‌سازی این پارامتر مربوط به تیر و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۸۶ و ۱/۲۹ می‌باشد. همچنین نتایج نشان

۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران*(مسئول مکاتبات)

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

داده که مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق از تغییرات پارامترهای هیدرولیکی رودخانه و جریان در طول رودخانه تأثیر زیادی در مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه دارد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج مقاله حاضر دقت مناسب مدل QUAL2Kw.5.1را در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شاهرود نشان می‌دهد. از طرف دیگر دقت شبیه‌سازی هر پارامتر با توجه به مقدار تغییرات آن در طول رودخانه متغیر می‌باشد. به نحوی‌که هر چه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف کم‌تر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی این پارامتر بیش‌تر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی:رودخانه شاهرود، مدلQUAL2Kw.5.1 مدل‌سازی کیفیت آب، صحت‌سنجی، واسنجی.

J. Env. Sci. Tech., Vol 21, No.7, September, 2019

Modeling Water Quality of Rivers Using QUAL2Kw Model (Case Study: Shahroud River)

Rozita Aryaee Nezhad[1]
Mahdi Sarai Tabrizi[2*]
M.sarai@srbiau.ac.ir
Hossein Babazadeh[3]

Accepted:2017.09.13 Received:2017.11.29

Abstract

Background and Objective: Modeling water quality of rivers can be used as one of the most effective tools for water quality management in rivers and reducing the environmental impacts of entering pollutants. The purpose of this paper is to use the valid QUAL2Kw 5.1 model to model water quality in Shahrood River.

Method: In this paper, seven parameters of water quality have been used including dissolved oxygen (DO), biochemical demand oxygen (BOD), pH, total dissolved solids (TDS), total phosphorus, and total nitrogen four times in Shahrood River. Data from October of 2007 and July of 2008 were used to calibrate and data from September and October of 2008 were used to verify the model. Auto-calibration of model coefficients was done using genetic algorithm of the model. In order to compare simulated results with the observed data, determination coefficient and mean absolute error were used.

Findings: The most important calibration coefficients of the model were related to TSS, BOD, total nitrogen and phosphorus. This model in simulation of pH and EC with mean absolute error of 0.19 and 163.89 during verification stage showed the most and the least accuracy, respectively. On average the minimum and maximum DO were measured 6.93 and 9.99 mg/L in September and October of 2008 respectively in Shahroud River. Also the highest and lowest accuracy of the model in simulating these parameters were related to July and October of 2008 with mean absolute error of 0.86 and 1.29, respectively. In addition the results showed accurate hydraulic modeling of hydraulic parameters changes of the river along the river had a great influence on modeling of the water river quality.

Discussion and Conclusion: The results of this paper show the accuracy of the QUAL2Kw model in simulating water quality parameters of Shahrood River. On the other hand, the accuracy of the simulation of each parameter varies with the amount of its variation along the river so that the less the changes in a parameter along the river and at different intervals, the higher the accuracy of the model in simulating this parameter will be.

Keywords: Shahrood River, QUAL2Kw Model, Water Quality Modeling, Verification, Calibration

1 –MSc. Student Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2 –Assistant Professor, Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.* (Corresponding Author)

3 –Associate Professor, Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

مقدمه

ورود انواع مختلف آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی و پساب‌های شهری به رودخانه‌ها که یکی از منابع اصلی تأمین آب آشامیدنی، صنعتی و کشاورزی می‌باشند، باعث ایجاد بحران محیط‌زیستی در عصر حاضر شده است. واحدهای صنعتی، کشاورزی و مسکونی واقع در حوضه رودخانه از نظر مصرف آب به رودخانه وابسته می‌باشند. زهکش‌های کشاورزی، پساب‌های صنایع و خانگی و غیره وارد رودخانه شده و آلودگی رودخانه ها را همراه با مصارف آب تشدیدکرده است (۱).

شکری و همکاران (۱۳۹۳) به شبیه‌سازی کیفی آمونیوم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدل QUAL2KW پرداختند. نتایج حاصل از صحت‌سنجی ایشان نشان داد که مدل تطابق خوبی با واقعیت دارد و با توجه به مطالعات به عمل آمده بیش‌تر منابع آلوده کننده رودخانه گرگر را می‌توان فاضلاب‌های روستاهای مسیر، پساب‌ها و فاضلاب‌های ماهی‌سراها و حوضچه-های پرورش ماهی و زهکش‌های کشاورزی دانست(۲). خدام-محمدی و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر (مطالعه موردی: پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک- بختگان) به کمک مدل کیفی QUAL2K پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که وجود پل‌ها و تأسیسات آب‌بند مانند بند امیر، پل رحمت آباد و بند حسن‌آباد می‌تواند باعث افزایش تلاطم و افزایش هوادهی و قدرت خودپالایی رودخانه کر و در نتیجه افزایش میزان اکسیژن محلول در رودخانه شود (۳).

حسینی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی کارایی مدل QUAL2Kw در خودپالایی رودخانه (مطالعه موردی رودخانه کارون در بازه زرگان-کوت امیر) دریافتند که این مدل کارایی خوبی برای بررسی خودپالایی رودخانه دارد. در این تحقیق پارامترهایEC، NO_3، TSS ، BOD، DO، pH و دما توسط مدل شبیه‌سازی و واسنجی شده است. خروجی مدل به طور کلی حکایت از عدم خودپالایی رودخانه در پارامترهای pH و BOD داشته و خودپالایی کم در پارامترهای TSS و NO_3 با توجه به بار آلودگی ورودی در این بازه از رودخانه داشته است (۴). حسینی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تغییرات توان خودپالایی رودخانه کارون در سال‌های ۸۷ و ۹۲ با استفاده از مدل QUAL2KW در محدوده شهر اهوازرودخانه کارون پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان‌دهنده عدم خودپالایی پارامتر EC در رودخانه کارون برای سال ۸۷ و عدم خودپالایی پارامتر BOD در سال ۹۲ بوده است. همچنین بهترین شبیه‌سازی مدل برای پارامتر pH بدست آمد و در رتبه‌های بعدی به‌ترتیب پارامتر BOD و EC قرار گرفتند (۵).

عاشق‌معلا و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی دو رودخانه‌ی سبزکوه در چهارمحال‌وبختیاری و رودخانه قشلاق در کردستان را با مدل QUAL2KW شبیه‌سازی کردند. نتیجه این شبیه‌سازی نشان داد که رعایت استانداردهای تخلیه پساب، شرایط کیفی مناسب رودخانه قشلاق را به خوبی حفظ می‌کند. اما در رودخانه سبزکوه به دلیل میزان توان خودپالایی و تعداد زیاد منابع آلاینده موجود، رعایت استانداردهای تخلیه پساب، نه تنها کمکی به حفظ کیفیت آب نمی‌کند، بلکه تاثیر بسیار منفی بر کیفیت آب رودخانه خواهد گذاشت. سپس، با استفاده از شبیه سازی کیفی رودخانه، حد مجاز مناسب هر رودخانه بر اساس توان خودپالایی رودخانه و تعداد و نوع منابع آلاینده موجود برآورد شد و نتایج نشان داد که در تدوین استانداردهای دقیق و کارآمد باید به توان خودپالایی رودخانه، تعداد منابع آلاینده حاشیه رودخانه و میزان بارگذاری مواد زاید و دیگر شرایط متفاوت رودخانه‌ها نیز توجه نمود (۶). مهراسبی و همکاران (۲۰۱۵) کیفیت آب رودخانه کینه‌ورز را با استفاده از مدل QUAL2KW شبیه‌سازی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که نیتروژن کل و فسفر کل به‌ترتیب باید ۷۶٪ و ۹۳٪ کاهش یابد تا به هدف کیفیت آب مطلوب در رودخانه دست یافت (۷).

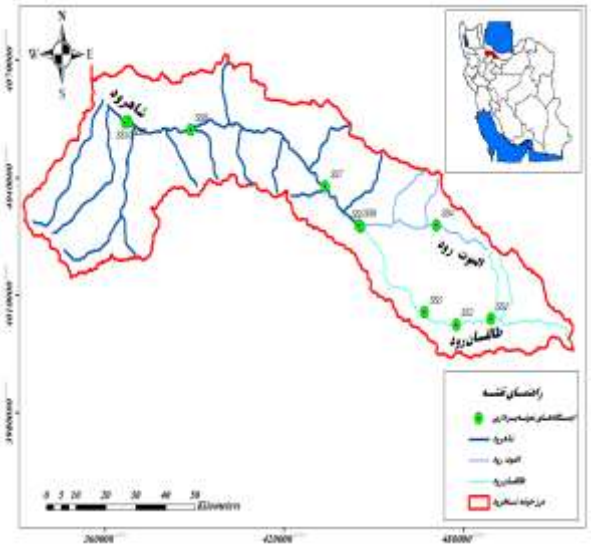
ذوالفقاری‌پور و همکاران (۲۰۱۶) به منظور مدیریت کیفی رودخانه و حداقل‌سازی هزینه‌های حفظ محیط زیست و تامین معیارهای کیفیت آب به مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw پرداختند. ایشان به منظور لحاظ کردن نقش تخلیه‌کنندگان بار آلودگی در تصمیم‌گیری و افزایش قابلیت اجرا برای برنامه‌های پیشنهادی تخصیص بار آلودگی در رودخانه از رویکرد گزینش اجتماعی استفاده کردند. برای هر تخلیه‌کننده، سناریوهای مختلف تصفیه فاضلاب مشخص و گزینه‌های ترکیبی تصفیه تعریف شدند. سپس با استفاده از مدل شبیه سازی کیفی QUAL2Kw، برای هر یک از گزینه‌های تصفیه، مقادیر جریمه تخطی از استاندارد کیفی محاسبه شد. نتایج حاصل از کاربرد مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی که قسمتی از رودخانه زرجوب در شمال ایران بود، نشان داد که تدوین سیاست‌های تخصیص در کاهش بار آلودگی رودخانه‌ها کارآیی مناسبی دارد (۸). محققانی در سال ۲۰۱۷ با مدل کردن کیفیت آب رودخانه یامیونا در هند به کمک مدلQUAL2Kw نشان دادند که پارامترهای TN، $CBOD_f$، DO و TC نسبت به جریان بالادست و کیفیت و موقعیت ورودی منبع آلاینده بسیار حساس است (۹).

هدف اصلی پژوهش حاضر شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب شامل هفت پارامتر اکسیژن محلول[1]، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی[2]، قلیاییت[3]، کل مواد جامد محلول[4]، هدایت الکتریکی[5]، فسفر کل[6] و نیتروژن کل[7] در چهار دوره زمانی (آبان ۱۳۸۶، تیر ۱۳۸۷، شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷) در رودخانه شاهرود با استفاده از مدل QUAL2Kw 5.1 می‌باشد.

روش بررسی

معرفی رودخانه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه شاهرود بخشی از حوضه سفیدرود بزرگ بوده و با مشخصات طول جغرافیایی ۳۰-۴۹ الی ۱۰-۵۹ و عرض جغرافیایی ۷-۳۶ الی ۴۵-۳۶ قرار دارد که فاصله بین حد شرقی و غربی آن حدود ۱۶۰ کیلومتر و عرض آن قریب به ۲۵ کیلومتر می‌باشد. رودخانه شاهرود مهم‌ترین و پر آب‌ترین رودخانه استان قزوین است. رودخانه‌های الموت‌رود و طالقان‌رود در محل روستای شیرکوه به هم پیوسته و رودخانه شاهرود را تشکیل می‌دهند. شکل ۱ موقعیت رودخانه شاهرود را به همراه ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری آب

Figure 1- Location of water sampling stations

1- Dissolved Oxygen (DO)
2- Biochemical Oxygen Demaon (BOD)
3- Potential of Hydrogen (pH)
4- Total Dissolved Solids (TDS)
5- Electrical Conductivity(EC)
6- Total Phosphorus (TP)
7- Total Nitrogen (TN)

بازه‌بندی رودخانه شاهرود بر اساس ۱۰ ایستگاه‌های نمونه‌برداری شامل ۴ ایستگاه روی شاخه اصلی رودخانه شاهرود و ۶ ایستگاه رویدو شاخه ورودی به این رودخانه (۲ ایستگاه روی الموت‌رود و ۴ ایستگاه روی طالقان‌رود) انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ و مشخصات بازه‌های رودخانه شاهرود در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۱، طول کل مسیر مورد بررسی در رودخانه شاهرود برابر ۱۸۹/۱۳ کیلومتر می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات بازه‌های رودخانه شاهرود مورد استفاده در مدل کیفی

Table 1- Characteristics of Shahrood River range used in qualitative model

ردیف	رودخانه	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله از پایین‌دست(کیلومتر)	طول بازه (کیلومتر)	ارتفاع (متر)	شیب بازه
۱	طالقان رود	SS1	۳۶/۱۸	۵۰/۸۸	۱۸۹/۱۳	-	۱۹۴۰	-
۲	طالقان رود	SS2	۳۶/۱۷	۵۰/۷۵	۱۷۶/۵۹	۱۲/۵۴	۱۷۹۶	۰/۰۹
۳	طالقان رود	SS3	۳۶/۲۰	۵۰/۶۳	۱۶۴/۱۰	۱۲/۴۹	۱۶۹۳	۰/۱۲
۴	الموت رود	SS4	۳۶/۴۰	۵۰/۶۸	۱۲۹/۴۸	۳۴/۶۲	۱۶۳۶	۰/۶۱
۵	الموت رود	SS5	۳۶/۳۹	۵۰/۳۹	۱۰۲/۴۹	۲۶/۹۹	۱۰۷۸	۰/۰۵
۶	طالقان رود	SS6	۳۶/۳۹	۵۰/۳۹	۱۰۱/۹۸	۰/۵۰	۱۰۵۸	۰/۰۳
۷	شاهرود	SS7	۳۶/۴۰	۵۰/۱۷	۸۵/۴۶	۱۶/۵۲	۹۲۰	۰/۱۲
۸	شاهرود	SS8	۳۶/۶۱	۴۹/۷۵	۲۶/۵۰	۵۸/۹۶	۴۸۶	۰/۱۴
۹	شاهرود	SS9	۳۶/۶۲	۴۹/۵۲	۰/۸۹	۲۵/۶۱	۳۲۶	۰/۱۶
۱۰	شاهرود	SS10	۳۶/۶۲	۴۹/۵۱	۰/۰۰	۰/۸۹	۲۷۹	۰/۰۲

نمونه‌برداری از رودخانه شاهرود طی چهار دوره در آبان‌ماه ۱۳۸۶، تیرماه ۱۳۸۷، شهریورماه ۱۳۸۷ و مهر ماه ۱۳۸۷ توسط سازمان حفاظت محیط زیست انجام شده است. زمان‌های نمونه‌برداری با توجه به تغییرات دبی رودخانه و نوع منبع آلاینده و زمان‌های تاثیرپذیری آن‌ها انتخاب شده است. اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی[1]، قلیاییت، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، کدورت، فسفر کل و نیتروژن کل از مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها می‌باشد. جدول ۲ لیست داده‌های مورد استفاده و مشخصات آماری آن‌ها را نشان می‌دهد.

1-Biochemical Oxygen Demand

جدول ۲- خلاصه آماری داده‌های رودخانه شاهرود (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹)

Table 2- Summary of Statistical data of Shahrood River (Environmental Protection Agency, 2010)

تاریخ نمونه‌برداری	آماره	Q (m^3/s)	T (^0C)	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	pH	EC (dS/m)	TS (mg/l)	Turbidity (NTU)	TP (mg/l)	TN (mg/l)
آبان ۱۳۸۶	مینیمم	۰/۸۸	۶/۳	۶/۱	۹/۰	۷/۷	۰,۳۹	۳۴۴	۱۰	۰/۰۲	۰/۶۵
	ماکزیمم	۹/۲۰	۹/۸	۹/۷	۳۸/۰	۸/۲	۰,۸۷	۱۴۵۰	۸۸۰	۰/۰۵	۲/۰۴
	میانگین	۳/۹۲	۸/۵	۷/۶	۱۸/۳	۷/۹	۰,۶۸	۷۷۵	۳۱۳	۰/۰۳	۱/۲۵
	انحراف معیار	۲/۶۷	۱/۲	۱/۲	۸/۷	۰/۲	۲۰.۰	۴۱۸	۳۲۲	۰/۰۱	۰/۴۵
تیر ۱۳۸۷	مینیمم	۰/۵۴	۱۳/۳	۶/۴	۱۸/۵	۸/۰	۰,۶۰	۳۸۰	۲	۰/۰۴	۰/۶۹
	ماکزیمم	۵/۱۰	۲۷/۳	۷/۹	۸۴/۰	۸/۵	۱,۳۴	۸۴۰	۱۸۰	۰/۰۶	۱/۳۴
	میانگین	۲/۷۰	۱۹/۵	۷/۴	۵۹/۵	۸/۲	۰/۹۲	۶۱۴	۴۶	۰/۰۵	۱/۰۴
	انحراف معیار	۱/۶۱	۵/۱	۰/۵	۲۸/۹	۰/۲	۰/۲۷	۲۱۲	۵۹	۰/۰۱	۰/۲۶
شهریور ۱۳۸۷	مینیمم	۰/۲۱	۱۲/۰	۶/۰	۱۱/۵	۷/۸	۰/۶۱	۳۸۵	۲	۰/۰۵	۰/۳۶
	ماکزیمم	۴/۷۶	۲۷/۰	۷/۸	۲۲/۵	۸/۲	۱/۳۰	۸۲۴	۹۰	۰/۱۳	۱/۰۵
	میانگین	۱/۸۴	۲۰/۱	۶/۹	۱۸/۸	۷/۹	۱/۰۰	۶۴۶	۳۹	۰,۰۷	۰/۶۲
	انحراف معیار	۱/۳۹	۴/۸	۰/۶	۳/۵	۰/۲	۰/۲۶	۱۷۷	۴۱	۰/۰۳	۰/۲۱
مهر ۱۳۸۷	مینیمم	۲/۸۳	۱۳/۵	۷/۸	۲/۴	۷/۹	۰/۴۶	۲۲۷	۳	۰/۸۹	۱/۱۳
	ماکزیمم	۹/۱۹	۲۳/۵	۱۱/۳	۴۲/۸	۸/۴	۰/۷۴	۴۲۸	۹۲	۱/۳۲	۸/۳۸
	میانگین	۵/۲۹	۱۹/۰	۱۰/۰	۹/۸	۸/۱	۰/۶۲	۳۳۲	۴۱	۱/۰۷	۳/۳۷
	انحراف معیار	۲/۳۴	۴/۱	۱/۰	۱۳/۱	۰/۱	۰/۱۰	۷۴	۴۰	۰/۱۷	۲/۱۴

* در جدول ۲، واحد درجه حرارت آب درجه سانتی‌گراد، دبی مترمکعب بر ثانیه، اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی دسی زیمنس بر متر می‌باشد.

معادله هندرسون– هاسلبالخ[1] برای محاسبه pH یک محلول با استفاده از ثابت تفکیک اسیدی بر اساس رابطه (۱) استفاده می‌شود.

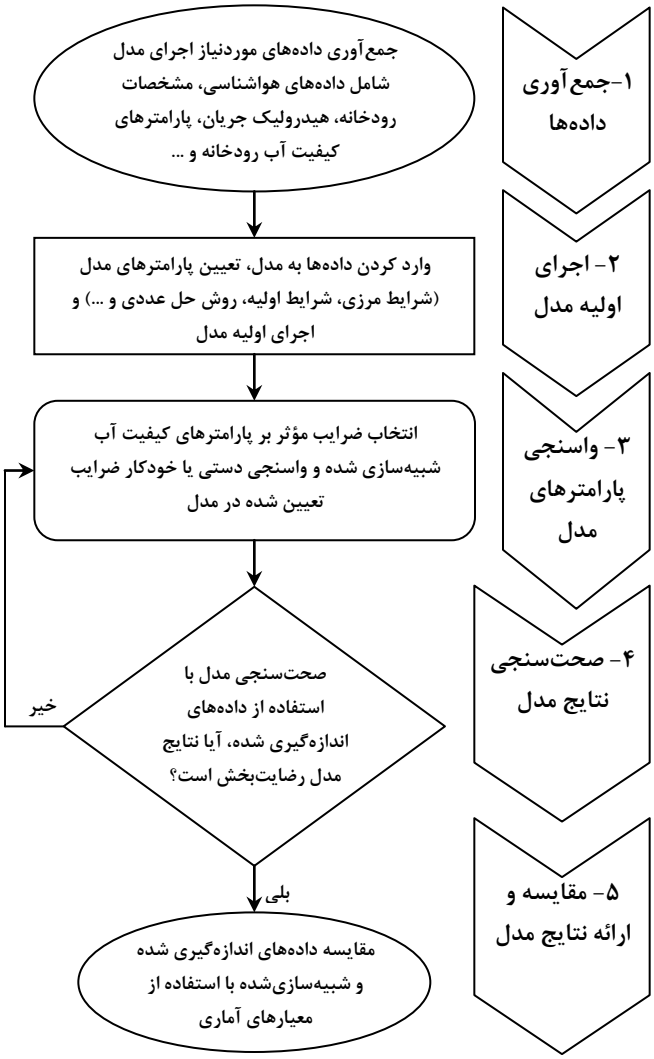
$$pH = pK_a + \log_{10}\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، [HA] غلظت مولی اسید نامحلول ضعیف، $[A^-]$ غلظت باز مزدوج این اسید و pK_a ثابت تفکیک اسیدی می‌باشد.

مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه شاهرود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw 5.1

در مقاله حاضر مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه شاهرود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw 5.1، در پنج مرحله کلی انجام شده است. این مراحل در شکل ۲ به صورت فلوچارت نشان داده شده است.

1 -Henderson–Hasselbalch equation



شکل ۲- فلوچارت مراحل مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2Kw

Figure 2- Flowchart of river water quality modeling process using QUAL2Kw model

در مقاله حاضر برای واسنجی مدل از داده‌های آبان ۱۳۸۶ و تیر ۱۳۸۷ و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ استفاده شده است. واسنجی خودکار ضرایب مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل انجام شده است. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهداتی از دو پارامتر آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(Y_{Obsi}-\overline{Y}_{Obs}\right)\left(Y_{Simi}-\overline{Y}_{Sim}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Y_{Obsi}-\overline{Y}_{Obs}\right)^2\sum_{i=1}^{N}\left(Y_{Simi}-\overline{Y}_{Sim}\right)^2} \quad (۲)$$

$$MAE=\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\left|Y_{Obsi}-Y_{Simi}\right|\right) \quad (۳)$$

که در روابط (۲) و (۳)، Y_{Obsi}، Y_{Simi}، $\overline{Y}_{Obs}$، $\overline{Y}_{Sim}$ به‌ترتیب مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی شده، میانگین مشاهداتی‌ها و

میانگین شبیه‌سازی شده‌ها در ایستگاه iام و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

یافته‌ها

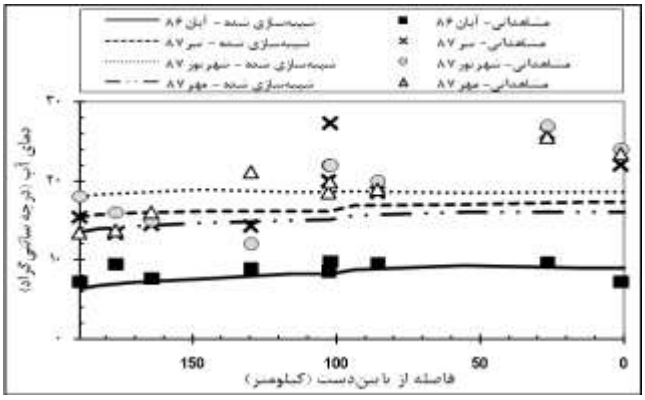
در نرم‌افزار QUAL2Kw.5.1 تعداد زیادی ضریب و پارامتر قابلیت انتخاب جهت واسنجی شدن را دارند. مقادیر تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای واسنجی شده در مدل مقاله حاضر با استفاده از روش واسنجی خودکار توسط الگوریتم ژنتیک در جدول۳ ارایه شده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مدل QUAL2Kw.5.1 با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 3 - The values of calibrated parameters in the QUAL2Kw model using the genetic algorithm

ردیف	دسته‌بندی پارمتر	ضریب	واحد	حداقل	حداکثر	مقدار واسنجی‌شده
۱	جامدات معلق غیرآلی	سرعت ته‌نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۰۶
۲	اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۱/۹۳
۳		نرخ اکسیداسیون	یک بر روز	۰	۵	۰/۵۴
۴	نیتروژن آلی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۰/۸۴
۵		نرخ ته‌نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۲۵
۶	آمونیوم	نرخ نیتریفیکاسیون	یک بر روز	۰	۱۰	۲/۱۵
۷	نیترات	نرخ دنیتریفیکاسیون	یک بر روز	۰	۲	۱/۰۳
۸	فسفر آلی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۳/۴۴
۹	فسفر غیرآلی	نرخ ته‌نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۰۱۴

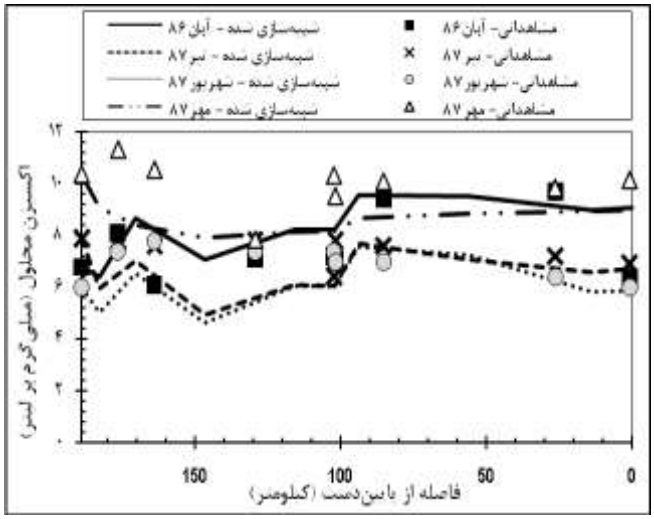
جدول ۳ نشان می‌دهد که مهم‌ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می‌باشد. از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که اثر زیادی بر محیط زیست سالم در یک رودخانه دارد، می‌توان به دمای آب، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و نیتروژن کل اشاره کرد که در ادامه نمودارهای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده این پارامترها ارایه شده است.شکل ۳ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر دمای آب را در چهار دوره اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای آب در چهار دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 3 - Observed and Simulated Water Temperature in Four Calibration and Validation Periods

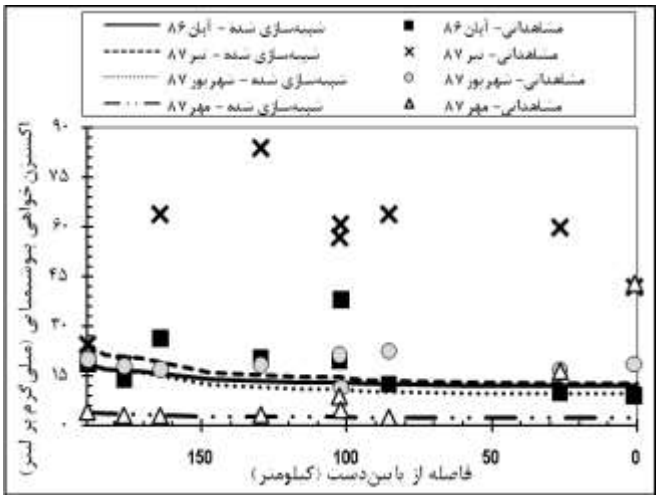
دمای آب یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که روی سایر پارامترهای کیفیت آب رودخانه تأثیرگذار است. به طور معمول هر چه دمای آب بالاتر باشد، سرعت واکنش‌های شیمیایی در آب بیش‌تر می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که به طور میانگین کم‌ترین و بیش‌ترین دمای آب اندازه‌گیری شده در رودخانه شاهرود مربوط به آبان ۱۳۸۶ و شهریور ۱۳۸۷ و به‌ترتیب برابر ۸/۷۱ و ۱۹/۵۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین با توجه به میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، بیش‌ترین و کم‌ترین دقت شبیه‌سازی مدل مربوط به آبان ۱۳۸۶ و مهر۱۳۸۷ و به‌ترتیب برابر ۱/۱۵ و ۴/۱۶ می‌باشد. شکل ۴ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر اکسیژن محلول را در چهار دوره مدل‌سازی شده نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اکسیژن محلول در چهار دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 4 - Observed and Simulated Dissolved Oxygen (DO) Values in Four Calibration and Validation Periods

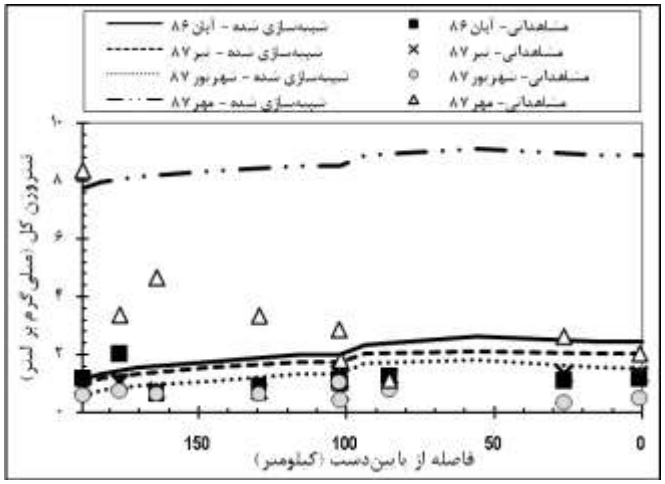
پارامتر اکسیژن محلول آب با توجه به این‌که برای هر نوع واکنش شیمیایی و همچنین حیات موجودات زنده در آب ضروری است، یکی از پارامترهای بسیار مهم در بین سایر پارامترهای کیفیت آب می‌باشد. غلظت اکسیژن محلول در آب به طور مستقیم به برخی از سایر پارامترهای کیفی از جمله دمای آب وابسته است. با توجه به شکل ۴، به طور میانگین حداقل و حداکثر اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده در رودخانه شاهرود در شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ و به‌ترتیب برابر ۶/۹۳ و ۹/۹۹ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین دقت مدل در شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول مربوط به تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۸۶ و ۱/۲۹ می‌باشد. شکل ۵ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی را در چهار دوره مدل‌سازی شده نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در چهار دوره مدل‌سازی شده

Figure 5 - Observed and simulated biochemical oxygen demand (BOD) Values in Four Calibration and Validation Periods

غلظت پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) در آب به طور مستقیم به میزان فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود در آب وابسته است به طوری‌که هر چه فعالیت‌های موجودات زنده و واکنش‌های شیمیایی در آب بیش‌تر باشد، مقدار مصرف اکسیژن محلول بیش‌تر و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی بیش‌تر می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که به طور میانگین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ و به‌ترتیب برابر ۵۲/۷۸ و ۹/۸۰ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. مدل بیش‌ترین و کم‌ترین دقت شبیه‌سازی اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی را به‌ترتیب در شهریور ۱۳۸۷ و تیر ۱۳۸۷ و با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۵/۲۰ و۳۶/۷۷ داشته است. شکل ۶ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر نیتروژن کل را در چهار دوره مدل‌سازی شده نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیتروژن کل در چهار دوره مدل‌سازی شده

Figure 6 - Observed and simulated total nitrogen Values in Four Calibration and Validation Periods

پارامتر نیتروژن کل از مجموع چهار فرم نیتروژن شامل نیتروژن آلی، نیتروزن آمونیاکی، نیتریت و نیترات بدست می‌آید. با توجه به شکل ۶ بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت نیتروژن کل به‌ترتیب در مهر ۱۳۸۷ و شهریور ۱۳۸۷ برابر ۳/۳۷ و ۰/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین دقت مدل در شبیه‌سازی نیتروژن کل در تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۵۹ و ۵/۲۳ بدست آمده است. نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw.5.1 برای پارامترهای مختلف در جدول ۴ ارایه شده است.

جدول ۴- نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

Table 4- The statistical results of the calibration and verification procedures of the QUAL2Kw model

ردیف	زمان نمونه‌برداری	آماره	پارامترهای مدل‌سازی شده						
			T	pH	EC	TN	TP	$CBOD_u$	DO
۱	آبان ۱۳۸۶(واسنجی)	MAE	۱/۱۵	۰/۴۳	۱۴۰	۰/۹۲	۰	۶/۱۹	۱/۰۴
		ضریب همبستگی	۰/۱۲	۰/۳	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۴۵	۰/۰۳	۰/۱۳
۲	تیر ۱۳۸۷(واسنجی)	MAE	۳/۹۹	۰/۲	۲۳۳/۳۳	۰/۵۹	۰	۳۶/۷۷	۰/۸۶
		ضریب همبستگی	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۱۴
۳	شهریور ۱۳۸۷(صحت‌سنجی)	MAE	۳/۸۶	۰/۲۳	۲۴۶/۶۷	۰/۵۹	۰/۰۶	۵/۲۰	۱/۱۴
		ضریب همبستگی	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴
۴	مهر ۱۳۸۷(صحت‌سنجی)	MAE	۴/۱۶	۰/۱۴	۸۱/۱۱	۵/۲۳	۱/۰۷	۷/۲۱	۱/۲۹
		ضریب همبستگی	۰/۸۱	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۶۱	۰/۱۱	۰/۲۳	۰/۲۳
داده‌های واسنجی		MAE	۲/۵۷	۰/۳۲	۱۸۶/۶۷	۰/۷۵	۰	۲۱/۴۸	۰/۹۶
		ضریب همبستگی	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۱۳
داده‌های صحت‌سنجی		MAE	۴/۰۲	۰/۱۹	۱۶۳/۸۹	۲/۹۱	۰/۵۶۵	۴/۱۸	۳/۱۲
		ضریب همبستگی	۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۵۳	۰/۰۷۵	۰/۱۲	۰/۱۴

مقدار میانگین قدرمطلق خطا هر چه به صفر نزدیک‌تر و مقدار ضریب همبستگی هر چه به یک نزدیک‌تر باشند حاکی از دقت بیش‌تر نتایج مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. جدول ۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین همبستگی برای پارامتر دمای آب در مهر ۱۳۸۷ و برابر ۰/۸۱ بدست آمده است. همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی دقت کم‌تری نسبت به سایر پارامترها داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مدل QUAL2Kw.5.1دقت بالایی در شبیه‌سازی پارامتر pH از خود نشان داد که با نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. همچنین نتایج تحقیق حاضد نشان داد که مهم‌ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می‌باشد که با نتایج شارما و همکاران (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد. نتایج مقاله حاضر دقت مناسب مدل QUAL2Kw.5.1را در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شاهرود نشان می‌دهد که شکری و همکاران (۱۳۹۳) چنین نتیجه‌ای را در مورد شبیه-سازی کیفی آمونیوم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده

ازمدلQUAL2Kw.5.1 عنوان کرده بودند. دقت شبیه‌سازی هر پارامتر با توجه به مقدار تغییرات آن در طول رودخانه متغیر می‌باشد. به نحوی‌که هر چه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف کم‌تر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی این پارامتر بیش‌تر خواهد بود. داشتن داده‌های دقیق از تغییرات پارامترهای هیدرولیکی رودخانه و جریان در طول رودخانه تأثیر زیادی در مدل‌سازی هیدرولیکی و بالتبع در مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه دارد. همچنین دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی به نوع داده‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی، مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در مرحله واسنجی تعداد ضرایب واسنجی شده، و تغییرات داه‌های مرحله صحت‌سنجی بستگی دارد.

تشکر و قدردانی

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مقاله از سازمان حفاظت محیط‌زیست تهیه شده است که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Hashemi, S. H., Ghasemi Ziarani, E., 2011. Contamination of load input from sub-basins to Samadirkabir reservoir by using QUAL2K model. Journal of Environmental Studies; 37 (57): 1-8 (in Persian).
2. Shokri, S., Hooshmand, A., Moaz, H., 2015. Qualitative simulation of ammonium and nitrate in the Gregor River using the QUAL2KW model. **J**ournal of **W**etland **E**cobiology; 7 (68): 23-57 (in Persian).
3. Khodam Mohammadi, M., Boustani, F., 2016. Assessment of self-healing power and the role of dissolved oxygen in the quality of water in the river of Khor (Case study: Droodzan Dam down to Lake Tashkh-Bakhtegan). Journal of Water Resources Engineering; 7 (27): 85-98 (in Persian).
4. Hosseini, P., Ildoromi, A.R., Hosseini, Y., 2016. The Study of Qual2kw Model Efficacy on River Self-purification (A Case Study of Karun River at Interval of Zargan to Kute Amir). Journal of Environmental Science and Technology; 18 (4): 103-122 (in Persian).
5. Hosseini, P., Hosseini, Y., 2017. Investigating the variation of self-propagation power of Karun River in 87 and 92 years using QUAL2KW model in Ahvaz city. AmirKabir Journal of Civil Engineering; 49 (1): 35-46 (in Persian).
6. Ashegh Moalla, M., Karimi, S., Malek Mohammadi, B., Jafari, H. R., 2015. Procedure of a comprehensive water quality management in rivers. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST); 2(2): 4-8.
7. Mehrasbi, M. R., Farahmand Kiaa, Z., 2015.Water Quality Modeling and Evaluation of Nutrient Control Strategies Using QUAL2K in the Small Rivers. Journal of Human, Environment and Health Promotion; 1(1): 1-11.
8. Zolfagharipoor, M. A., Ahmadi, A., 2016.A decision-making framework for river water quality management under uncertainty: Application of social choice rules.Journal of Environmental Management; 183(1):152-163.
9. Sharma, D., Kansal, A., Pelletier, G., 2017. Water quality modeling for urban reach of Yamuna River, India (1999–2009), using QUAL2Kw. Applied Water Science; 7(3): 1535–155