

**SNOW AND GLACIER MELT RUNOFF MODELING IN BEAS
RIVER BASIN USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES**

GOPINADH RONGALI



**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

JUNE 2022

©Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi.2022.

**SNOW AND GLACIER MELT RUNOFF MODELING IN BEAS
RIVER BASIN USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES**

by

GOPINADH RONGALI

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2022

To My Family Members
&
Especially To My Beloved Father

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**Snow and Glacier Melt Runoff Modeling in Beas River Basin Using Remote Sensing and GIS Techniques**” being submitted by **Mr. Gopinadh Rongali** to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a bonafide record of research work carried out by him under my supervision and guidance. The thesis work, in my opinion, has reached the requisite standard fulfilling the requirements for the degree of **Doctor of Philosophy**.

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

Prof. Dr. Ashok K. Keshari
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

Prof. Dr. Ashvani K. Gosain
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

Prof. Dr. Rakesh Khosa
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank everyone who helped in the completion of this research work. The successful completion of my PhD has been made possible through the practical and professional support and advice from many people, institutions, and departments. First and foremost, I would like to thank my thesis supervisors Professor Ashok Kumar Keshari, Professor Ashvani Kumar Gosain and Professor Rakesh Khosa. Throughout my life, I will remember for their valuable guidance, constant support, and immense patience during my entire research work. Their door has always been open for me and my other research scholars for insightful technical guidance about the various aspects of research. Their deep knowledge in the field and fruitful discussions has brought many ideas in carrying out my research in this very attractive field since beginning of the work.

I would like to express my sincere thanks to my SRC members Professor J T Shahu, Professor Sagnik Dey and Professor C T Dhanya for being a part of my committee member and their suggestions helped me a lot to come through this research work.

I want to record my gratitude to the faculty members of Civil Engineering Department for their help and giving me an opportunity to carry out this research work here. I would also like to appreciate the staff of Civil Engineering Department especially N R Gehlot for providing me helpful co-operation throughout the completion of this research work.

IIT Delhi has always been away from home. I have made so many friends since I have joined here, many more than can be mentioned here. I would like to acknowledge all PhD fellows with whom I shared social life and experience. The discussion with my colleagues contributed a lot to the progress of this research. Special thanks go to Eliza, Anupriya, Vinnarasi, Jatin, Himanshu and Satish for their warm friendship.

Special thanks to Basant, Nitesh, Ajay, Amarsinh, Sameer and Mohd. Mohsin as they were working on their PhDs in parallel with me and with whom I have shared many experiences including suffering and joy during the entire period of our PhD studies. The road was long, with many ups and downs along the way, but together we managed. They helped me in every step worth more than mentioned here.

Finally, I am very thankful to all my family members and relatives, to my mother and father for their love, support, and prayers. It's been a long time we have been living far away from each other, but I can't remember a moment where they were not with me. Without your encouragement, support and sacrifice my study would not have been possible. I only hope that someday I could reciprocate all love and care they provided to me during hard moments. I also want to thank my elder brother Bhanu and my sister-in-law Aruna for their support and encouragement. My special thanks to my younger brother Nani and sister-in-law Navya for their support and encouragement. I also want to thank my father-in-law, mother-in-law and cousin sister Jayasree.

Finally, I owe heartfelt thanks to my lovely wife Sai Deepika and our little prince Bhavigna (Junnu) for their patience, understanding and tolerance for all the inconvenience during my PhD.

Last but not the least I praise the Almighty GOD for his love and blessings along all my ways.

June 2022

(Gopinadh Rongali)

ABSTRACT

An approach based on remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) has been presented to carry out snow and glacier melt runoff modeling using Landsat satellite data. It consists of five parts, the first part deals with the estimation of the land surface temperature (LST) using mono-window (MW) and split-window (SW) algorithms whereas the second part deals with the estimation of temperature lapse rate (TLR) using Landsat-8 and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) satellite data. The third part deals with the cloud and cloud shadow detection and removal techniques for optical data, and the fourth part deals with snow cover area (SCA) mapping using normalized difference snow index (NDSI) technique which can make use of the results from the third part in case of satellite data having cloud and cloud shadow. The first, second and, third parts contribute to the fourth part for precisely mapping snow cover area. Whereas the fifth part deals with snow and glacier melt runoff modeling using the degree-day method, and the results obtained from the first four parts of the methodology become input to the runoff modeling. The methodology presented has been applied to the Beas River basin in Western Himalaya, India.

A critical appraisal of various LST inversion algorithms is shown in this study. These algorithms include the mono-window (MW) and split-window (SW) methods. For the Beas River basin, the MW algorithm was applied to estimate LST using Landsat-8 (Path-147 and Row-38) utilising TIRS band 10 data with a 100-m resolution. For the estimation of LST, the SW method takes spectral radiance and emissivity from two bands of the TIRS as input. Using the TIRS bands

10 and 11, the spectral radiance has been calculated. Emissivity has been determined using the normalised difference vegetation index (NDVI) proportion of vegetation technique, with bands 4 and 5 (30-m resolution) from the operational land imager (OLI). The MW LST results were also compared to air temperature data, which showed a good match. The MW methodology proposed in this study can be used to estimate LST using Landsat-8 TIRS band 10 data in an effective manner. The estimates of LST from the TIRS and OLI bands using the SW algorithm are found to be accurate and close to the in-situ air temperature measurements and the LST values obtained from the MW algorithm. Results obtained show that the values of LST are high in the barren/rocky areas and low in the snow/glacier areas. The study reveals that the LST estimates from SW and MW algorithms are linearly transferable with negligible loss of accuracy. The LST estimates from the SW algorithm differs at most by up to 5°C with the measured air temperature.

The temperature lapse rate (TLR) is an important component in snowmelt runoff modelling, and it has been computed for the Beas River basin in the Western Himalaya. . The LST of the study area is negatively correlated with elevation values obtained from the United States Geological Survey's (USGS) advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) global digital elevation model (GDEM) data, indicating that the LST and elevation have an inverse relationship. The TLRs for the Beas River basin area for the period 18 April 2013 to 27 June 2015 are in the range 0.71°C/100 m to 0.87°C/100 m. The results are matched with the lapse rates estimated with the help of MODIS LST maps. The in-situ air temperature and LST from Landsat-8 and MODIS-Terra data have been found to be highly correlated, making this study immensely useful for snowmelt runoff modelling in the Himalayan region.

SCA plays a significant role in high-altitude regions of mountainous hydrology. The Beas River basin, which is a mainly snow-fed river, is in the Western Himalayas and is a part of the Indus River system. Snowmelt runoff modelling, in particular, uses SCA data as a crucial element in a variety of scientific investigations and management applications. The present study has investigated the accuracy of the MODIS-Terra (MOD10A1) and Landsat-8 data in snow cover mapping under Himalayan conditions. Total SCA has been estimated with the help of these two datasets over 3 years. In this study, snow cover in the Beas River basin region has been determined by applying the NDSI algorithm from Landsat-8 and MODIS-Terra satellite data which detects snow cover area. The snow cover mapping, which is an essential process in snow hydrological modelling, involves distinguishing snow pixels from non-snow pixels. Totally twelve Landsat-8 and MODIS images have been used for the snow cover mapping on a monthly basis from April to October of the years 2013 to 2015. The ASTER GDEM with a spatial resolution of (30 m) has been used to delineate the catchment boundary, stream network, slope, and aspect maps. For a threshold value greater than 0.4, the area is regarded as snowy, otherwise, it is deemed as a snow-free area. This type of categorization has the benefit of SCA estimation under mountain shadow conditions. The mean SCA in this region of the Beas River basin has been found to be between 40 and 51 %, with a mean of around 44 % of the overall basin area of 5382 sq. km. For determining the SCA of the study area, snow accumulation and depletion curves have also been produced.

Using the Landsat-8 image data (WRS2: Path/Row =147/38, collected on April 24, 2015), this study illustrates a new way for detecting and removing cloud and cloud shadows. This method uses six of the nine bands for modification in order to calculate the intensity of cloud and cloud shadows, which is then removed. The spectral information of the various bands is utilised in this

manner. According to the validation, the cloud and cloud shadows contaminated pixels are properly recognised, with overall accuracies of 97 and 96 percent, respectively. However, this method's usefulness is limited when dealing with dense clouds and cloud shadows. This methodology has the potential to be used for atmospheric corrections to improve landscape change detection with further development.

Snowmelt runoff estimation is critical for India's western Himalayan rivers, which are critical for hydropower generation and water storage during the non-monsoon season. A degree-day method based snowmelt runoff model (SRM) has been presented to estimate snow and glacier melt runoff on a daily basis in the Beas River basin up to Pandoh dam during April, 2013 and October, 2015. The model's input parameters are derived from existing maps, satellite data, metrological, and hydrological data. The basin's relief has been divided into 12 zones having 500-meter elevation. TLR has been derived from the observed temperature at three locations inside the basin to estimate the temperature for these elevation zones.

The basin's SCA is calculated using Landsat-8 satellite data. For each elevation zone, the runoff created by snow-covered and snow-free areas is estimated individually. For the simulation period of April 2013–October 2015, the average coefficient of determination (R^2) for the snowmelt season in the Beas River basin is 0.77. The average measured runoff volume is 24009.40 (10^6 m^3) and, the average measured runoff is 802.47 (m^3/s), whereas the average computed runoff volume is 25784.04 (10^6 m^3) and, the average computed runoff is 772.51 (m^3/s). The average volume difference is (+) 6.68%.

For better modelling, more focus is needed to strengthen the spatial and temporal hydro-meteorological database for the study area. The SRM model is a degree-day model that is more sensitive to temperature differences at various elevations. Because snow is the region's primary supply of water, a precise estimate of snow equivalent is required. This necessitates the installation of meteorological stations inside the study area. The SRM model is adequate for flood forecasts and water resource management in the study area, based on the values of R^2 and D_v for the melting season simulation.

सार

रिमोट सेंसिंग (आरएस) और भौगोलिक सूचना प्रणाली (जीआईएस) पर आधारित एक दृष्टिकोण को लैंडसैट उपग्रह डेटा का उपयोग करके हमारे बर्फ और ग्लेशियर पिघले रनऑफ मॉडलिंग को ले जाने के लिए प्रस्तुत किया गया है। इसमें पाँच भाग होते हैं, पहला भाग मोनो-विंडो (MW) और स्प्लिट-विंडो (SW) एल्गोरिदम का उपयोग करके भूमि की सतह के तापमान (LST) के आकलन से संबंधित है, जबकि दूसरा भाग तापमान चूक दर (TLR) के अनुमान से संबंधित है।) लैंडसैट -8 और मध्यम रिज़ॉल्यूशन इमेजिंग स्पेक्ट्रोमाडोमीटर (MODIS) उपग्रह डेटा का उपयोग करना। तीसरा भाग ऑप्टिकल डेटा के लिए क्लाउड और क्लाउड शैडो डिटेक्शन और रिमूवल तकनीकों से संबंधित है, और चौथा भाग नॉर्मलाइज्ड डिफरेंशियल स्नो इंडेक्स (NDSI) तकनीक का उपयोग करके स्नो कवर एरिया (SCA) मैपिंग से संबंधित है, जो तीसरे भाग के परिणामों का उपयोग कर सकता है। क्लाउड और क्लाउड शैडो वाले उपग्रह डेटा के मामले में भाग। पहला, दूसरा और तीसरा भाग बर्फ से ढके क्षेत्र को सटीक रूप से मैप करने के लिए चौथे भाग में योगदान देता है। जबकि पाँचवाँ भाग डिग्री-दिवस पद्धति का उपयोग करते हुए बर्फ और ग्लेशियर पिघल अपवाह मॉडलिंग से संबंधित है, और कार्यप्रणाली के पहले चार भागों से प्राप्त परिणाम अपवाह मॉडलिंग के लिए इनपुट बन जाते हैं। प्रस्तुत पद्धति पश्चिमी हिमालय, भारत में ब्यास नदी बेसिन पर लागू की गई है।

इस अध्ययन में विभिन्न एलएसटी उलटा एल्गोरिदम का एक महत्वपूर्ण मूल्यांकन दिखाया गया है। इन एल्गोरिदम में मोनो-विंडो (मेगावाट) और स्प्लिट-विंडो (एसडब्ल्यू) विधियां शामिल हैं। ब्यास नदी बेसिन के लिए, 100-मीटर रिज़ॉल्यूशन के साथ TIRS बैंड 10 डेटा का उपयोग करते हुए Landsat-8 (पथ-147 और पंक्ति-38) का उपयोग करके LST का अनुमान लगाने के लिए MW एल्गोरिथ्म लागू किया गया था। एलएसटी के आकलन के लिए, एसडब्ल्यू विधि इनपुट के रूप में टीआईआरएस के दो बैंडों से वर्णक्रमीय चमक और उत्सर्जन लेती है। TIRS बैंड 10 और 11 का उपयोग करते हुए, वर्णक्रमीय चमक की गणना की गई है।

परिचालन भूमि इमेजर (OLI) से बैंड 4 और 5 (30-मीटर रिज़ॉल्यूशन) के साथ वनस्पति तकनीक के सामान्यीकृत अंतर वनस्पति सूचकांक (NDVI) अनुपात का उपयोग करके उत्सर्जन निर्धारित किया गया है। MW LST परिणामों की तुलना हवा के तापमान के आंकड़ों से भी की गई, जिसने एक अच्छा मेल दिखाया। इस अध्ययन में प्रस्तावित MW कार्यप्रणाली का उपयोग प्रभावी तरीके से Landsat-8 TIRS बैंड 10 डेटा का उपयोग करके LST का अनुमान लगाने के लिए किया जा सकता है। SW एल्गोरिथम का उपयोग करते हुए TIRS और OLI बैंड से LST के अनुमान सटीक और इन-सीटू वायु तापमान माप और MW एल्गोरिथम से प्राप्त LST मानों के करीब पाए जाते हैं। प्राप्त परिणामों से पता चलता है कि एलएसटी का मान बंजर/चट्टानी क्षेत्रों में अधिक और बर्फ/ग्लेशियर क्षेत्रों में कम है। अध्ययन से पता चलता है कि एसडब्ल्यू और मेगावाट एल्गोरिथम से एलएसटी अनुमान सटीकता के नगण्य नुकसान के साथ रैखिक रूप से हस्तांतरणीय हैं। एसडब्ल्यू एल्गोरिथम से एलएसटी का अनुमान मापा हवा के तापमान के साथ अधिकतम 5 डिग्री सेल्सियस तक भिन्न होता है।

स्रोमेल्ट अपवाह मॉडलिंग में तापमान चूक दर (टीएलआर) एक महत्वपूर्ण घटक है, और इसकी गणना पश्चिमी हिमालय में ब्यास नदी बेसिन के लिए की गई है। . अध्ययन क्षेत्र का एलएसटी संयुक्त राज्य भूवैज्ञानिक सर्वेक्षण (यूएसजीएस) के उन्नत अंतरिक्षजनित थर्मल उत्सर्जन और प्रतिबिंब रेडियोमीटर (एएसटीईआर) वैश्विक डिजिटल उन्नयन मॉडल (जीडीईएम) डेटा से प्राप्त ऊंचाई मूल्यों के साथ नकारात्मक रूप से सहसंबद्ध है, यह दर्शाता है कि एलएसटी और ऊंचाई में उलटा है रिश्ता। 18 अप्रैल 2013 से 27 जून 2015 की अवधि के लिए ब्यास नदी बेसिन क्षेत्र के लिए टीएलआर 0.71 डिग्री सेल्सियस/100 मीटर से 0.87 डिग्री सेल्सियस/100 मीटर की सीमा में हैं। परिणाम मोडिस एलएसटी मानचित्रों की सहायता से अनुमानित चूक दरों से मेल खाते हैं। लैंडसैट -8 और मोडिस-टेरा डेटा से इन-सीटू हवा का तापमान और

एलएसटी अत्यधिक सहसंबद्ध पाया गया है, जिससे यह अध्ययन हिमालयी क्षेत्र में स्नोमेल्ट अपवाह मॉडलिंग के लिए बेहद उपयोगी है।

पर्वतीय जल विज्ञान के उच्च ऊंचाई वाले क्षेत्रों में एससीए महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। ब्यास नदी बेसिन, जो मुख्य रूप से बर्फ से सिंचित नदी है, पश्चिमी हिमालय में है और सिंधु नदी प्रणाली का एक हिस्सा है। स्नोमेल्ट अपवाह मॉडलिंग, विशेष रूप से, विभिन्न वैज्ञानिक जांच और प्रबंधन अनुप्रयोगों में एक महत्वपूर्ण तत्व के रूप में एससीए डेटा का उपयोग करता है। वर्तमान अध्ययन ने हिमालयी परिस्थितियों में स्नो कवर मैपिंग में MODIS-टेरा (MOD10A1) और लैंडसैट -8 डेटा की सटीकता की जांच की है। 3 वर्षों में इन दो डेटासेट की सहायता से कुल SCA का अनुमान लगाया गया है। इस अध्ययन में, ब्यास नदी बेसिन क्षेत्र में बर्फ के आवरण का निर्धारण लैंडसैट-8 और मोडिस-टेरा उपग्रह डेटा से एनडीएसआई एल्गोरिथम को लागू करके किया गया है जो बर्फ कवर क्षेत्र का पता लगाता है। स्नो कवर मैपिंग, जो स्नो हाइड्रोलॉजिकल मॉडलिंग में एक आवश्यक प्रक्रिया है, में स्नो पिक्सल को नॉन-स्नो पिक्सल से अलग करना शामिल है। वर्ष 2013 से 2015 के अप्रैल से अक्टूबर तक मासिक आधार पर स्नो कवर मैपिंग के लिए पूरी तरह से बारह लैंडसैट -8 और मोडिस छवियों का उपयोग किया गया है। एएसटीईआर जीडीईएम (30 मीटर) के स्थानिक संकल्प के साथ जलग्रहण को चित्रित करने के लिए उपयोग किया गया है। सीमा, धारा नेटवर्क, ढलान और पहलू मानचित्र। 0.4 से अधिक की दहलीज मान के लिए, क्षेत्र को बर्फीला माना जाता है, अन्यथा, इसे बर्फ-मुक्त क्षेत्र माना जाता है। इस प्रकार के वर्गीकरण में पर्वतीय छाया स्थितियों के तहत एससीए अनुमान का लाभ होता है। ब्यास नदी बेसिन के इस क्षेत्र में औसत एससीए 40 से 51% के बीच पाया गया है, जिसका मतलब 5382 वर्ग किमी के समग्र बेसिन क्षेत्र का लगभग 44% है। अध्ययन क्षेत्र के एससीए के निर्धारण के लिए हिम संचय और अवक्षय वक्र भी बनाए गए हैं।

लैंडसैट-8 छवि डेटा (WRS2: Path/Row = 147/38, 24 अप्रैल, 2015 को एकत्रित) का उपयोग करते हुए, यह अध्ययन क्लाउड और क्लाउड शैडो का पता लगाने और उन्हें हटाने का एक नया तरीका दिखाता है। यह विधि क्लाउड और क्लाउड शैडो की तीव्रता की गणना करने के लिए संशोधन के लिए नौ में से छह बैंड का उपयोग करती है, जिसे बाद में हटा दिया जाता है। इस प्रकार विभिन्न बैंडों की वर्णक्रमीय जानकारी का उपयोग किया जाता है। मान्यता के अनुसार, क्लाउड और क्लाउड शैडो दूषित पिक्सल को ठीक से पहचाना जाता है, जिनकी कुल सटीकता क्रमशः 97 और 96 प्रतिशत है। हालांकि, घने बादलों और बादल छाया से निपटने के दौरान इस पद्धति की उपयोगिता सीमित है। इस पद्धति में आगे के विकास के साथ परिवर्तन का पता लगाने में सुधार के लिए वायुमंडलीय सुधार के लिए उपयोग किए जाने की क्षमता है।

स्रोमेल्ट अपवाह अनुमान भारत की पश्चिमी हिमालयी नदियों के लिए महत्वपूर्ण है, जो गैर-मानसून मौसम के दौरान जलविद्युत उत्पादन और जल भंडारण के लिए महत्वपूर्ण हैं। अप्रैल, 2013 और अक्टूबर, 2015 के दौरान पंडोह बांध तक ब्यास नदी बेसिन में दैनिक आधार पर बर्फ और ग्लेशियर पिघल अपवाह का अनुमान लगाने के लिए एक डिग्री-डे विधि आधारित स्रोमेल्ट रनऑफ मॉडल (एसआरएम) प्रस्तुत किया गया है। मॉडल के इनपुट पैरामीटर व्युत्पन्न हैं मौजूदा मानचित्रों, उपग्रह डेटा, मेट्रोलॉजिकल और हाइड्रोलॉजिकल डेटा से। बेसिन की राहत को 500 मीटर ऊंचाई वाले 12 क्षेत्रों में विभाजित किया गया है। इन ऊंचाई वाले क्षेत्रों के तापमान का अनुमान लगाने के लिए बेसिन के अंदर तीन स्थानों पर देखे गए तापमान से टीएलआर प्राप्त किया गया है।

बेसिन के SCA की गणना लैंडसैट-8 उपग्रह डेटा का उपयोग करके की जाती है। प्रत्येक ऊंचाई क्षेत्र के लिए, बर्फ से ढके और बर्फ मुक्त क्षेत्रों द्वारा बनाए गए अपवाह का अनुमान व्यक्तिगत रूप से लगाया जाता है। अप्रैल 2013-अक्टूबर 2015 की सिमुलेशन अवधि के लिए, ब्यास नदी बेसिन में हिमपात के मौसम

के लिए निर्धारण का औसत गुणांक (आर ²) 0.77 है। औसत मापित अपवाह मात्रा 24009.40 (10⁶ m³) है और, औसत मापित अपवाह 802.47 (m³/s) है, जबकि औसत परिकलित अपवाह मात्रा 25784.04 (10⁶ m³) है और औसत परिकलित अपवाह 772.51 है (एम ³ / एस)। औसत मात्रा अंतर (+) 6.68% है।

बेहतर मॉडलिंग के लिए, अध्ययन क्षेत्र के लिए स्थानिक और अस्थायी जल-मौसम विज्ञान डेटाबेस को मजबूत करने पर अधिक ध्यान देने की आवश्यकता है। एसआरएम मॉडल एक डिग्री-दिन मॉडल है जो विभिन्न ऊंचाई पर तापमान अंतर के प्रति अधिक संवेदनशील होता है। चूंकि इस क्षेत्र में पानी की प्राथमिक आपूर्ति बर्फ है, इसलिए बर्फ के बराबर का सटीक अनुमान लगाना आवश्यक है। इसके लिए अध्ययन क्षेत्र के अंदर मौसम विज्ञान केन्द्रों की स्थापना आवश्यक है। एसआरएम मॉडल अध्ययन क्षेत्र में बाढ़ के पूर्वानुमान और जल संसाधन प्रबंधन के लिए पर्याप्त है, जो पिघलने के मौसम के अनुकरण के लिए आर² और डीवी के मूल्यों पर आधारित है।

TABLE OF CONTENTS

CERTIFICATE	i
ACKNOWLEDGEMENTS	ii
ABSTRACT	iv
TABLE OF CONTENTS	ix
LIST OF FIGURES	xii
LIST OF TABLES	xvi
NOMENCLATURE	xviii
CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 BACKGROUND	1
1.2 PROBLEM STATEMENT AND SCOPE OF WORK	4
1.3 OBJECTIVES OF THE PRESENT STUDY	6
1.4 ORGANIZATION OF THESIS	7
CHAPTER 2 LITERATURE REVIEW	9
2.1 ESTIMATION OF LAND SURFACE TEMPERATURE AND LAPSE RATE	9
2.2 CLOUD AND CLOUD SHADOW DETECTION AND REMOVAL	16
2.3 SNOW COVER AREA MAPPING	22
2.4 ESTIMATION OF SNOW AND GLACIER MELT RUNOFF	28
2.5 CONCLUDING REMARKS	31
CHAPTER 3 STUDY AREA AND DATA USED	33
3.1 DESCRIPTION OF THE STUDY AREA	33

3.2 DATA USED	36
CHAPTER 4 LAND SURFACE TEMPERATURE AND LAPSE RATE ESTIMATION	44
4.1 INTRODUCTION	44
4.2 METHODOLOGY	45
4.3 RESULTS AND DISCUSSION	60
4.4 CONCLUSIONS	77
CHAPTER 5 DETECTION AND REMOVAL OF CLOUD AND CLOUD SHADOWS	80
5.1 INTRODUCTION	80
5.2 METHODOLOGY	80
5.3 RESULTS AND DISCUSSION	84
5.4 CONCLUSIONS	88
CHAPTER 6 SNOW COVER AREA (SCA) MAPPING FOR BEAS RIVER BASIN	89
6.1 INTRODUCTION	89
6.2 METHODOLOGY	89
6.3 RESULTS AND DISCUSSION	92
6.4 CONCLUSIONS	100
CHAPTER 7 SNOW AND GLACIER MELT RUNOFF MODELING FOR BEAS RIVER BASIN	103
7.1 INTRODUCTION	103
7.2 METHODOLOGY	104
7.3 RESULTS AND DISCUSSION	113
7.4 MODEL SIMULATED RUNOFF AND MODEL ACCURACY	119

7.5 CONCLUSIONS	124
CHAPTER 8 SUMMARY AND CONCLUSION	126
References	135
Publications from the Present Research Work	155
Brief Bio-Data	156

LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Framework of the present study	5
Figure 3.1 USGS GDEM of Beas River basin up to Pandoh dam with the location of three meteorological observatories	34
Figure 3.2 Relative spectral response curves for OLI sensors (after Barsi et al., 2014).....	39
Figure 4.1 Flow chart of the Mono-Window algorithm.....	47
Figure 4.2 Flowchart of the Split-Window algorithm.....	53
Figure 4.3 Flowchrt of the thermal calibration process	55
Figure 4.4 Flowchart for the computation of fractional vegetation cover	57
Figure 4.5 NDVI map (a), LSE map (b), LST map of 24 April 2015 from MW algorithm (c), and comparison between air temperature data, LST values at three different stations (d).....	61
Figure 4.6 NDVI image (a), Difference of the LSE image of bands 10 and 11 (b), Mean of the LSE image of bands 10 and 11 (c), Brightness temperature of band 10 image (d), Brightness temperature of band 11 image , LST SW algorithm image (f), LST MW algorithm image (g), and Difference map of the LST between SW and MW algorithms on 24 th April 2015 (h).....	65
Figure 4.7 Area statistics of classified brightness temperature images of band 10 (a), band 11 (b)	66

Figure 4.8 Comparison between retrieved LST from Landsat 8 TIRS data using MW and SW algorithms (a), and Comparison between in-situ air temperature and LST obtained using SW algorithm from Landsat-8 on 24 April 2015 at three different stations (b) 69

Figure 4.9 Scatter plots showing the temperature-elevation relationship (ASTER GDEM vs. LST map derived from Landsat-8 images) at six different dates..... 73

Figure 4.10 Scatter plots showing the temperature-elevation relationship (ASTER GDEM vs. LST map derived from MODIS images) at six different dates 74

Figure 4.11 Difference between air temperature data, LST values from Landsat-8 and LST values from MODIS for six different dates at three different stations..... 75

Figure 5.1 Landsat-8 color composite image of the Landsat OLI image data on April 24, 2015 (a) Spectral characteristics of five land cover types (cloud in regular Triangle, cloud shadow in circle, water in pentagon, vegetation in Square, soil in inverted Triangle, and snow) using pixel value (left) and TOA reflectance (right)..... 86

Figure 5.2 False color composite image (a), cirrus band image (b) and image generated using equation 5.5 (c) 87

Figure 5.3 Result of cloud removal for OLI composite image (OLI7, OLI5, OLI3,R,G,B):before cloud removal (left), after cloud removal (right) 88

Figure 6.1 Schematic representation of the methodology adopted to compare Landsat-8 and MODIS images for snow cover mapping 91

Figure 6.2 SCA estimated for Beas river basin using Landsat-8 images from April 2013 to October 2015.....	94
Figure 6.3 SCA estimated for Beas river basin using MODIS images from April 2013 to October 2015.....	95
Figure 6.4 Graphical representation of snow cover area estimated for Beas basin using MODIS and Landsat-8 images	96
Figure 6.5 Comparison of SCA% derived from Landsat-8 using NDSI model and MODIS fractional snow cover product for the year 2013 (a), 2014 (b) and 2015 (c).....	99
Figure 7.1 Flowchart of the snow melt runoff model (SRM)	107
Figure 7.2 Global Digital Elevation Model (GDEM) of the Beas river basin indicating the twelve altitudinal zones extracted for this study	114
Figure 7.3 Hypsometric curve of the Beas river basin showing the area distribution in twelve different elevation zones	114
Figure 7.4 Snow cover distribution in twelve different altitudinal zones of the Beas river basin over a period of 2013-2015.....	115
Figure 7.5 Measured Runoff v/s Computed Runoff for the period from October 2013 to September 2014.....	120

Figure 7.6 Measured Runoff v/s Computed Runoff for the period from October 2014 to September 2015..... 121

Figure 7.7 Measured v/s Computed daily discharge for calibration of the model run for the period 2013–2014..... 124

Figure 7.8 Measured v/s Computed daily discharge for validation of the model run for the period 2014–2015..... 124

LIST OF TABLES

Table 3.1 Landsat-8 satellite image metadata	37
Table 3.2 Details of various datasets used in the present study	37
Table 3.3 OLI and ETM+ reflective spectral band characteristics (after Barsi et al., 2014)	39
Table 3.4 Summary of the MOD10A1 product.....	41
Table 3.5 Characteristics of the twelve elevation zones extracted from the DEM of the Beas River basin	42
Table 3.6 Hydro-meteorological data and elevation of different stations used in the study: rainfall (P), temperature (T), discharge (Q).....	43
Table 4.1 Split-window coefficient values.....	54
Table 4.2 Emissivity values	57
Table 4.3 Statistics of Landsat-8 LST of Beas River basin	62
Table 4.4 The station-wise the differences of LST and air temperature	62
Table 4.5 Statistics of the land surface temperature images obtained from SW algorithm	68
Table 6.1 Comparison of SCA estimated from Landsat-8 and MODIS	100
Table 7.1 Snow cover area (percentage) in elevation zones	115

Table 7.2 Range of parameter values used in the calibration of SRM model..... 123

Table 7.3 Results of model simulation for the period 2013–2015 for Beas river basin upto Pandoh dam..... 123

NOMENCLATURE

RS	Remote sensing
GIS	Geographic information system
MRS	Microwave remote sensing
IR	Infrared
NIR	Near-infrared
SAR	Synthetic aperture radar
LST	Land surface temperature
TIRS	Thermal infrared sensor
MW	Mono window
SW	Split window
TLR	Temperature lapse rate
MODIS	Moderate resolution imaging spectroradiometer
SCA	Snow cover area
SRM	Snowmelt runoff model
DEM	Digital elevation model
NDSI	Normalized difference snow index
WinSRM	Windows snowmelt runoff model
LU/LC	Land use land cover
OLI	Operational land imager

QWIPs	Quantum well infrared photo detectors
NDVI	Normalized difference vegetation index
TM	Thematic mapper
ETM	Enhanced thematic mapper
QGIS	Geographical information system package quantum
AVHRR	Advanced very high resolution radiometer
FVC	Fractional vegetative cover
NOAA	National oceanic and atmospheric administration
ACCA	Automated cloud cover assessment
MSS	Multispectral scanner system
LEDAPS	Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system
NCEP	National centers for environmental prediction
BT	Brightness temperature
CDR	Climate data record
QA	Quality assessment
EROS	Earth resources observation and science
UDTCDA	Universal dynamic threshold cloud detection algorithm
MTCD	Multi temporal cloud detection
SVM	Support vector machine
IHOT	Iterative haze optimized transformation

SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
AVCS	Advanced vidicon camera system
SMMR	Scanning multichannel microwave radiometer
MOSDAC	Meteorological and oceanographic satellite data archival centre
SAC	Space application centre
LSE	Land surface emissivity
DN	Digital number
TOA	Top of atmospheric
W	Wavelength of emitted radiance ($11.5 \mu\text{m}$)
h	Planck's constant ($6.626 * 10^{-34} \text{ Js}$)
s	Boltzmann constant ($1.38 * 10^{-23} \text{ J/K}$)
c	Velocity of light ($2.998 * 10^8 \text{ m/s}$)
$L\lambda$	TOA spectral radiance ($\text{watts}/(\text{m}^2 * \text{ster} * \mu\text{m})$)
M_L	Band specific multiplicative rescaling factor from the metadata
A_L	Band specific additive rescaling factor from the metadata
Q_{cal}	Quantized and calibrated standard product pixel values
T	At satellite brightness temperature in Kelvin (K)
e	Emissivity
P_V	Proportion of vegetation which is calculated using NDVI value

