LAND COVER CHANGE IMPACTS ON THE HYDROLOGIC VARIABILITY, PEAK FLOOD DISCHARGE AND SEDIMENTATION

ALEMAYEHU ABATE SHAWUL

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NOVEMBER 2020

LAND COVER CHANGE IMPACTS ON THE HYDROLOGIC VARIABILITY, PEAK FLOOD DISCHARGE AND SEDIMENTATION IN THE UPPER AWASH BASIN, ETHIOPIA

by

ALEMAYEHU ABATE SHAWUL
Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

November 2020

I dedicate this dissertation to my parents

CERTIFICATE

This is certify that the thesis entitled "**Land Cover Change Impacts on the Hydrologic Variability, Peak Flood Discharge and Sedimentation"** being submitted by **Mr. Alemayehu Abate Shawul** to the **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the **degree of Doctor of Philosophy** is a record of the original bonafide research work carried by him under my guidance and supervision. The thesis work, in my opinion, has reached the requisite standards fulfilling the requirement for the **Degree of Doctor of Philosophy**.

The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Prof. Sumedha Chakma

Associate Professor

Department of Civil Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

Hauz Khas, New Delhi-110016

ACKNOWLEDGMENTS

First and foremost, I would like to express a heartfelt appreciation to my supervisor Prof. Sumedha Chakma, not only for the invaluable academic guidance but also for the all-round supports during this long academic journey. Without his constant encouragement, inspiration, understanding and constructive criticism, this would not have realized. I want to extend my most profound appreciation to the members of research committee SRC, to Prof. CT Dhanya and Prof. Somnath Baidya Roy for their constructive comments and critical insights which substantially helped me to improve the study starting from the early inception stage. I am thankful to the SRC chairman Prof. Ashok Gupta. I would also like to thank Dr. Saharia Manabendra for helpful suggestions. I am profoundly thankful to the thesis examiners for their genuine questions, comments and suggestions which have helped me to improve the final thesis report.

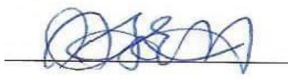
I am obliged to thank the institutions that helped me during data collection and granted me priceless input data. Mainly, the Ministry of Water, Irrigation and Energy (MoWIE), National Meteorological Services Agency (NMSA), Awash Basin Initiatives, Ethiopian Mapping Agency (EMA) and Ministry of Agriculture (MoA), Ethiopia for providing invaluable data including meteorological data, soil data, land use data, hydrological and sediment concentration data which were extensively used in this study. I am also thankful to the global data sources such as USGS for the series of Landsat imageries and DEM data, and to CFSR-NCEP, CPC-NOAA, and TRMM 3B42 data sources for providing daily gridded data free of costs. I would like to extend appreciations to AAU and ILRI for allowing me to use their libraries during a three months stay in Addis Ababa, Ethiopia.

I am immensely indebted to Mada Walabu University (MWU), my employer, for allowing me long period of leave to accomplish the study in IIT Delhi, and to the Ministry of Science and Higher Education (MoSHE) for granting me the scholarship. I must not fail to extend my gratefulness to my dear colleagues Mr. Shibiru A., Mr. Sintayehu F., Miss Bethlehem F. and everyone at MWU for their unreserved support in office related issues.

It gives me enormous pleasure to extend special thankfulness to all my colleagues in the water resource simulation lab, and friends in IIT Delhi who have helped, encouraged and shared with me valuable time throughout the duration of the study, it is not possible to mention all of them here, they know who they are, thank you!. Mainly, I would like to express my gratefulness to Arvind, Elias, Dr. Tewodros, Dr. Tamiru, Teklay, Lohit, Shushobhit, Rahul, Abhay, Abhishek, Saloni, Archana, Sandya, Raktim, Dr. Wondwosen, Hadi Brais, Dr. Habtamu, Dr. Firehun, Edo, Daniel and Solomon, for their support and friendship. I am highly indebted to all people in the IIT Delhi, particularly in the Civil Engineering Department, who assisted me in all the necessary administrative supports. I am grateful to Mr. N.R. Gehlot for the cooperation and support. I am also thankful to relatives, friends and everyone at home who constantly encouraged me throughout the study period.

Last but not least, I would like to express greatest gratitude to my beloved Mother W/o Asres Abeje, my Father Ato Abate Shawul, and to my brothers Wubshet, Agegnehu and Temesgen for their unwavering love and encouragement; without their constant and never ending concern, this would not have realized.

Alemayehu Abate Shawul



ABSTRACT

Quantitative assessment of the impact of land use/land cover (LC) changes and climate variability on the basin water balance, extreme hydrologic events and sedimentations are imperative for efficient policy decisions on sustainable water resources management. Most studies on the effect of LC change mainly focused on the mean streamflow conditions at large basins. However, the relative effects of individual land cover classes on the particular hydrologic components and extreme flow events on the local scale subbasins have received less attention. Thus, the main aim of this study are to assess the impact of land cover change on the hydrological fluxes mainly on the water balance components, flood events and sedimentation at multiple temporal and spatial scales in the Upper Awash Basin. Assessment of climate data quality, presence of monotonic trend, distribution of precipitation, and extreme climate indices were determined. The supervised method of image classification was applied to determine the historical LC changes based on series of Landsat imageries in the past 50 years. The near-future LC change scenarios were developed using the machine-learning approaches in the Land Change Modeler (LCM). The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was calibrated and validated at main gauged subbasins for runoff and sediment yield simulations. Moreover, to highlight the availability of alternative data sources, the performance of global precipitation databases was also evaluated for hydro-climatic studies. Comprehensive assessment of the relative effect of LC classes on the hydrologic components was performed using integrated approaches of hydrologic modeling and partial least squares regression (PLSR). The influence of past and probable future LC change on the extreme flood magnitude and frequency was examined by fitting the annual maximum daily discharge simulated for different LC change scenarios with probability distribution function. Moreover, the indicator of hydrologic alteration (IHA) was used to quantify the high and low environmental flow conditions for different land management and climate change scenarios.

The mean annual and dry season precipitation values demonstrated higher spatial and temporal variability, whereas, in the wetter seasons, it exhibited low precipitation concentration or regular distribution. The statistical trend test revealed a significantly increasing trend of maximum temperature series; however, the trend of annual and extreme precipitation indices was not significant for the majority of stations. Evidently, the multi-temporal LC change detection revealed significant increments in the areal extent of the cropland and urban areas at the expense of the forests, pasture and shrubland coverage. Similarly, the modeled LC change scenarios of the near future years between 2025 and 2035 exhibited intense expansion of

cropland and urban areas, and substantial loss in the forest and shrubland areas. The SWAT model performed well for simulation of daily and monthly streamflow, and monthly sediment yield at main gauged subbasins. In addition, the performance of global precipitation estimates for hydrologic simulation was found to be encouraging for hydro-climatic studies in data-scarce tropical regions. In relatively smaller watersheds, the suitability of global precipitation was lower due to the limited number of data points resulted from the coarser resolution of the data sources.

The monoplot of PLSR components for LC change impact on the annual basin values exhibited that groundwater is highly correlated with the forest areas and lateral flow is strongly correlated with pasture. While surface runoff is mainly attributed to the change in urban and cropland, and sediment yield is mainly attributed to the cropland area. The Variable Importance for the Projection (VIP) also revealed that the decline of groundwater is mainly due to urban area; whereas, the increase in forest area enhanced groundwater flow. PLSR was found to be effective statistical tool for assessment of the relative impacts multiple land use methods on hydrologic variability and sediment yield. In addition to watershed morphometric parameters, hydrologic parameters such as surface runoff, runoff coefficient and water yield were used to infer major sediment source areas. Prioritization of sub-watersheds for best management practices can be effectively performed by integrating GIS, hydrologic modeling and advanced statistical tools. Riparian zone and steep slope reforestation scenario can be seen to significantly reduce the peak flood discharges and sedimentation. In contrast, the urban sprawl and vegetation disturbance scenarios demonstrated escalation of surface runoff, sediment yield and flood magnitudes, and nonetheless significant decline in the baseflows.

The dynamics in the land cover largely increased the frequency and magnitude of extreme flood discharge. The increase in peak runoff is marginally varied for higher return periods such as 200- or 100-year than the 5- or 2-year floods. Moreover, the magnitude and trends of several extreme climate change indices for baseline and future climate scenarios were computed and unlike the extreme precipitation indices, most of the temperature indices demonstrated significantly increasing trends. Overall, the effect of land cover deterioration on the hydrologic processes, extreme hydrologic events and sediment yield is highly pronounced in the smaller subbasins. The hydrologic impact of climate change would be more significant when accompanied by probable future LC change and the coupled influence is more significant on extreme hydrologic events than mean streamflow values. A more systematic understanding was achieved for attributing the recurring environmental changes to hydrological processes in one of the most dynamic tropical river basins.

सार

बेसिन जल संतुलन, चरम जलविद्युत घटनाओं और अवसादन पर भूमि उपयोग / भूमि कवर (एलसी) परिवर्तन और जलवायु परिवर्तनशीलता के प्रभाव का मात्रात्मक मूल्यांकन, स्थायी जल संसाधन प्रबंधन पर कुशल नीतिगत निर्णयों के लिए आवश्यक हैं। लैंडकवर परिवर्तन के प्रभाव पर अधिकांश अध्ययन मुख्य रूप से बड़े बेसिन में औसत प्रवाह की स्थिति पर केंद्रित थे। हालांकि, विशेष रूप से हाइड्रोलॉजिकल घटकों और स्थानीय सबबेसिन पैमाने वाली चरम प्रवाह की घटनाओं पर व्यक्तिगत भूमि कवर वर्गों के सापेक्ष प्रभावों पर कम ध्यान दिया गया है। इस प्रकार, इस अध्ययन का मुख्य उद्देश्य ऊपरी अस्थायी बेसिन में हाइड्रोलॉजिकल फ्लक्स मुख्य रूप से जल संतुलन घटकों, बाढ़ की घटनाओं और लौकिक और स्थानिक अवसादन पर भूमि कवर परिवर्तन के प्रभाव का आकलन करना है। जलवायु डेटा की गुणवत्ता का आकलन, लयबद्धता की उपस्थिति, वर्षा का वितरण, और चरम जलवायु सूचकांक निर्धारित किए गए थे। पिछले 50 वर्षों में लैंडसैट इमैजरीज की श्रृंखला के आधार पर ऐतिहासिक एलसी परिवर्तनों को निर्धारित करने के लिए छवि वर्गीकरण की पर्यवेक्षण पद्धति लागू की गई थी। भूमि परिवर्तन मॉडलर (एलसीएम) में मशीन-लर्निंग दृष्टिकोण का उपयोग करके निकट भविष्य के एलसी परिवर्तन परिदृश्य विकसित किए गए थे। मृदा और जल मूल्यांकन उपकरण (स्वाट) मॉडल को अपवाहित किया गया था और अपवाह और तलछट उपज सिमुलेशन के लिए मुख्य गेज किए गए सबबेसिन पर मान्य किया गया था। इसके अलावा, वैकल्पिक डेटा स्रोतों की उपलब्धता को उजागर करने के लिए, हाइड्रोइमैटिक अध्ययन के लिए वैश्विक वर्षा डेटाबेस के प्रदर्शन का भी मूल्यांकन किया गया था। हाइड्रोलॉजिकल मॉडलिंग और आंशिक रूप से कम से कम वर्गों प्रतिगमन (PLSR) के एकीकृत दृष्टिकोण का उपयोग करके हाइड्रोलॉजिकल घटकों पर लैंडकवर वर्गों के सापेक्ष प्रभाव का व्यापक मूल्यांकन किया गया था। अत्यधिक बाढ़ परिमाण और आवृत्ति पर अतीत और संभावित भविष्य के लैंडकवर परिवर्तन के प्रभाव की जांच संभावना वितरण फंक्शन के साथ विभिन्न एलसी परिवर्तन परिदृश्यों के लिए नकली वार्षिक अधिकतम दैनिक निर्वहन को फिट करके की गई थी। इसके अतिरिक्त, जलविभाजक परिवर्तन (आईएचए) के संकेतक का उपयोग, विभिन्न भूमि प्रबंधन और जलवायु परिवर्तन परिदृश्यों के लिए उच्च और निम्न पर्यावरणीय प्रवाह स्थितियों को निर्धारित करने के लिए किया गया था।

औसत वार्षिक और शुष्क मौसम वर्षा के मूल्यों ने उच्च स्थानिक और लौकिक परिवर्तनशीलता का प्रदर्शन किया, जबकि, गीले मौसम में, यह कम वर्षा एकाग्रता या नियमित वितरण का प्रदर्शन किया। सांख्यिकीय प्रवृत्ति परीक्षण से अधिकतम तापमान श्रृंखला की काफी बढ़ती प्रवृत्ति का पता चला; हालांकि, अधिकांश स्टेशनों के लिए वार्षिक और अत्यधिक वर्षा सूचकांकों का रुझान प्रभावपूर्ण नहीं था। जाहिर

है, बहु-लौकिक लैंडकवर परिवर्तन का पता लगाने से वनों, चरागाह और झाड़ी-झाड़ियों के कवरेज की कीमत पर फसल भूमि और शहरी क्षेत्रों की क्षेत्रीय सीमा में महत्वपूर्ण वृद्धि का पता चला। इसी तरह, 2025 और 2035 के बीच निकट भविष्य के वर्षों के प्रतिरूपित लैंडकवर परिवर्तन ने फसल भूमि और शहरी क्षेत्रों के गहन विस्तार का प्रदर्शन किया, तथा वन और झाड़ी वाले क्षेत्रों में पर्याप्त नुकसान हुआ। स्वाट मॉडल ने मुख्य अनुमानित सबबेसिन में दैनिक एवं मासिक धारा प्रवाह और मासिक तलछट उपज के अनुकरण के लिए अच्छा प्रदर्शन किया। इसके अलावा, हाइड्रोलॉजिक सिमुलेशन के लिए वैश्विक वर्षा अनुमानों का प्रदर्शन डेटा-दुर्लभ उष्णकटिबंधीय क्षेत्रों में हाइड्रो-क्लाइमेटिक अध्ययनों के लिए उत्साहजनक पाया गया। अपेक्षाकृत छोटे जलक्षेत्रों में, वैश्विक वर्षा की उपयुक्तता कम थी क्योंकि डेटा स्रोतों की सीमित संख्या के परिणामस्वरूप डेटा बिंदुओं की सीमित संख्या थी।

वार्षिक बेसिन मूल्यों पर नियंत्रण रेखा परिवर्तन के लिए पीएलएसआर घटकों के मोनोप्लॉट ने दर्शाया कि भूजल अत्यधिक वन क्षेत्रों से संबंधित है और पार्श्व प्रवाह दृढ़ता से चरागाह के साथ सहसंबद्ध है। जबकि सतह अपवाह मुख्य रूप से शहरी और क्रॉपलैंड में परिवर्तन के लिए जिम्मेदार है, और तलछट उपज मुख्य रूप से फसल भूमि क्षेत्र के लिए जिम्मेदार है। वैरिएबल इंपोर्टेंस फॉर द प्रोजेक्शन (वीआईपी) ने यह भी खुलासा किया कि भूजल की गिरावट मुख्य रूप से शहरी क्षेत्र के कारण है; जबकि, वन क्षेत्र में वृद्धि से भूजल प्रवाह में वृद्धि हुई है। पीएलएसआर को जलविज्ञानी परिवर्तनशीलता और अवसादन उपज पर कई भूमि उपयोग विधियों के सापेक्ष प्रभावों के आकलन के लिए प्रभावी सांख्यिकीय उपकरण पाया गया। वाटरशेड मॉर्फोमेट्रिक मापदंडों के अलावा, प्रमुख अपक्षय स्रोत क्षेत्रों में अनुमान लगाने के लिए सतह अपवाह, अपवाह गुणांक और पानी की उपज जैसे हाइड्रोलॉजिक मापदंडों का उपयोग किया गया था। सर्वोत्तम प्रबंधन प्रथाओं के लिए उप-जलक्षेत्रों का प्राथमिकताकरण जीआईएस, हाइड्रोलॉजिकल मॉडलिंग और उन्नत सांख्यिकीय उपकरणों को एकीकृत करके प्रभावी ढंग से किया जा सकता है। रिपेरियन ज़ोन और खड़ी ढलान पुनर्वितरण परिदृश्य को चरम बाढ़ के निर्वहन और अवसादन को कम करने के लिए देखा जा सकता है। इसके विपरीत, शहरी फैलाव और वनस्पति की गड़बड़ी परिदृश्यों ने सतह अपवाह, तलछट उपज और बाढ़ परिमाण में वृद्धि का प्रदर्शन किया, और फिर भी बेसफ्लो में महत्वपूर्ण गिरावट आई।

भूमि कवर में गतिशीलता ने बड़े पैमाने पर अत्यधिक बाढ़ निर्वहन की आवृत्ति और परिमाण में वृद्धि की है। 5 या 2-वर्ष की बाढ़ की तुलना में 200 या 100-वर्ष के रूप में उच्च वापसी अवधि के लिए शिखर अपवाह में मामूली वृद्धि हुई है। इसके अलावा, बेसलाइन और भविष्य के जलवायु परिदृश्यों के लिए कई चरम जलवायु परिवर्तन सूचकांकों के परिमाण और रुझानों की गणना की गई और अत्यधिक

वर्षा सूचकांकों के विपरीत, अधिकांश तापमान सूचकांकों ने काफी बढ़ते रुझान का प्रदर्शन किया। कुल मिलाकर, जलविभाजक प्रक्रियाओं, अति जलजमाव की घटनाओं और तलछट की उपज पर भूमि के आवरण के बिगड़ने का प्रभाव छोटे उप बेसिन में अत्यधिक स्पष्ट है। संभावित भावी नियंत्रण रेखा परिवर्तन के साथ जलवायु परिवर्तन का हाइड्रोलॉजिक प्रभाव अधिक महत्वपूर्ण होगा और औसत धारा प्रवाह मानों की तुलना में युग्मित प्रभाव चरम हाइड्रोलॉजिकल घटनाओं पर अधिक महत्वपूर्ण है। सबसे गतिशील उष्णकटिबंधीय नदी घाटियों में से एक में हाइड्रोलॉजिकल प्रक्रियाओं के लिए आवर्ती पर्यावरण परिवर्तनों को जिम्मेदार ठहराने के लिए एक अधिक व्यवस्थित समझ हासिल की गई थी।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

AMD	Annual Maximum Daily
AOGCMs	Atmosphere-Ocean General Circulation Models
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CA	Cellular Automata
CC	Correlation Coefficients
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CII	Concentration Impact Index
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project phase 5
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CPC	Climate Prediction Center
CSA	Central Statistical Authority of Ethiopia
DEM	Digital Elevation Model
EMA	Ethiopian Mapping Authority
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
FAST	Fourier amplitude sensitivity test
FDRE	The Federal Democratic Republic of Ethiopia
GCM	Global Circulation Model
GCPs	Ground Control Points
GHG	Greenhouse gases
GIS	Geographic Information System
HEC-SSP	Hydrologic Engineering Center- Statistical Software Package
IDW	Inverse Distance Weighted
IHA	Indicator of Hydrologic Alteration
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITCZ	Inter-tropical Convergence Zone
LAMs	Limited area models
LC or LULC	Land use/land cover
LCM	Land Change Modeler
LII	Load Impact Index
LUAII	Load per Unit Area Index
MK	Mann-Kendall trend test
MLP	Multi-Layer Perceptron

MoA	Ministry of Agriculture
MoWIE	Ministry of Water Irrigation and Energy
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMSA	National Meteorological Service Agency of Ethiopia
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCA	Principal Component Analysis
PCI	Precipitation Concentration Index
PLSR	Partial Least Squares Regression
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
SCS	Soil Conservation Service
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SNHT	Standard Normal Homogeneity Test
SPI	Standardized Precipitation Index
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting version 2
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT calibration and uncertainty program
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UNDESA	United Nations Department of Economic and Social Affairs
UNDP	United Nations Development Programme
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
USLE	Universal Soil Loss Equation
UTM	Universal Traverse Mercator
VIP	Variable Importance for the Projection
WCRP	World Climate Research Program
WMO	World Meteorological Organization