

기후변화를 고려한 한반도 미래 풍력자원 지도 생산 Production of Future Wind Resource Map under Climate Change over Korea

김진영* · 김도용**
Kim, Jin Young · Kim, Do Yong

要 旨

본 연구에서는 앙상블 중규모기후모델 weather research and forecasting(WRF)를 이용하여 2045년부터 2054년까지 21세기 중반의 기후변화에 대한 우리나라 미래 풍력자원 지도를 제작하였고 월별, 시간대별 자원변화를 검토하였다. 분석결과, 한반도상에서 강한 몬순 순환으로 인해 뚜렷한 월별 시공간 변동성이 해륙풍에 의한 시간대별 변동성보다 컸다. 풍력자원이 큰 강풍지역은 월마다 지역마다 다르게 나타났다. 즉 겨울철 북서계절풍(여름철 남서계절풍)이 주풍일 때 각각 강원산간과 해상 그리고 남서해안에서 자원이 많을 것으로 전망되었다. 최대풍과 최소풍은 1월, 9월에 각각 나타날 것으로 전망되었고, 시간대별로 내륙과 산간은 일중편차가 컸지만 연안지역은 편차가 작을 것으로 전망되었다. 이는 현재기후에 대한 기존분석결과와는 다소 차이가 있는 것으로, 이 연구에서 생산된 미래 풍력자원 지도는 향후 기후 변화 가능성이 큰 지역의 시공간적 풍향을 감안하여 풍력단지 입지 선정 및 풍력운영을 위한 장기계획 마련에 있어서 유용한 자료가 되리라 기대된다.

핵심용어 : 미래 풍력자원 지도, 중규모 수치모의, 앙상블, 기후변화

Abstract

In this study future wind resource maps have been produced under climate change scenario using ensemble regional climate model weather research and forecasting(WRF) for the period from 2045 to 2054(mid 21st century). Then various spatiotemporal analysis has been conducted in terms of monthly and diurnal. As a result, monthly variation(monsoon circulation) was larger than diurnal variation(land-sea circulation) throughout the South Korea. Strong wind area with high wind power energy was varied on months and regions. During whole years, strong wind with high wind resource was pronounced at cold(warm) months in particular Gangwon mountainous and coastal areas(southwestern coastal area) driven by strong northwesterly(southwesterly). Projected strong and weak wind were presented in January and September, respectively. Diurnal variation were large over inland and mountainous area while coastal area were small. This new monthly and diurnal variation would be useful to high resource area analysis and long-term operation of wind power according to wind variability in future.

Keywords : Future Wind Resource Map, Mesoscale Numerical Simulation, Ensemble, Climate Change

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화에 의한 식량자원, 수자원 그리고 에너지 자원의 고갈 등으로 인류 생존을 위협하는 문제가 대두되고 있고, 미래에 대한 불확실성으로 인한 불안감도 커지고 있다. 대기 중의 이산화탄소 농도에 따른 대기온도의 상승은 기후변화에 관한 정부간 패널

(IPCC)에서 예측하던 것보다도 더 빠르게 이루어지고 있다(Glenn et al., 2016). 이에 기후변화협약(UNFCCC) 및 교토의정서(Kyoto Protocol)에 의한 온실가스 배출 저감을 위하여 화석연료의 사용을 줄이고 친환경 신 재생에너지를 개발하고 보급하고자 각국에서 노력하고 있다. 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 2020년 이후부터는 선진국과 개도국 모두가 참여하여 각국의

Received: 2016.08.16, revised: 2016.10.04, accepted: 2017.01.09

* 정희원 · 한국에너지기술연구원 신재생에너지지원센터 박사후연구원(Member, Postdoctoral Researcher, New and Renewable Energy Data Center, Korea Institute of Energy Research, ruwiejin@gmail.com)

** 교신저자 · 정희원 · 목포대학교 환경공학과(기후변화연구소) 교수(Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, dykim1975@mokpo.ac.kr)

감축목표를 스스로 결정할 수 있도록 新기후체제를 도출하였다(UNFCCC, 2015).

우리나라는 태양, 풍력, 바이오 등 신재생에너지 분야의 기술을 중점육성기술로 분류하고 있다. 특히 풍력 에너지는 기술성숙도가 가장 높고 경제성이 뛰어난 에너지원으로 매우 큰 잠재력을 가진 산업으로 주목받고 있다(REN21, 2016). 이미 유럽과 미국의 경우 풍력에너지 개발과 보급이 실용화되고 활성화되고 있으며, 아시아에서도 인도와 중국을 중심으로 풍력시장이 급팽창하고 있는 것으로 보인다. 우리나라의 경우도 1975년 소형 풍력발전기 개발을 효시로 꾸준한 풍력에너지 개발과 보급을 진행시켜 왔으나, 아직까지 선진국에 비해 미비한 실정이다.

풍력발전은 자연적인 바람의 운동에너지를 변화시켜 전기를 얻는 방식이므로, 발전 효율을 확보하기 위해서는 사전에 풍력단지의 최적 위치선정 및 타당성 조사가 선행되어야 한다. 풍력발전단지 입지는 지형학적 조건과 기상학적 조건 분석이 포함되는데, 기후학적 조건 분석에서 일반적으로 관측소에서 측정된 자료로 장기간 평균적인 풍황을 분석한다. 풍력발전의 수명이 20~30년임을 감안하면 풍력발전단지 입지는 실제 설치 후 미래 풍황도 고려하는 것이 바람직하다. 특히 입지 분석시 지리공간상에 정보를 투영한 지도는 현장측정 소용경비의 절감과 동시에 단지개발사업의 불확도에 의한 위험성을 줄이는데 매우 중요한 역할을 한다.

한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터에서는 풍력자원을 지리정보 및 정보통신기술을 융합한 인프라를 기반으로 현재 위성 원격탐사 및 기상수치모델 자료를 해석하여 100 m ~ 1 km의 고해상도 국가풍력자원지도를 생산하여 공공서비스하고 있다. 한편 국립기상과학원에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도에 따른 다양한 시나리오를 반영한 12 km 해상도의 장기 바람자원지도를 공공서비스하고 있다. 이는 기후변화 대응과 관련하여 중장기 대체에너지 정책수립 및 체계적인 에너지 관리의 일환으로 진행되고 있다. 국립기상과학원에서 제공하는 바람자원지도는 21세기 초반의 월별 그리고 연별 평균풍속에 대한 자료이다.

이 연구에서는 Kim et al.(2014)에서 연구한 기후변화 시나리오(IPCC, 2007)에 기반 한 앙상블 기후모델 자료를 활용하여 국립기상과학원의 미래바람자원지도와는 차별적으로 21세기 중반의 미래 상세시간 규모의 풍력자원 지도를 생산하였다. 과거대비 미래 풍력자원 변화 그리고 과거 및 미래기후에서의 풍황 특징은 많이 연구되었다(Kim et al., 2013a; Kim et al., 2013b;

Kim et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 다양한 시간 규모에서의 풍황 차이를 분석하고자 월별 그리고 시간대별 풍속 변화를 중심으로 지역별 특징을 분석하였다. 이 논문은 총 4장으로 구성되며, 연구의 배경 및 필요성에 대해서는 상기에서 이미 서술하였으며, 제 2장에서는 이 연구에 사용된 모델 및 분석방법에 대해서 서술한다. 제 3장에서는 이 연구에서 수행된 한반도 미래 바람의 수치모의 결과를 분석한다. 마지막으로 제 4장에서는 요약 및 결론, 그리고 향후 연구방향에 대하여 서술한다.

2. 연구방법

미래 풍력자원 지도는 중규모 수치모델 weather research and forecasting(WRF)의 advanced research WRF(ARW) version 3.3을 이용하여 생산한 자료를 활용하였다(Skamarock et al., 2008; Wang et al., 2011). 이용된 모델은 비압축성, 비정역학 모델로 동아시아 기후모의에 널리 활용되고 있으며, WRF 모델내 역학적-물리적 설정과 실험설계는 동일영역에서 선행 연구한 Kim et al.(2014)의 연구를 참고하여 구성한 중규모 앙상블 기후모델이다.

모델내 불확실성을 감안하여 행성경계층내 순환과정에 대하여 yonsei university(YSU) scheme(Hong et al., 2006)(Hong et al., 2006)과 mellor-yamada nakanishi and niino level 2.5(MYNN2)(Nakanishi and Niino, 2006) scheme을 앙상블 평균한 행성경계층방안 및 열확산 지면모델을 조합하여 사용하였다 (Kim et al., 2014). 적운모수화 방안과 명시적 수분과정에 대하여 kain-fritsch eta convection(KF) scheme(Kain and Fritsch, 1993)와 WRF single-moment three-class micro physics(WSM3)scheme (Hong et al., 2004), 그리고 rapid radiative transfer model(RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997)을 사용하였다.

이들은 동아시아 중규모 기상현상을 잘 설명하도록 선택된 조합임을 선행연구에서 확인되었다(Koo and Hong, 2010). 그리고 측면경계에서 배경장의 대규모 강제효과와 수치모델의 해석에서 기인하는 큰 오차를 줄이기 위해서 spectral nudging 기법(von Storch et al., 2000)을 적용하였다.

모델의 초기 및 경계조건은 유엔 정부간 기후변화 위원회의 A1B 온실가스 배출 시나리오(IPCC, 2007)에 따른 전지구 대가-해양 결합모델인 ECHAM5 (Roeckner et al., 2003)의 미래전망 자료(수평해상도 T63, 연직 19층 해상도)를 사용하였다. 이 측면경계 자

료는 6시간 간격으로 업데이트하였고, 지면경계 자료는 united states geological survey(USGS) 30초 지형자료 (90m 해상도)를 사용하였다. 분석 자료는 1단계로 동아시아 영역(3,930 x 4,230 km²; 수평공간해상도 30 km)을 수치모의한 후 2단계로 한반도 영역(910 x 850 km²; 수평공간해상도 10 km)을 상세화하여 기후모의를 수행하여 검증된 자료를 활용하였다(Table 1).

중규모 WRF 모델을 이용한 상세한 미래 기후모의는 기후변화 시나리오 자료가 확보된 21세기 중반인 2045년부터 2054년까지 10년간 장기간 자료를 후처리하여 새롭게 모듈화하여 풍력자원 지도를 자동으로 작성하였다 (Fig. 1). 이때 풍력터빈높이의 풍속 내삽은 Kim and Kim(2016) 방법을 적용하였다. 여기서 발전기 시동풍속은 Mari et al.(2011)을 참고하여 4 m/s를 적용하였다.

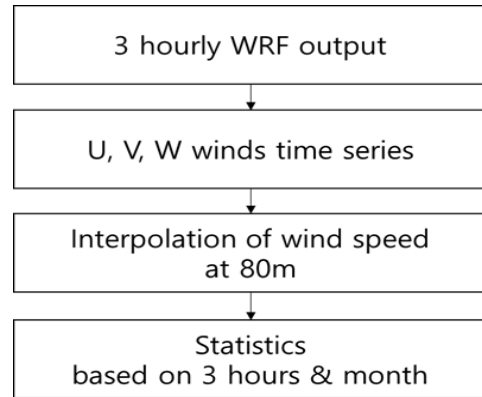


Figure 1. Schematic diagram of the data processing using simulated WRF output for wind power resource assessment

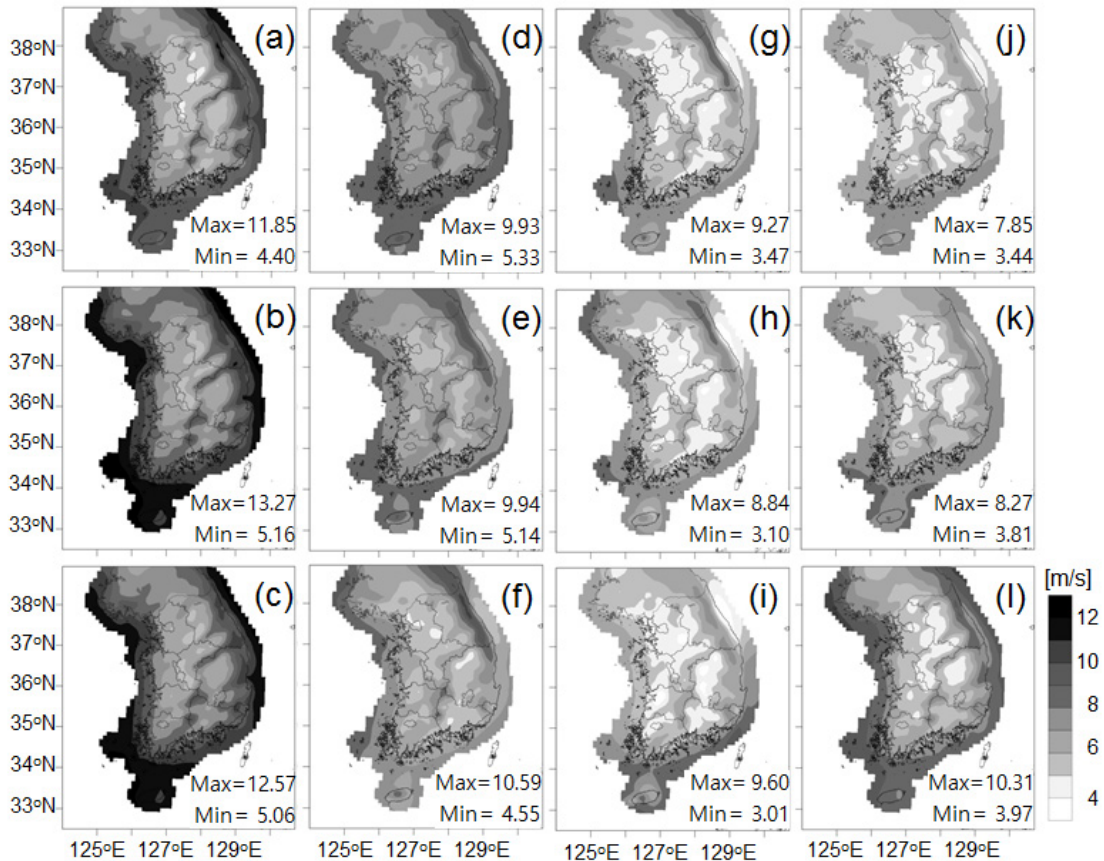


Figure 2. Schematic diagram of the data processing using simulated WRF output for wind power resource assessment: (a) ~ (l) represent December, January, February, March, April, May, June, July, August, September, October, November, respectively.

Table 1. The configuration of the WRF model

Model	WRF version 3.3.1	
Horizontal grid	30 km	10 km
Vertical layers	29 layers	
Physics	YSU, MYNN2	
	Noah LSM	
	WSM3	
	RRTM longwave Dudhia shortwave	
Boundary data	Identify/Measure	
Geographical data	USGS	
Time period	2044.12.01.- 2054.11.30	

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 2045년부터 2054년까지의 월별 평균 풍력 자원 지도를 나타낸다. 월별 변화를 분석한 결과, 9 m/s 이상의 강풍대는 강원 산간지역 및 근해상에서 존재했다. 월별 평균풍속 5.76 ~ 9.29 m/s 이었고, 1월과 9월의 최대풍이 각각 13.27, 7.85 m/s였다. 12월부터 6월까지의 북서계절풍의 영향으로 태백산맥의 하강풍 강화 또는 북동풍 유입에 따라 강원 해상북쪽에서 최대풍이 불었지만 8월부터 10월까지의 남서류 유입으로 남서해상에서 최대풍이 불었다. 특히 11월에는 경기도 해상에서 최대풍이 불었고, 6월부터 9월까지의 경기도와 경상북도 내륙 일부에서 풍력발전 시동풍속 이하의 평균 바람인 지역이 존재하였다. 한편 연안 및 산간지역에서는 풍속이 5 m/s 이상이였다. 12월부터 5월까지, 그리고 11월에는 전국이 5 m/s 이상의 바람이 부는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 동일 연구기간에 동안에 3시간 간격으로 시간대별 풍력자원 지도를 나타낸다. 월평균 풍속과 유사하게 강풍대는 대부분 제주를 포함한 연안과 강원영동과 전남과 경남경계의 고산지역이었다. 반면에 전국이 전시간대에 평균적으로 시동풍속 이상의 바람이 불었다. Figs. 2 and 3을 고려해 볼 때 우리나라는 계절풍 순환에 따른 풍속의 월별 변동이 일변동보다 크다는 것을 의미한다. 시간대별 풍속에서 내륙은 5 ~ 7 m/s가 불었고 연안지역은 7 ~ 8 m/s가 불었으며 고산지역에서는 하루 내내 9 m/s 이상의 풍속이 불었다. 하지만 지역별로 최대풍이 나타나는 시간대가 다르게 나타났다. 00시부터 06시에는 남서해상에서 10 m/s 이상의 최대풍이 불었고, 그 외 시간에는 북서해상에서 10 m/s 이상의 최대풍이 불었다. 고산지역은 지표냉각이 제일 큰 시각인 자정시간(21 ~ 00시)에 9 m/s 이상의 바람이 불었고 내륙은 대기권 혼합이 최대인 낮 시간(3시) 6

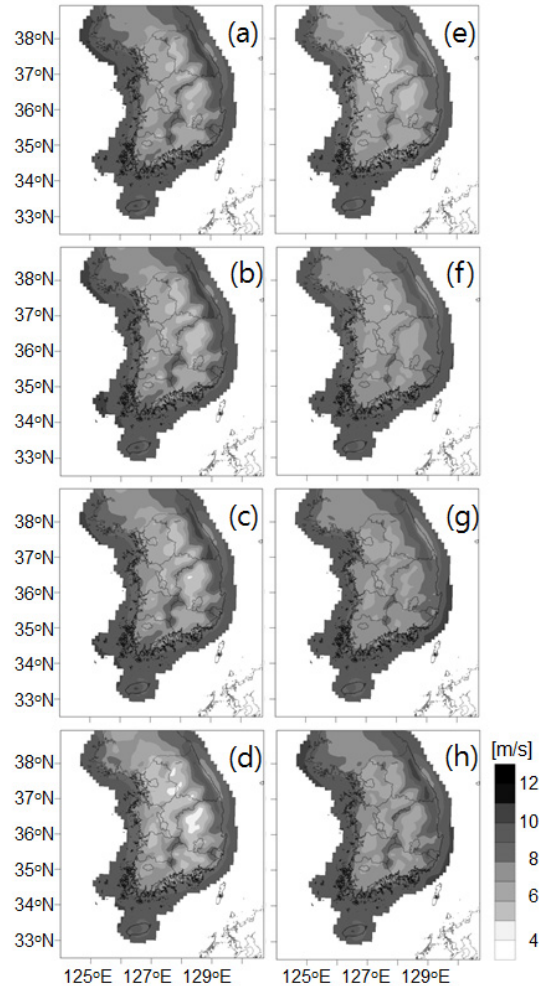


Figure 3. Diurnal wind resource potential every 3 hours: (a) ~ (h) indicate 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 Local Standard Time (LST), respectively.

m/s 이상의 풍속이 확인되었다. 반면 연안지역은 하루 변동이 내륙이나 고산지역에 비해 크지 않았다.

4. 결론

이 연구에서는 중규모 기후모델인 WRF를 이용하여 2045년부터 2054년까지 10년 동안 기후변화에 따른 우리나라의 미래 풍력자원 지도를 생산하고, 풍력자원의 특징을 다양한 시간규모에 대해서 확인하였다.

대부분 연안과 고산지역에서 풍력발전의 자원이 많은 것으로 나타났다. 특징적인 것은 지역별로 풍력자원이 많은 월과 시간대가 다르게 나타났으며 계절풍 순환

에 의한 월별 변동이 시간대 변동보다 컸다. 1월이 가장 자원량이 많았고 9월에 상대적으로 자원량이 적었다. 12월부터 5월, 그리고 11월에는 전국적으로 자원량이 많았고 모든 시간대에 자원량이 많을 것으로 나타났다. 특히 고산지역은 지표냉각에 의한 산곡풍이 불어 자정에 자원량이 최대였고 해안지역은 하루 내내 7 ~ 8 m/s 이상의 풍속이 유지되어 자원량의 변동이 작지만 일정하게 자원량이 유지되는 것으로 나타났다. 따라서 풍력자원이 지속적으로 높아 풍력발전에 유리한 지역은 연안이나 고산지역이었다. 해당지역은 태백산맥이 위치한 강원영동, 전남과 경남의 경계, 제주지역이 해당된다.

뿐만 아니라 본 연구에서 제시된 미래 풍력자원 지도는 풍력발전기 내구연수가 수십 년인 측면에서 현재 제공되고 있는 대부분의 과거 측정자료 기반, 미래 상세한 시간규모에 대한 공간정보로서 보다 안정적인 전력보급계획 수립 및 발전기 설계에 유용한 정보가 될 수 있으리라 기대된다.

References

1. Glenn, J. C., Florescu, E. and The Millenium Project Team, 2016, 2015-16 state of the future(Executive summary), Research report, Global Futures Intelligence System, USA, pp. 1-10.
2. Hong, S. Y., Dudhia, J. and Chen, S. H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation, *Monthly Weather Review*, Vol. 132, pp. 103-120.
3. Hong, S. Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, Vol. 134, pp. 2318-2341.
4. IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The physical science basis*, Research report, Intergovernmental Panel On Climate Change, UK and USA, pp. 7-45.
5. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D05105, doi:10.1029/2009JD012574.
6. Kain, J. S. and Fritsch, J. M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, *Meteorological Monographs*, Vol. 24, pp. 165-170.
7. KIER, 2016, New&Renewable Data Center, <http://kredc.kier.re.kr>.
8. Kim, D. Y. and Han, K. S., 2012, Temporal and spatial wind information production and correction algorithm development by land cover type over the Republic of Korea, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 20, No. 3, pp. 19-27.
9. Kim, D. Y., Kim, J. Y. and Kim, J. J., 2013, Mesoscale simulations of multi-decadal variability in the wind resource over Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 49, No. 2, pp. 183-192.
10. Kim, J. Y. and Kim, D. Y., 2013, Spatio-temporal characteristics of wind observations over South Korea: 1982-2011, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 49, No. 4, pp. 551-560.
11. Kim, J. Y. and Kim, D. Y., 2016, Study on long-term changes in wind power classes over South Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 442-450.
12. Kim, J. Y., Kim, D. Y. and Oh, J. H., 2014, Projected changes in wind speed over the Republic of Korea under A1B climate change scenario, *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 5, pp. 1346-1356.
13. National Institute of Meteorological Sciences, 2016, *Weather Resource Maps*, NIMS, <http://greenmap.go.kr/>
14. Mari, R., Bottai, L., Busillo, C., Calastrini, F., Gozzini, B. and Gualtieri, G., 2011, A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany(Italy), *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 754-763.
15. Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, pp. 16663-16682.
16. Nakanishi, M. and Niino, H., 2006, An improved Mellor Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 119, pp. 397-407.
17. REN21, 2016, *Renewables 2016-Global status report*, Research report, Renewable Energy Policy Network for the 21st century, France, pp. 75-85.
18. Roeckner, E., Baeuml, G., Bonventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hangemann, S., Kirchner, I., Komblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U. and Tompkins, A.,

- 2003, The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part I: Model description-Report 349, Research report, Max Plank Institute for Meteorology, Germany, pp. 1-127.
19. Skamarock, W. C., Kelpm, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W. and Powers, J. G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, Technical report, NCAR, USA, pp. 1-113.
 20. UNFCCC, 2015, Climate action now-Summary for policy makers, Technical report, United Nations Framework Convention on Climate Change, Germany, pp. 4-66.
 21. von Storch, H., Lagenberg, H. and Feser, F., 2000, A spectral nudging technique for dynamical downscaling purpose, Monthly Weather Review, Vol. 128, pp. 3664-3673.
 22. Wang, W, Bruyere, C., Duda, M. G., Dudhia, J., Gill, D. O., Lin, H. C., Michalakes, J., Rizvi, S. and Zhang, X., 2011, ARW version 3 modeling system user's guide, Technical report, NCAR, USA, pp. 1-371.