



Ankara’da Hava Kirliliği Mekânsal Dağılımının Modellenmesi

Hüseyin Toros^{1*}, Serdar Bağış², Zeliha Gemici³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469, İstanbul, Türkiye

³ Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ÇED, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Kuzey İç Anadolu Temiz Hava Merkezi, Gölbaşı, 06830, Ankara

E-Posta: toros@itu.edu.tr, serdarbagis@gmail.com, zeliha.gemici@csb.gov.tr

Özet: Hava kalitesi canlı ve cansız varlıkları olumsuz olarak etkilediği için ölçme ve değerlendirme çalışmaları, tüm gelişmiş ülkelerde üzerinde çok çalışılan konulardan birisidir. Zaman ve mekân ölçeğinde hava kirliliği değerleri birçok etkene bağlı olarak değişir. Bir bölgedeki kirlitici yoğunluğunun değişimi atmosfere salınan kirlitici miktarları yanında meteorolojik şartlara ve topoğrafik yapıya da bağlıdır. Hava kirliliği değerlerini ölçme sisteminin pahalı ve zahmetli olması sebebiyle ölçüm yapılmayan bir noktadaki kirlilik yoğunluğunun zaman ve mekân ölçeğinde hesaplanması çalışmaları önemlidir. Gerçeğe yakın değerlerin hesaplanması için farklı yöntemler geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Kirliliğin modellenmesinde geoistatistik, doğrusal veya doğrusal olmayan modeller ileri veya geri yönde kurgulanarak farklı yaklaşımlar uygulanmaktadır. Kirlitici yoğunluğunun mekânsal dağılımı için emisyon envanteri, meteorolojik ve topoğrafik şartlar değişik yöntemler ile katmanlar halinde birlikte kullanılması önemlidir. Bu çalışmada geliştirilen yöntemler zaman ve mekân ölçeğinde farklı katsayılar elde edilmesi ve farklı katmanlar halinde uygulanması temellidir. Bu yöntemde Ankara’da 8 noktada ölçümü yapılan veriler ve coğrafi şartları baz alınarak geri yönde modelleme ile istenilen noktalar için kirlilik yoğunluk haritası oluşturulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hava kalitesi, jeo-istatistik, modelleme, dağılım

Modelling of Spatial Distribution of Air Pollution in Ankara

Abstract: As air quality adversely affects living and non-living assets, measurement and evaluation studies about air is one of the most searched topics in all developed countries. The values of air pollution at time and place scale vary depending on many effects. The change in pollutant density in a zone depends on the meteorological conditions and the topographical structure as well as the amounts of pollutants released into the atmosphere. Calculation of the concentration of pollution at an unmeasured point at time and place scale is important because of the expensive and onerous measurement systems. Different methods are being developed and applied to calculate close to the truth values. Various approaches to modelling pollution are applied as geostatistics, linear or nonlinear models are being constructed in forward or backward direction. The use of emission inventory with meteorological and topographic conditions with different methods and layers is important for the spatial distribution of pollutant intensity. The methods developed in this study are based on obtaining different coefficients at time and place scale and applying them as different layers. In this method, pollution density map is created for the desired points by backward modelling based on data and geographical conditions measured in 8 points in Ankara.

Key Words: Air quality, geo-statistics, model, distribution

GİRİŞ

Dünya Sağlık Teşkilatı araştırmalarına göre hava kirliliği daha çok, insan tarafından yapılmış ve fosil veya biyokütle yakıtlarının kötü yakılmasından kaynaklanmaktadır. Hava kalitesi insanların günlük hayatında önemli bir unsurdur^[1]. Bilhassa şehirlerde insanların yaşadıkları yerlerin hava kalitesi tahmini değerlerini bilmeleri, alabilecekleri tedbirler açısından dikkate değerdir. Aynı zamanda karar vericiler de yüksek çözünürlüklü kirlilik dağılımları sayesinde doğru yaptırımlar ile hava kalitesini artırabilirler. Kirliliğin mekânsal dağılımı için ölçüm yapılan noktalardaki verilerden yerleşim yerleri arasındaki bağıntıları araştıran sistemler arasındaki geribildirim ve bağlantıyı temsil edebilen bütünleştirilmiş tahmin sistemlerine ihtiyacımız bulunmaktadır. Bu, çevrenin farklı bileşenleri arasındaki iki yönlü etkileşimleri temsil ederek online entegre atmosferik kimyasal taşınım ve atmosferik sayısal modelleri

* İlgili E-posta: toros@itu.edu.tr

ile hem gazlar hem de aerosoller, bulutlar, radyasyon, sınır tabakası, emisyonlar gibi farklı atmosferik süreçler arasındaki etkileşim ile atmosfer, arazi yüzeyi, kıyı alanları ve okyanuslar arasındaki geri beslemeleri içeren çalışmalar önem kazanmaktadır^[2].

Bu çalışmanın özgün değeri ve yaygın etkisi yer, atmosfer bilimleri, çevre yönetimi, ulaştırma gibi mekâna bağlı olarak değişen çok disiplinli karar-verme sistemlerini içermesi ve yeni bir yöntemin geliştirilmesidir. Mekânsal dağılım yöntemlerinin en sık olarak kullanılan, ters mesafe ağırlıklı ara değer hesaplama (Inverse Distance Weighting, IDW) ve Kriging yöntemleri referans olarak alınmıştır. Kirlenici dağılımında istatistik yöntemler sıklıkla kullanılmaya başlanmış, günümüzde mekânsal verilerin bütünleştirilmesi, modellenmesi, analizi ve sunulmasında standart hale gelmiştir. Farklı disiplinlerin uzmanlığına ihtiyaç duyan tahmine dayalı sistemlerin ortak noktası, maliyetlerin fazlalığı sebebiyle sınırlı sayıda ölçümle, tüm çalışma bölgesine dağıtılmış bir model oluşturup karar verici konumundaki mercilere destek olmaktır. Bu disiplinler arası çalışmalarda genellikle kullanılan tüm veriler ve modeller belirli bir doğruluk derecesine sahip olarak kabul edilirken, mekânsal verilerin dünya gerçeğini tam ve doğru olarak temsil ettiği düşünülmektedir. Fakat mekânsal veriler konumsal, topolojik ve konumsal olmayan özniteliklerinde belirsizlik içermektedir. IDW ve KRIGING yöntemlerinin ortak kullanımı bu belirsizliklerin derecesini ortaya koyup, karar vericilere güvenilir sonuçlar sunabilmektedir. Mekânsal dağılım uygulamalarına örnek olarak, 1999 yılında meydana gelen İzmit depreminin Adapazarı şehir merkezinde meydana getirdiği ağır hasarlı alanları tespit edebilmek amacıyla semivariyogram yaklaşımının kullanıldığı çalışma gösterilebilir. Öte yandan, İstanbul Avrupa yakasında yersel hava kalitesi ölçme istasyonlarından Ocak 2003-Aralık 2006 tarihleri arasında elde edilen ölçme değerleri kullanılarak, Avrupa yakasına ait hava kalitesi bilgilerinin üretilmesi, mekânsal dağılıma başka bir pencereden bakarak ortaya konan bir diğer çalışmadır. Bu çalışmada R yazılımı ile verilerin zaman serileri oluşturularak, CO, SO₂ ve partikül madde parametrelerinin zamana bağlı davranışları ve periyodiklikleri analiz edilmiştir. Avrupa yakası üzerinde bu değerlerin ne olabileceği Kriging yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve yöntemlerin avantajları ortaya konulmuştur.

Jerrett ve arkadaşları^[3], yaptıkları değerlendirme çalışmasında sağlık araştırmalarının, kentlerdeki hava kirliliği risklerini değerlendirmek için modellerin geliştirilmesi, gelecek araştırmalar için öncelikli alan olarak tanımlamışlardır. Araştırmalarına (i) yakınlık temelli değerlendirmeler, (ii) istatistiksel enterpolasyon, (iii) arazi kullanım regresyon modelleri, (iv) hat dağılım modelleri, (v) entegre emisyon-meteorolojik modeller ve (vi) kişisel veya ev içi maruz kalma denetimini önceki yöntemlerden biriyle birleştiren hibrit modeller kullanmışlardır. Beelen ve arkadaşları^[4], NO₂ konsantrasyonlarının hesaplanmasında URBIS ve LUR arasında orta dereceli anlaşma bulunmuşlardır (R = 0.55). Tahminler, konsantrasyon dağılımının merkezi kısmı için iyi fikir birliği sağlamıştır, ancak en yüksek ve en düşük konsantrasyonlar için büyük ölçüde farklılık göstermiştir. URBIS dağılım modeli, 18 doğrulama sitesinde ölçülen ve hesaplanmış konsantrasyonların karşılaştırılmasında LUR modelinden (sırasıyla R = 0.77 ve R = 0.47) daha iyi sonuç verdi. Farklar, farklı bölgesel arka plan konsantrasyonlarının kullanılması, LUR modelinde öngörücü değişken olarak oldukça kaba arazi kullanımı kategorisi endüstrisinin dâhil edilmesi ve NO'nun NO₂'ye dönüşümünün farklı işlenmesi nedeniyle anlaşılabilir. Beelen ve arkadaşları^[5], hava kirliliği konsantrasyonlarında şehir içi değişkenliğini tahmin etmenin önemini vurgulamışlardır. Arazi kullanım regresyonu (LUR) modelleri, küçük ölçekli şehir içi varyasyonlarını açıklayabilir. LUR model geliştirme yöntemlerinde şeffaflık, farklı çalışmalar arasında yöntemlerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için önemlidir. Bu nedenle, ESCAPE (Avrupa Hava Kirliliği Etkiler Koşulları Araştırması) projesi için Avrupa'da 36 çalışma alanında standartlaştırılmış bir şekilde LUR modelleri geliştirildi. Shad ve arkadaşları^[6], hava kirliliğinin büyük kentlerde, özellikle de kirlilik kaynaklarının ve insan nüfusunun yoğunlaştığı alanlarda aşırı olduğunu söylüyor. Ekonomik büyüme ve sanayileşme, artan hava kirliliğine neden oldu. Ardından, kirlenici miktarları çarpıcı bir şekilde arttı; kirliliğin öngörülmesi ve izlenmesi için uygun bir yöntemin değerlendirilmesi çok önemlidir. Merbits ve arkadaşları^[7], farklı PM fraksiyonlarının bir kimyasal karakterizasyonunun CBS tabanlı araştırmaları tamamladığını belirtmektedir. Toksikolojik olarak ilgili bileşenlerin analizi, kentsel, banliyö ve kırsal alanlardaki hava kalitesi hakkında bilgi sağlar. Kimyasal analizlerin sonuçları jeo-istatistiksel modellemeden elde edilen sonuçları desteklemektedir. Beelen ve arkadaşları^[8], hava kirlenicilerinin coğrafi çeşitliliği hakkında çok daha fazla şey anlamaya ihtiyaç duyulduğunu belirtmektedir. Bu, izleme istasyonlarını örneklenmemiş konumlara ekleme yeteneğini gerektirir. Amaç, AB çapında arka plan hava kirliliğine ilişkin doğru ve yüksek çözünürlüklü haritaların geliştirilmesi için

yöntemlerin değerlendirilmesi idi. Janssen ve arkadaşları^[9], ortam havası kalitesinin gerçek zamanlı değerlendirmesi son yıllarda artan bir ilgi olarak kazanmışlardır. Bu evrimi desteklemek için istatistiksel hava kirliliği interpolasyon modeli RIO geliştirilmiştir. Çok düşük hesaplama maliyetinden dolayı bu enterpolasyon modeli, gerçek zamanlı hava kalitesi değerlendirmesi yaparken bir çevre ajansı için etkili bir araçtır. Bunun yanında, geçmiş veri kayıtlarının analiz edilmiş haritalarını üretmek için güvenilir bir enterpolasyon modeli kullanılabilir. Jef ve arkadaşları^[10], bir yandan bilimsel ilgiden dolayı, diğer yandan politik ve düzenleyici yükümlülüklerden ötürü, troposferdeki ozonun izlenmesinin önemli bir konu olduğunu belirtmişlerdir. Bu amaçla, Belçika'da birçok diğer ülkede olduğu gibi sabit bir izleme istasyonu ağı işletilmektedir. Tüm bölge boyunca ozon konsantrasyonlarını tahmin etmek için, seyrek ölçümleri mekânsal olarak tamamlamak için bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Matejcek^[11] trafikten kaynaklanan hava kirliliği kaynaklarının hava kalitesini düşürdüğünü ve kentsel alanlardaki insanları etkilediğini belirtti. Kentsel alanlardaki yaşam koşullarını iyileştirmek için, epidemiyolojik çalışmaların bir parçası olan maruz kalmaları değerlendirmek ve hava kalitesi politikasını ve trafik yönetimini kentsel alanlarda bilgilendirmek için hava kirliliği üzerindeki etkilerin tahmin edilmesi gereklidir. Leelossy ve arkadaşları^[12], hava kirliliğini ortadan kaldırmak için kullanılan modellemenin, en önemli ve en zorlu problemlerin başında geldiğini belirtmektedir. Ortamdaki organik etkilerden arındırma bileşikleri mevcut ortamlarda ortaya çıkmaktadır. Kimyasal özelliklerin ötesinde, çevre ve insan sağlığı da etkilenebilir. Hoogh ve arkadaşları^[13], nüfus araştırmalarında bireysel hava kirliliği maruziyetini tahmin etmek için arazi kullanım gerilemesi (LUR) ve dağılım modelleri (DM) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin performansı hakkında pek az mukayese yapılmıştır. Hoek ve arkadaşları^[14], dış hava kirliliğine uzun vadeli ortalama maruz kalmanın sağlık üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmaların son sağlık etkileri değerlendirmelerinde önemli bir rol oynadığını belirtmektedir. Ortamdaki hava kirliliğine uzun süreli maruz kalmanın epidemiyolojik çalışmalar için maruz kalma değerlendirmesi, küçük ölçekli mekânsal varyasyon nedeniyle zor bir mücadeledir. Hızla gelişmekte olan sanayileşmiş bu dünyada, birçok faktör çevreyi olumsuz etkilemekte ve sorunlu sonuçlar doğurmaktadır. En büyük sorunlardan biri hava kalitesidir. Kirleticilerin mekânsal dağılımını anlamak ve jeostatik yaklaşımlar uygulayarak hava kalitesini izlemek, veri kalitesi araştırmaları alanında zorlu ve güncel ya da yerel bir yaklaşım sergilemektedir^[15].

VERİ VE YÖNTEM

Çalışma alanının Ankara ilini genel olarak kapsaması amacıyla çalışma alanı 32.3° - 33.3° kuzey enlem, 39.6° - 40.3° doğu boylam arası seçilmiştir. ÇŞB'na bağlı Ankara'da bulunan 8 noktadaki hava kirliliği ölçüm istasyonlarının 2010-2016 yılları arası saatlik ortalama kirletici değerleri alınmıştır (Şekil 1). Bu veriler kullanılarak geliştirilen model yeni ölçüm zaman verilerine de uygulanmıştır.

İstasyon verileri kullanılarak ölçüm yapılmayan alanlardaki mekânsal dağılım için enterpolasyon haritalarının oluşturulmasında öncelikle iki farklı ara değer hesaplama yöntemi seçilmiştir. Bunlar, ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon (Inverse Distance Weighting, IDW) ve en uygun ara değer hesaplama (Kriging) yöntemleridir. Bu çalışmada, istasyon sayısının azlığı ve çalışma alanının yeryüzü kullanımının farklılıklarını yeterince yansıtmaması gibi sebepler yeni bir yöntem geliştirilmesini teşvik etmiştir. Ölçüm değerlerine bağlı olarak dinamik bir yapı içeren bu yeni yöntem sayesinde herhangi bir şehirde istasyon sayısının az olması durumunda bile daha başarılı sonuçların alınması hedeflenmiştir. Mekânsal dağılım model sonuçlarının başarımlarını test etmek için 6 istasyon verisi eğitim ve 2 istasyon verisi test ölçümleri için değişimli olarak seçilmiştir. Kirliliğin dağılım performansını değerlendirmek için saatlik, günlük, aylık ve mevsimlik ortalama değerler kullanılmıştır ve sonuç bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Ters mesafe ağırlıklı ara değer hesaplama tekniği incelenen sahada yakındaki noktaların uzaktaki noktalardan daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayanır. Bu yöntemde verisi bulunan noktadan uzaklaştıkça ağırlığı da azaltan ve verisi bulunan noktalarının ağırlıklı ortalamasına göre bir yüzey ara değer hesaplaması yapar. Farklı IDW yöntemleri arasından en yaygın kullanılanı “Shaperd’s Metodu”dur. IDW yöntemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

Ağırlık değerleri w ise:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$

formülüyle hesaplanır. Güç parametresi p genellikle 2 alınır. Verisi bulunan nokta ile hesaplanacak nokta arasındaki mesafe h aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

En Uygun Ara Değer Hesaplama (Kriging)

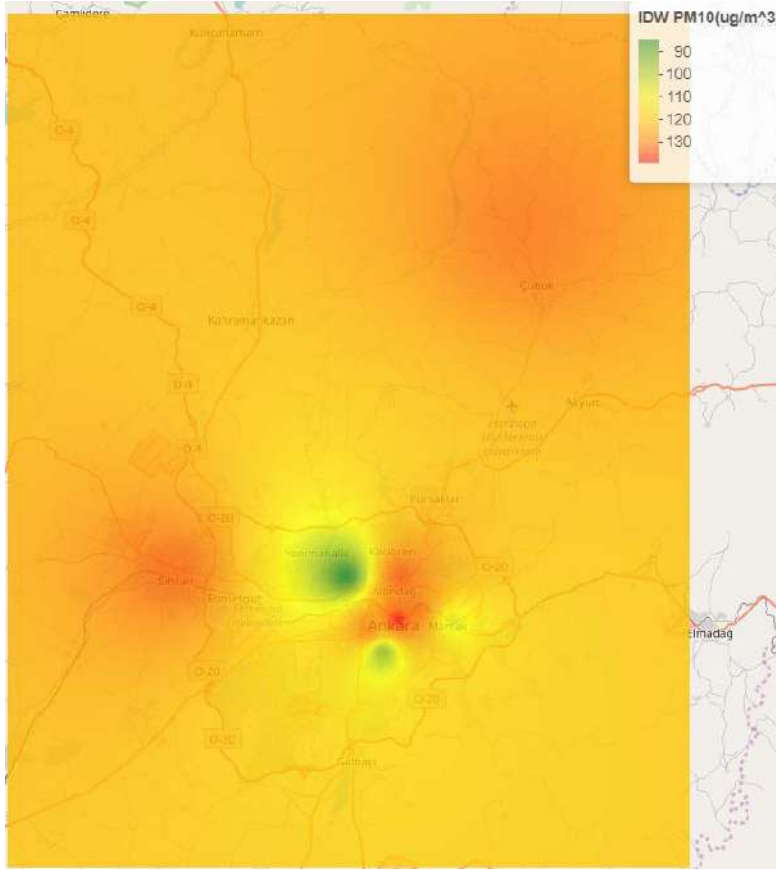
Kriging yöntemi mekânsal verilerin enterpolasyonunda en çok kullanılan yöntem olarak kabul edilmiştir. Çoğu alansal dağılım yazılımında ön tanımlı yöntem olarak Kriging yöntemi kullanılmaktadır. Kriging yöntemi ile düzensiz yapıda dağılmış verilerden eş değişim eğrileri etkin bir şekilde elde edilmektedir. Veri içerisindeki eğilimleri de değerlendiren Kriging yöntemi, uygun variogram modeli ile tüm veriler için uygun bir model geliştirebilmektedir.

Kriging yöntemi en basit olarak,

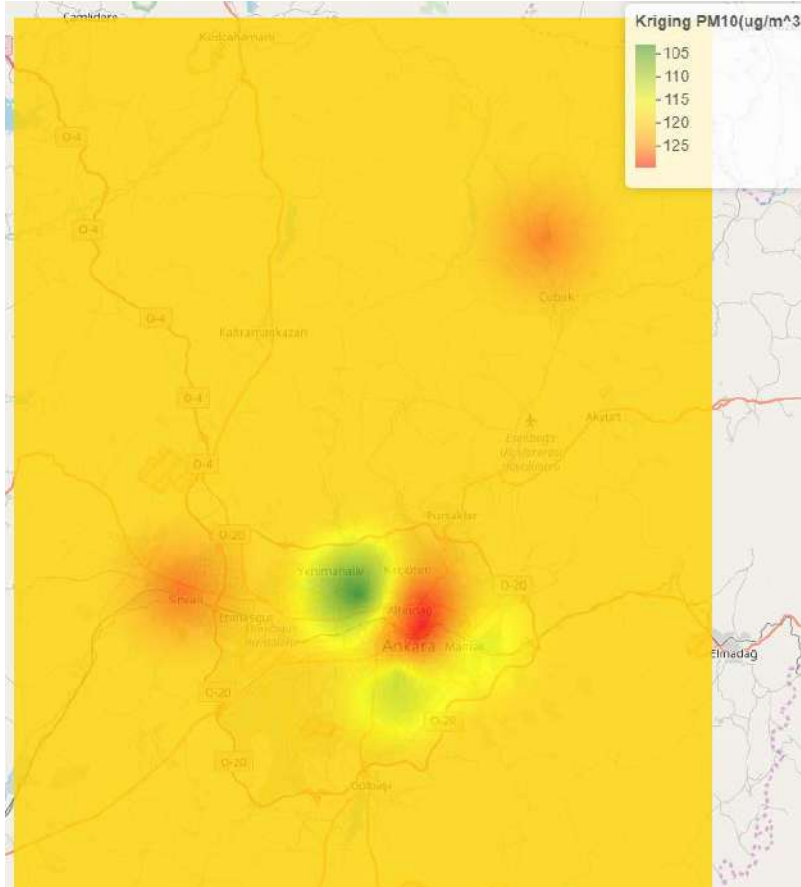
$$Z = \mu + \varepsilon$$

formülü ile ifade edilir. Burada Z tahmin edilecek değer, μ sabit ortalama ve ε mekânsal bağımlılıktan kaynaklanan hataları temsil etmektedir.

Bu yöntemlerde ölçümlerin birbirinden bağımsız veya az bağımlı olduğu durumlarda ara noktalardaki değerlerin tahmininde başarı oranı yetersiz kalabilmektedir. Akyürek ve arkadaşları^[16] tarafından yapılan bir çalışmanın görselleri aşağıda sunulmuştur. Burada, IDW ve Kriging yöntemleri istasyonlarda yapılan ölçümler kullanılarak yersel hava kalitesi istasyonu bulunmayan noktalardaki kirlilik değerlerinin analizi veya kirliliğin mekânsal dağılımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Hem IDW ve hem de Kriging yöntemi kirlitici dağılımlarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen kirlitici kaynaklarının yer almaması sebebiyle başarımları düşmektedir (Şekil 4, Şekil 5).



Şekil 4. PM10 Haziran kirletici verilerinin Ters Ağırlıklı Mesafe yöntemine göre dağılımı.

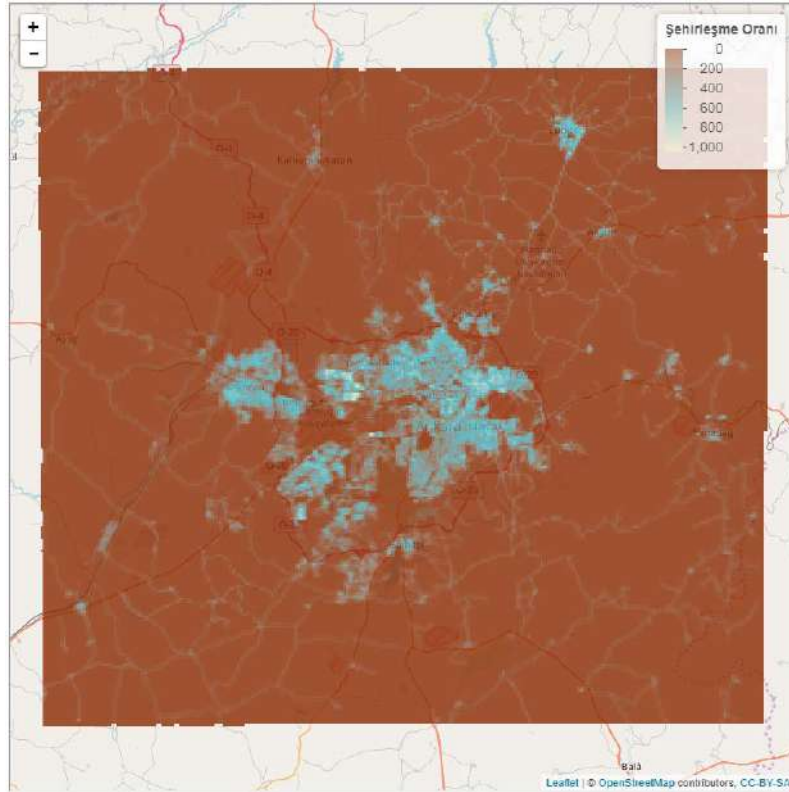


Şekil 5. PM10 Haziran kirletici verilerinin Ordinary Kriging yöntemine göre dağılımı

Arazi Temelli Enterpolasyon Yöntemi (ATEY)

Bu yöntem IDW ve Kriging'e ek olarak bir yerde kirliliğe sebep olabilecek kaynakların da sisteme birer katman olarak eklenmesi ile kirliliğin sahalarda dağılımını içerir. Geliştirilen geoistatistik enterpolasyon yaklaşımı ile kirliliği etkileyen doğrudan veya dolaylı parametreler eklenerek tahmin başarımının artırılması amaçlanmıştır. Bunun için ölçülen istasyon/istasyonlardaki değerlerin oluşumuna sebep olabilecek örneğin yerleşim bilgisi gibi parametreler kullanılır. Parametreler ile ölçüm değeri arasında varsa bir ilişki değerinin belirlenerek, bu ilişkinin diğer ölçüm yapılmayan sahalarda da uygulanması yapılmaktadır. Ters modelleme tekniğinin kullanılması temel alınmaktadır.

Yerleşim yerlerinde emisyon envanteri dolaylı olarak yol bilgisiyle ilişkilidir^[17]. Yollar ve türleri hakkında ayrıntılı bilgiye açık kaynak olan OpenStreetMap projesinden ulaşılabilir (https://www.openstreetmap.org/). Şehirleşme oranını hesaplayabilmek için 5*5 m çözünürlüklü haritalardan istifade edilmiştir. Şehirleşmenin dolaylı olarak insan faaliyetlerinin yoğun olduğu yerlerde alan birime düşen yol miktarı doğal olarak daha yüksektir. Yollar ve türleri kullanılarak konut ve trafik kaynaklı kirlilik dolaylı olarak değerlendirilmektedir. Yollardaki yoğunluğun dur-kalkları çoğaltması sonucu trafiğin ek kirlilik oluşturması sebebiyle, zamanla sisteme trafik yoğunluğu bilgisinin eklenmesiyle ulaşım kaynaklı kirlilik kaynağı daha çok temsil edilerek modelin başarımını arttıracaktır. Bitki örtüsü ile kaplı arazilerin tespiti için uydu görüntülerinden hesaplanan bitki örtüsü indeksi (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) verileri yol haritaları ile bütünleştirilerek kullanılabilir^[17]. Mart ayı sonunda yerleşim yeri dışındaki yerler genel olarak yeşil bitki örtüsü ile kaplı olacağı senaryosu kabul edilerek çalışma sahası için NDVI değerleri 22 Mart 2014 tarihli 30*30 m yatay çözünürlüklü LANDSAT 8 uydu verisinden elde edilmiştir.



Şekil 6. Şehirleşme haritası

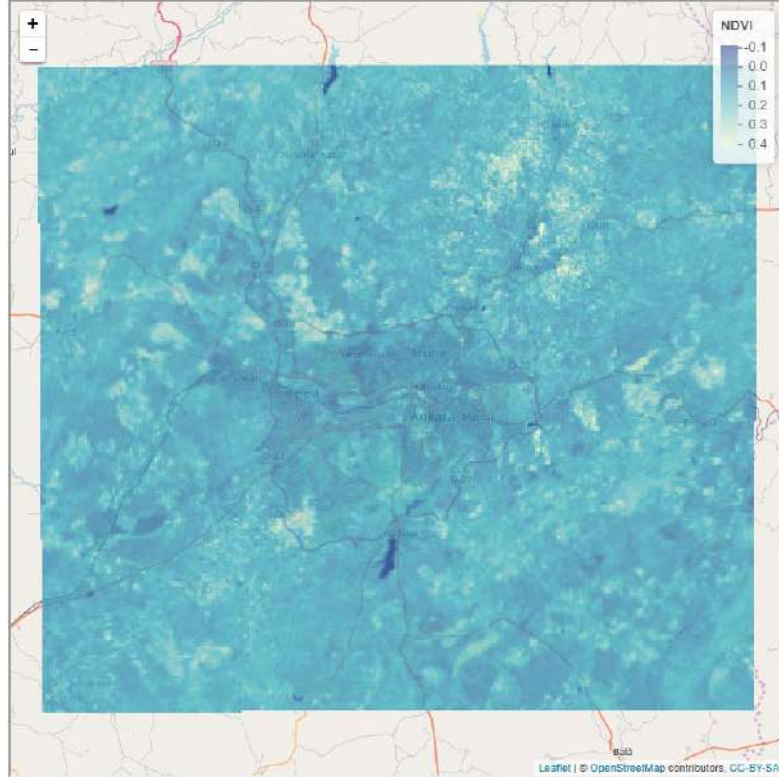
Geliştirilen Arazi Temelli Enterpolasyon Yöntemi (ATEY) modelinde kirlilik yoğunluğuna etki eden parametrelerin birer katman olarak eklenmesi ve katmanların birbirinden bağımsız olarak da sistemle bütünleştirilebilmesi mümkündür. Elde edilmesi, hesaplanması ve maliyeti düşük olduğu için bu çalışmada ölçüm değerleri, yol bilgisi ve NDVI değerleri arasında katsayıların oluşturulmasında aşağıdaki senaryolar çerçevesinde sınır değerler oluşturulmuştur.

a) $S1 = \text{En küçük ölçüm} * \%1$. Ölçülen en küçük değer belli bir yüzdesi alınır. Arka plan kirliliği için en küçük ölçülen istasyon değerinin belli bir yüzdesi alınmıştır.

b) S2= Ölçümler ortalaması. Ortalama yerleşim ve NDVI değerleri alınmıştır.

c) S3 = En yüksek ölçüm * %150, Ölçülen en yüksek değer belli bir yüzdesi alınarak sahada olası en yüksek değerlerin alınması.

S1, S2 ve S3 değerleri yerleşim bilgisiyle oranlanarak bir katsayı elde edilir. Bir yerde yerleşim varsa belirlenen katsayı oranında kirlilik geleceği kabul edilir. Yol için katsayılar belirlenirken yol tipi (otoyol, cadde vb.), yol yoğunluğu, seyir hızı, dur-kalk oranı gibi parametreler de göz önünde bulundurulabilir. Benzer şekilde ölçüm değer/değerleri NDVI bilgisi ile de ilişkilendirilir.



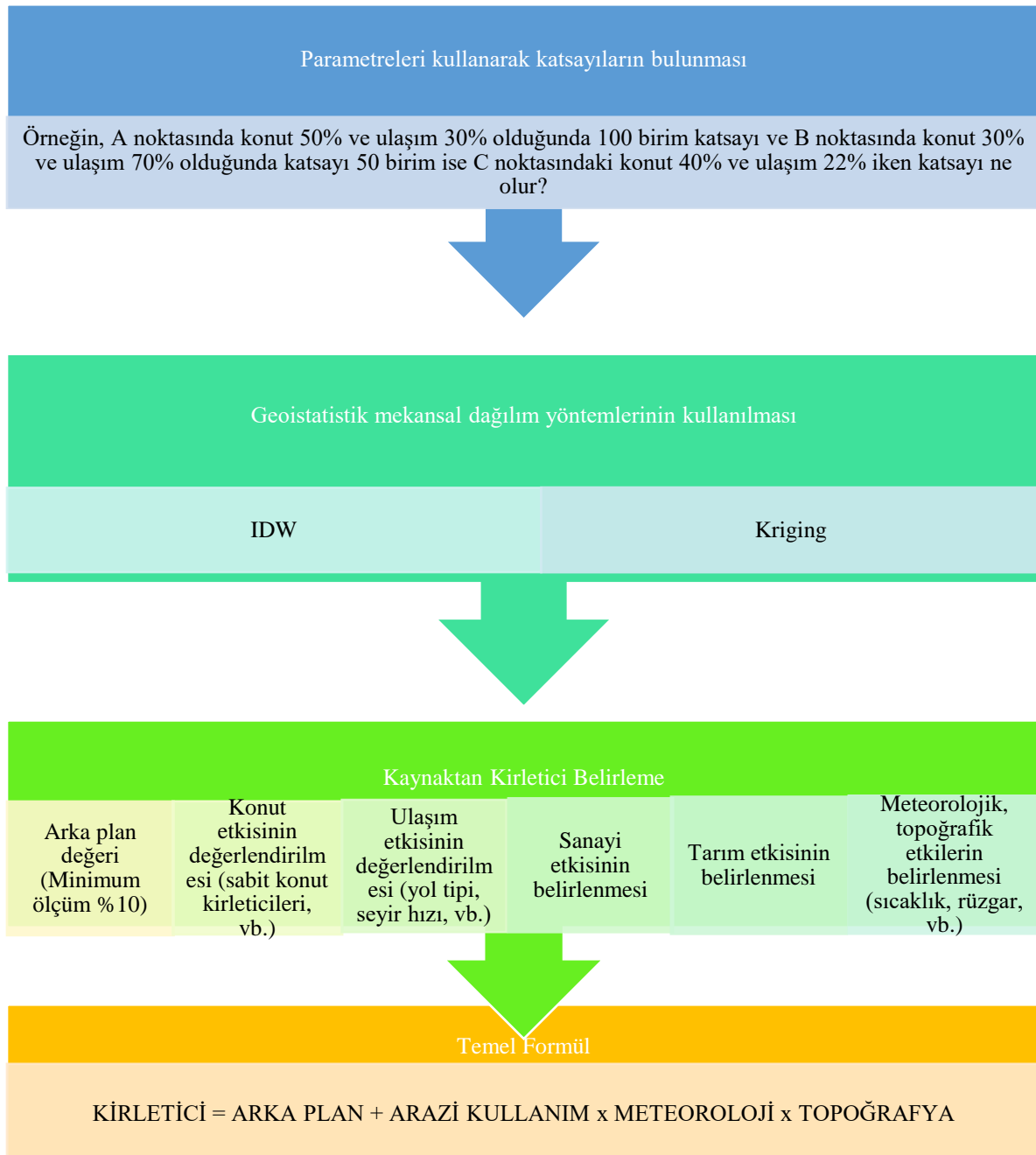
Şekil 7. NDVI haritası

Bu çalışmada, kurulu bulunan istasyonların ölçüm sonuçları referans alınarak ölçüm yapılmayan noktalarda kirliliğin kümelenmesi ve düzeyinin belirlenmesine yönelik yaygın olarak IDW ve Kriging yöntemine ek olarak yeni analiz yöntemleri belirlenerek çalıştırılmıştır. Ölçüm yapılmayan alanlar için değerler tahmin edilmiştir. Önerilen modelin önemli bir özelliği sürekli geliştirilmeye açık olmasıdır. Şehir dışında da sürekli ölçüm yapan istasyonların olması arka plan kirliliğinin yansıtılması açısından oldukça önemlidir. Geliştirilen modele mümkün olduğu kadar yüksek çözünürlükte ek bilgiler girilebilir. Girilebilecek ek bilgilerin bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Sanayi emisyon envanterinin zaman ve mekan dağılımı
- Araba trafik yoğunluğu
- Arabaların egzoz salınım bilgileri
- Birim alana düşen araba sayısı
- Nüfus, konut yoğunluğu
- Alansal konut ısınma kaynağı
- Kamyon ve yük taşıyıcılarının sıklıkla kullandığı rotalar
- Şehirlerin yeryüzü kullanım bilgisi parklar, haller, otogarlar, sanayi bölgeleri vb.
- Topoğrafik bilgiler
- Meteorolojik bilgiler
 - ahalle haritaları (SHP formatında),
 - Isınma kaynağı (doğalgaz veya diğerleri),
 - Nüfus sayısı
 - Araba sayısı (çeşitliliğine göre mümkünse), genel egzoz salınım bilgileri ve ortalama yıllık aldığı kilometre

5. Sanayi faaliyetleri
6. Park alanların haritası
7. Otopar / hal / AVM / otoparklar / hastaneler / sanayi bölgeleri
8. Pazar yerleri ve günleri

Ankara bölgesindeki hava kalite istasyonları genel olarak konut ağırlıklı alanlara kurulduğunu gözlemlenmiştir. Bu noktalara sanayi etkisi dolaylı olarak yansımaktadır ve şehir içinde ana kirletici unsurlar şehirleşmenin (ulaşım ve konut kaynaklı) olduğunu kabul edilmiştir. Bu senaryoya önemli emisyon envanterlerinin mekan ve zaman bilgileriyle beraber eklenmesi yöntemin başarımını daha da arttıracaktır. Bu doğrultuda kirleticilerin yoğunluğunu temsilen yatay çözünürlük 300x300 m ve 900x900 m olarak belirlenmiştir. Yerleşim ve NDVI katsayıları belirlenirken bir matris oluşturulmuş ve istasyon değerleri ile yol ve konut katmanı oran çarpımı kullanılarak Ankara üzerinde dağıtılmıştır. Her bir yatay çözünürlüğe bağlı hücre için elde edilen saha kirlilik değerleri meteorolojik ve topoğrafik şartlar da dikkate alınarak ayrıca IDW veya Kriging yöntemi uygulanarak tekrar bölgeye dağıtılması yapılabilir. Yapılan işlemlerin temel mantığı aşağıdaki algoritma ile özetlenebilir:



SONUÇLAR

Ölçüm yapılan istasyon verileri baz alınarak ölçüm yapılmayan noktaların tahmin edilmesi için geoistatistik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Geo-istatistik yöntemler ölçümlerin birbirine bağımlı olduğunu kabul eder. Bu yöntemlerde birbirinden bağımsız ölçümleri tahmin için kullanmak yanlış sonuçlara götürebilir. Bu çalışmada ölçüm verileri IDW, Kriging ve ATEY yöntemleri ölçümler baz alınarak ölçülmeyen veya test edilmek istenen noktalardaki kirlilik miktarlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Ankara'da hava kirliliği ölçümü yapılan 8 istasyonun verileri kullanılmıştır. Mekânsal dağılım model sonuçlarının başarımlarını testi için 6 istasyon verisi eğitim ve 2 istasyon verisi test ölçümleri için seçilmiştir. ATEY yönteminin geliştirilmesinde, ölçüm verilerinin doğrudan kullanılarak dağılımın modellenmesi dönüşümlü olarak tüm istasyonlar için model başarımları elde edilebilir. Değişimli olarak bazı istasyonlar test olarak alınarak geoistatistik yöntemler ile alan dağılımı uygulanır. Isınma veya ısınma olmayan dönemler için farklı zaman aralıklarında model başarımları test edilebilir. Verilerin zaman ve mekân ölçeğinde geçmişteki kendisi ile olan ilişkiler ve geçmiş diğer istasyonlar arasındaki ilişkiler değerlendirilebilir. Bu şekilde, hangi koşullarda istasyon arası ilişkiler artıp, hangi koşullar arası ilişkilerin düştüğü gözlemlenebilir. Kirleticilerin zaman ve mekân ölçeğinde dağılımının modellenmesine aşağıdaki katmanlar da eklenerek her bir katman durumunda model başarımları elde edilebilir.

Büyük şehirlerdeki kirleticilerin düşmesini veya artmasını sağlayan meteorolojik şartların belirlenmesi, raporlanması (örneğin İstanbul'a kuzeyli rüzgârlar temiz hava getirir, Ankara'da rüzgârsızlık kirleticilerin artmasına sebep olur vs.) ve meteorolojik tahminlerin sonuçları ile otomatik durumu tahmin edilmesi. Kirlilik alan dağılımını hesaplamak için farklı etken katmanları oluşturulmasında aşağıdakilerden faydalanılabilir.

- 1- Yerleşim yeri haritası, nüfus yoğunluğu, (İl, ilçe, mahalle)
 - 2- Isınma kaynağı dağılımı
 - 3- Yollar haritası, araç çeşitliliği, yakıt çeşitliliği
 - 4- Yükseklik haritası
 - 5- Rüzgâr haritası
 - 6- Sıcaklık haritası
 - 7- Isınma kaynak haritası
 - 8- Nüfus yoğunluğu haritası
 - 9- Emisyon kaynak haritası
 - 10- Corine yeryüzü kullanım sınıflandırması haritası
 - 11- Kayıtlı araç yoğunluk haritası
 - 12- EMEP arka plan kirlilik haritası
 - 13- Hava kirliliği istasyonuna en yakın meteorolojik istasyon/istasyonlar bulup onların verileri ile inceleme yapmak
 - 14- Atmosferik sayısal model yardımı ile son yılların verilerini üretmek meteoroloji ve kirlilik arasındaki ilişkilerin araştırılması
 - 15- Uzaktan algılama teknikleri ile yüzey verileri kirletici katmanlarının oluşturulması
 - 16- Uzaktan algılama kirlilik değerleri ile ölçüm değerleri arasındaki ilişkilerin araştırılması
- Örneğin yol ve konut bilgisi aşağıdaki gibi kullanılabilir.

- YOL

matrisYOL= (çözünürlük, yol sınıfları, emisyon katsayısı, zaman, meteoroloji,..). Daha sonra bu matris katsayıları değiştirilebilir. Bazı etkili parametreler.

- Yol tipi (otoyol, büyük cadde...)
- Yol yoğunluğu (trafik bilgisi ile elde edilir)
- Seyir hızı / dur-kalk oranı

- KONUT

matrisKONUT= çözünürlük*. Daha sonra bu matris katsayıları değiştirilebilir. Kaynaktan kirletici belirlemede konut etkisinin değerlendirmesi bazı etkili parametreler.

- Konut yoğunluğu hesabı (yatay ve dikey)
- Isınma kaynağı
- Sabit konut kirletici

- SANAYİ

- 5. Sanayi etkisinin değerlendirilmesi

- METEOROLOJİ

- Sıcaklık

1. $T < 15$

Konut etkisi = 10/10

2. $T > 15$

Konut etkisi = 2/10

- Rüzgâr

1. $W_s < 2$ m/s

Konut etkisi ve ulaşım etkisi

2. $W_s > 2$ m/s

Konut etkisi ve ulaşım etkisi W_s

- Basınç, yağış, nem vs.

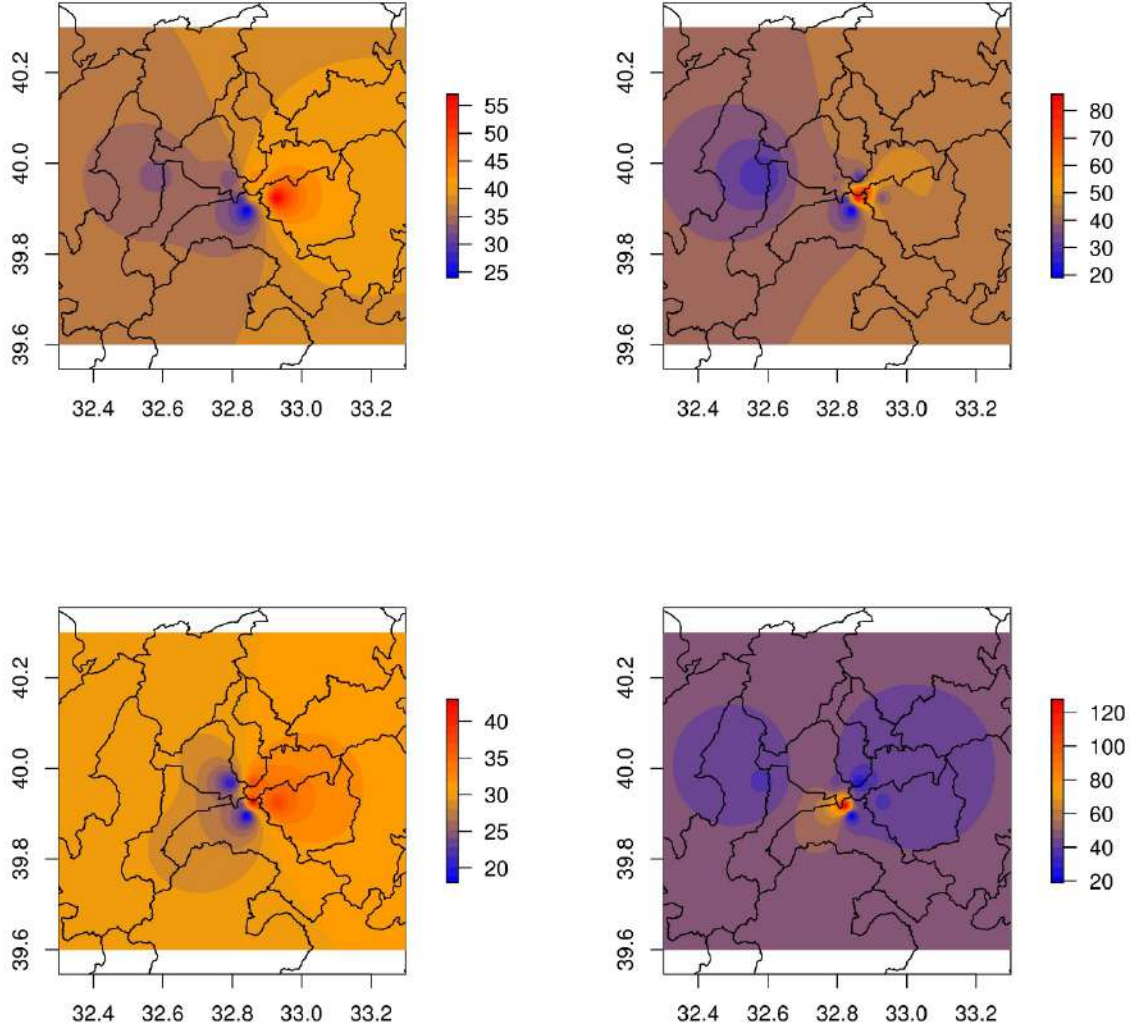
Kirletici = arka plan + konut * sıcaklık etkisi * rüzgâr etkisi + ...

Kirleticilerin alansal dağılımı ana etkenleri kaynaklara olan mesafe, topoğrafya ve klimatolojik şartlardır. Büyük şehirlerin içi kirletici dağılımı genel olarak konut ve ulaşım kaynaklı olduğu bilinir. Sanayi etkisi daha küçük şehirlerde veya büyük şehirlerin kenarlarında daha etkin olabilir. Bu çalışmada geo-istatistik yöntemler kullanarak istasyon olmayan noktalarda kirletici tahmini yapmaya çalışılmıştır. Temel geo-istatistik yöntemler olan ters mesafe ağırlıklı (IDW), enterpolasyon ve Kriging enterpolasyon çalıştırılmıştır. Günlük ve saatlik veriler üzerinde enterpolasyon uygulanıp haritalar oluşturulmuştur. Analiz sonucu, sadece ölçümden yola çıkarak alansal dağılımı yapan yöntemler, alandaki farklı yüzey kullanım bilgisini içermediğinden, ölçüm noktalarından uzaklaştıkça, doğruluk oranı düşmektedir. ATEY yönteminde ise yeryüzü kullanım bilgisi, meteorolojik ölçümler, uydu görüntüleri ve yol haritalarını içermektedir. Çalışma alanı, istasyonların yoğun olarak bulunan Ankara bölgesi için yapılmıştır.

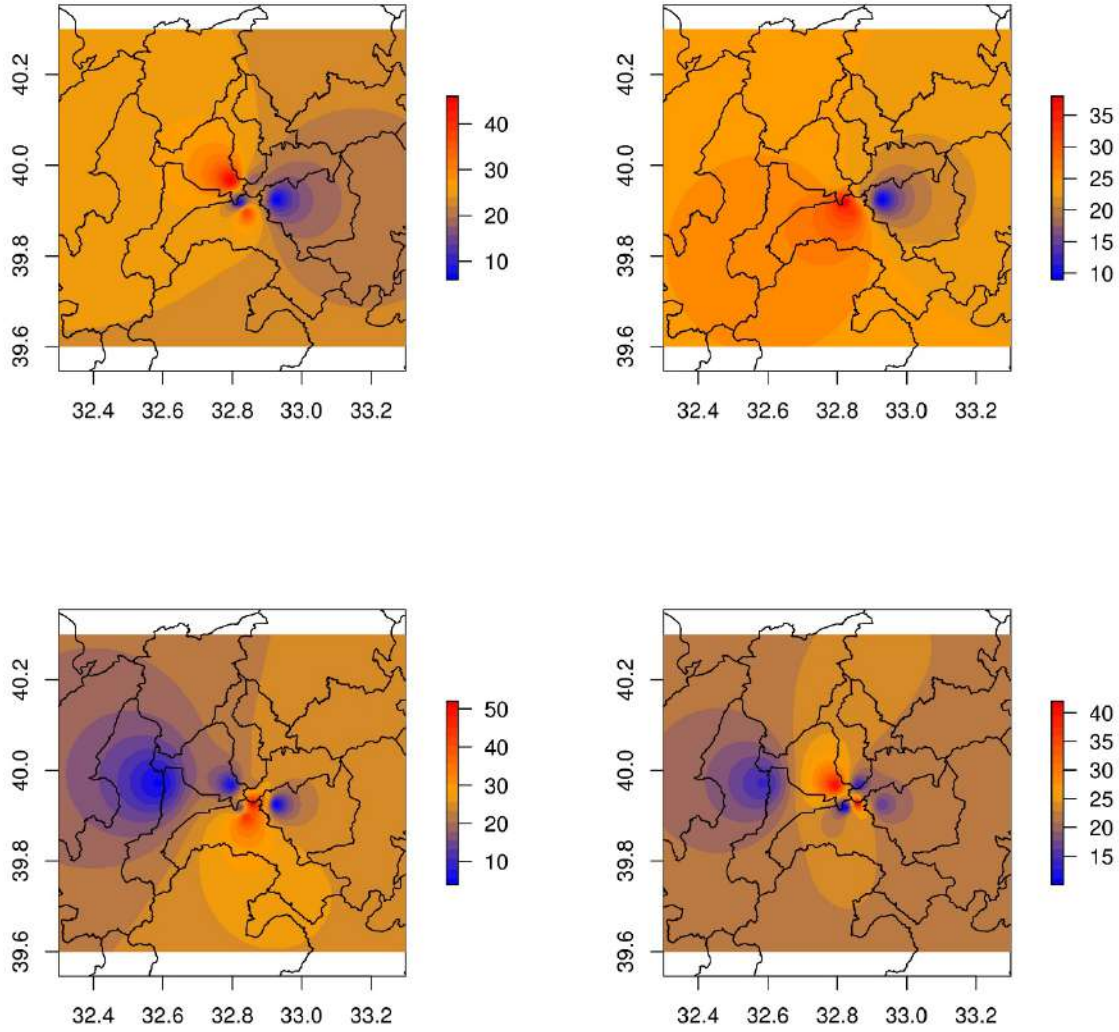
Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (Inverse Distance Weighting – IDW) Yöntemi

a) IDW Saatlik Dağılım Örnekleri

Ankara ili için ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi ile yapılan saatlik analizde 1 Ocak ve 1 Temmuz 2016 günlerinde 0, 6, 12 ve 18 saatlerindeki ölçümler için uygulanmıştır.



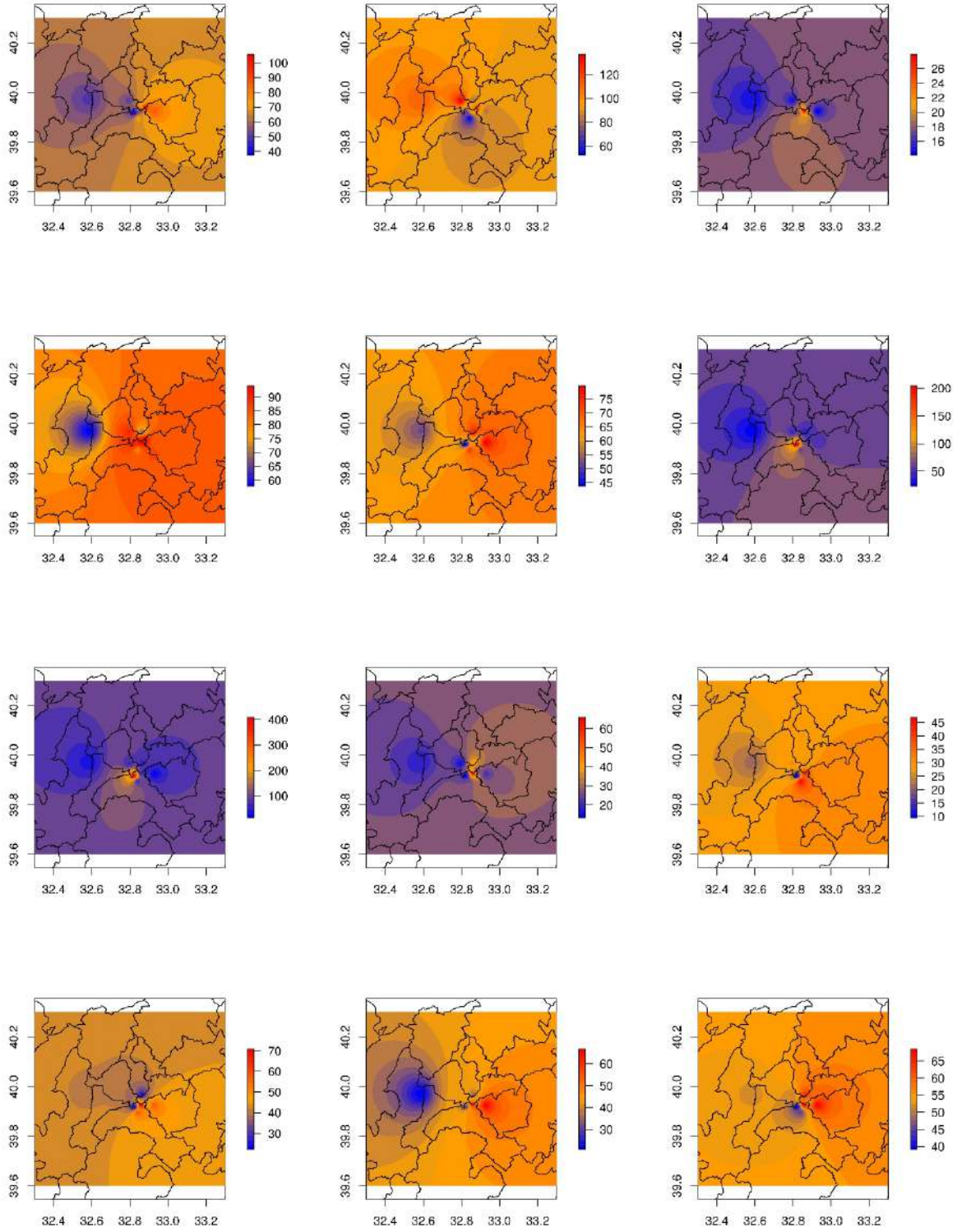
Şekil 8. 1 Ocak 2016 saatlik IDW ile mekânsal dağılım örnekleri (sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)



Şekil 1. 1 Temmuz 2016 saatlik IDW ile mekânsal dağılım örnekleri (sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)

b) IDW IDW Günlük Dağılım Örnekleri

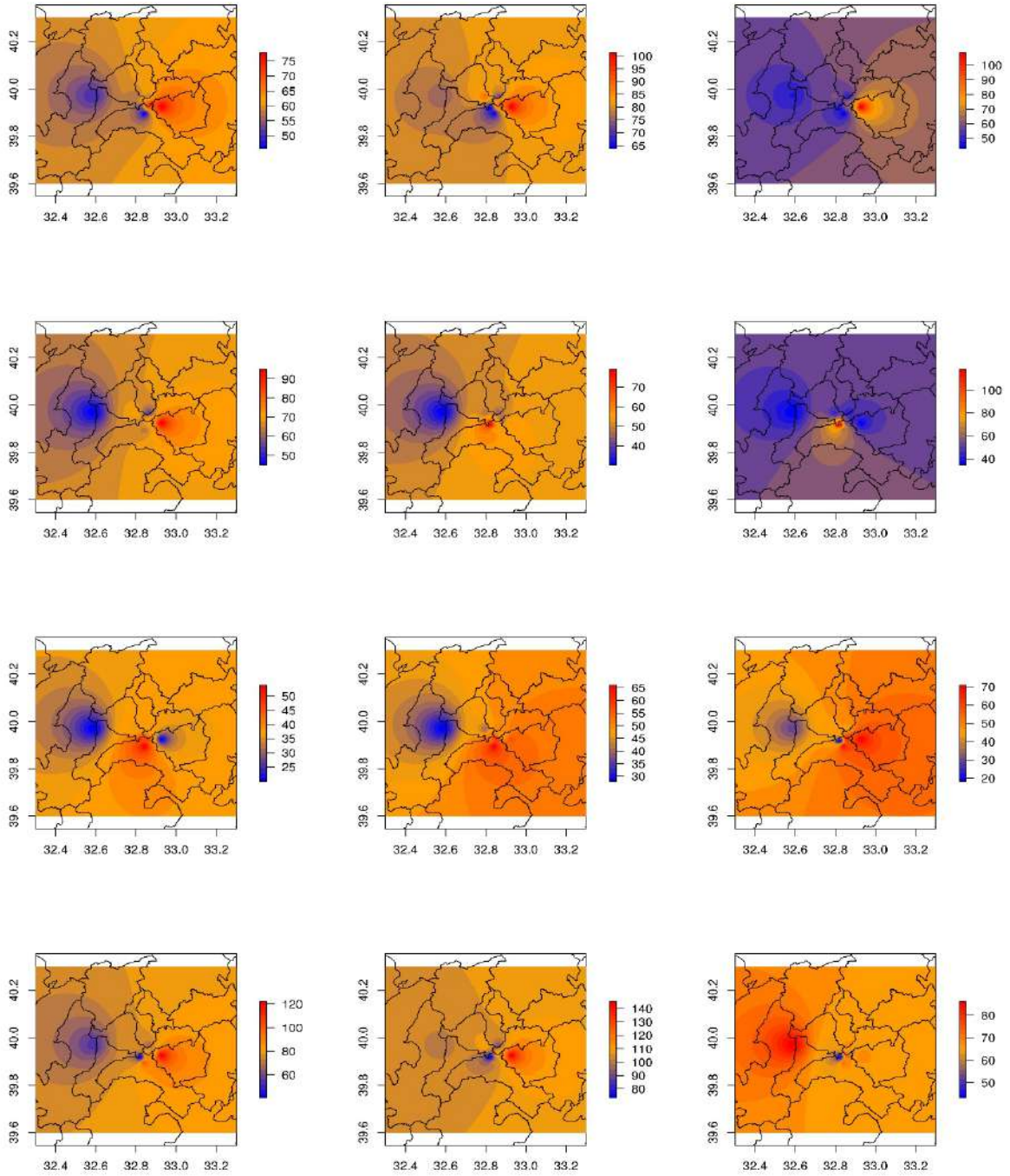
Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi ile 2016 yılı her ayın 15. gününün değerlendirilmesi yapılmış ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. IDW ile her ayın 15. günündeki mekânsal dağılım (görseller ay sırasına göre dir.)

c) IDW Aylık Dağılım Örnekleri

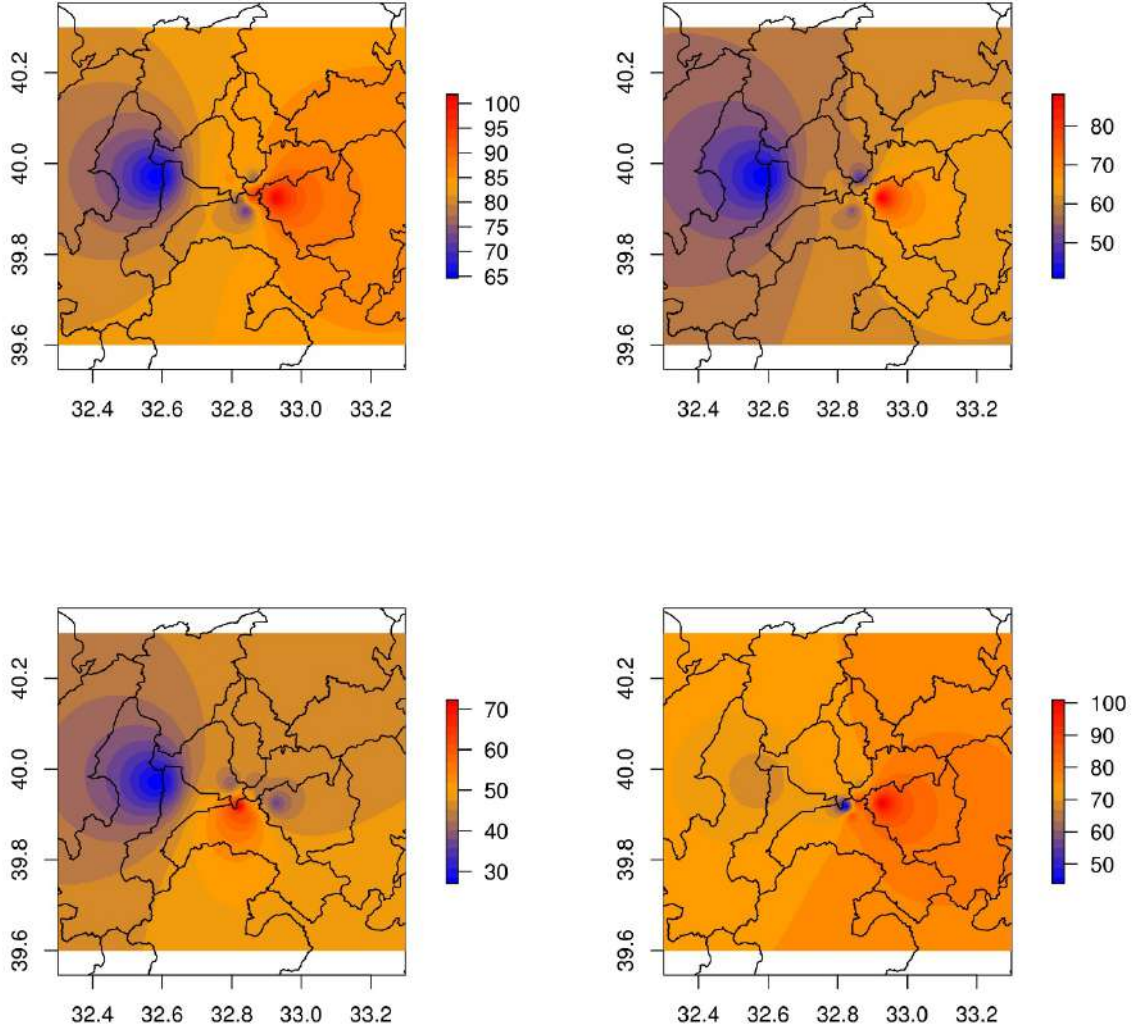
2016 yılı aylık ortalama değerleri ve IDW yöntemi kullanılarak kirleticinin mekânsal dağılımı değerlendirilmiştir.



Şekil 11. IDW ile aylık ortalama değerlerin mekânsal dağılımı

d) IDW Mevsimlik Dağılım Örnekleri

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak Ankara ili 2016 yılı için mevsimsel dağılım değerlendirilmesi yapılmıştır.

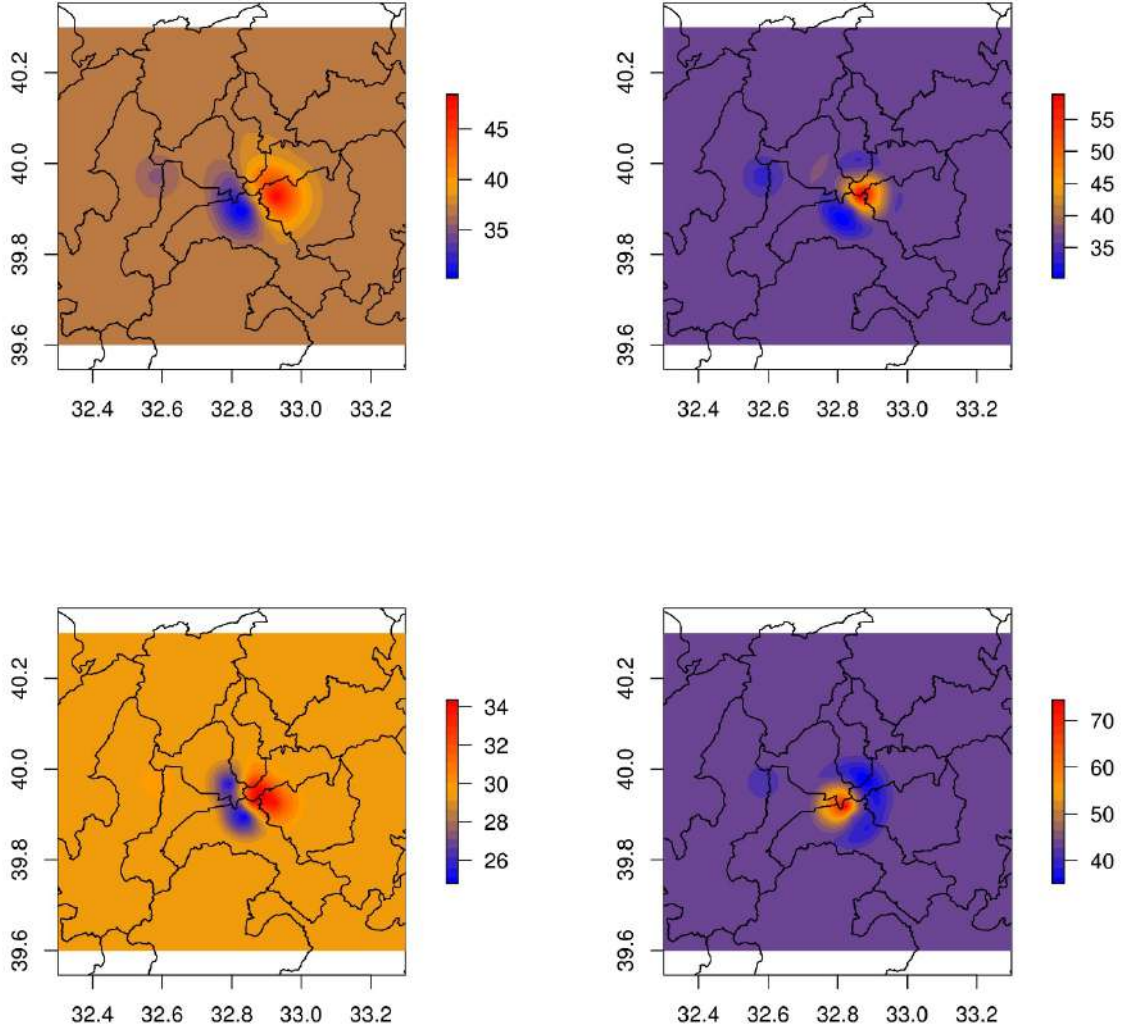


Şekil 2. IDW ile mevsimlik ortalama değerlerin mekânsal dağılımı (Kış-İlkbahar-Yaz-Sonbahar)

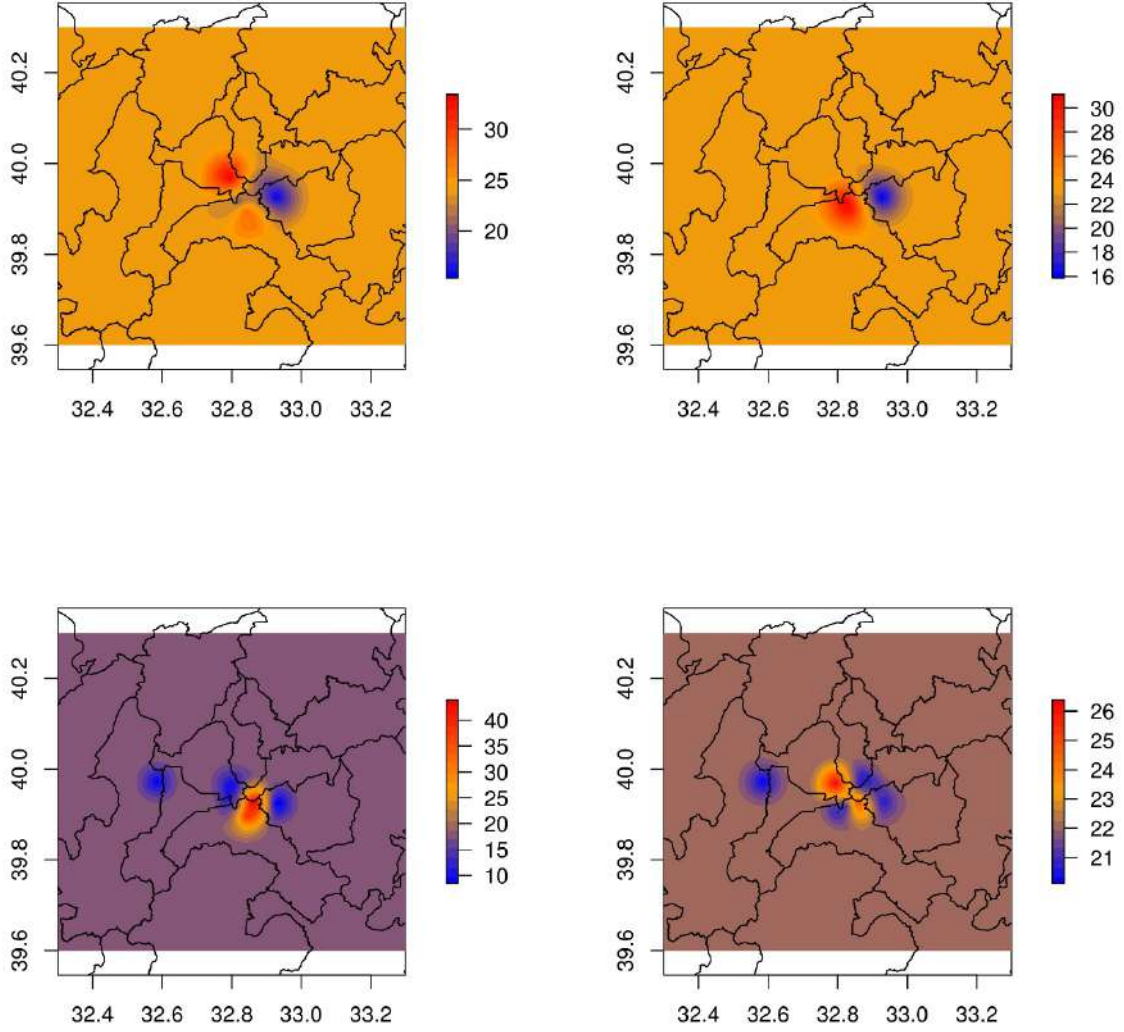
En Uygun Ara Değer Hesaplama (Kriging) Yöntemi

a) Kriging Saatlik Dağılım Örnekleri

Ankara ili için en uygun ara değer hesaplama yöntemi ile yapılan saatlik analizde 1 Ocak ve 1 Temmuz 2016 günlerinde 0, 6, 12 ve 18 saatlerdeki ölçümler için uygulanmıştır.



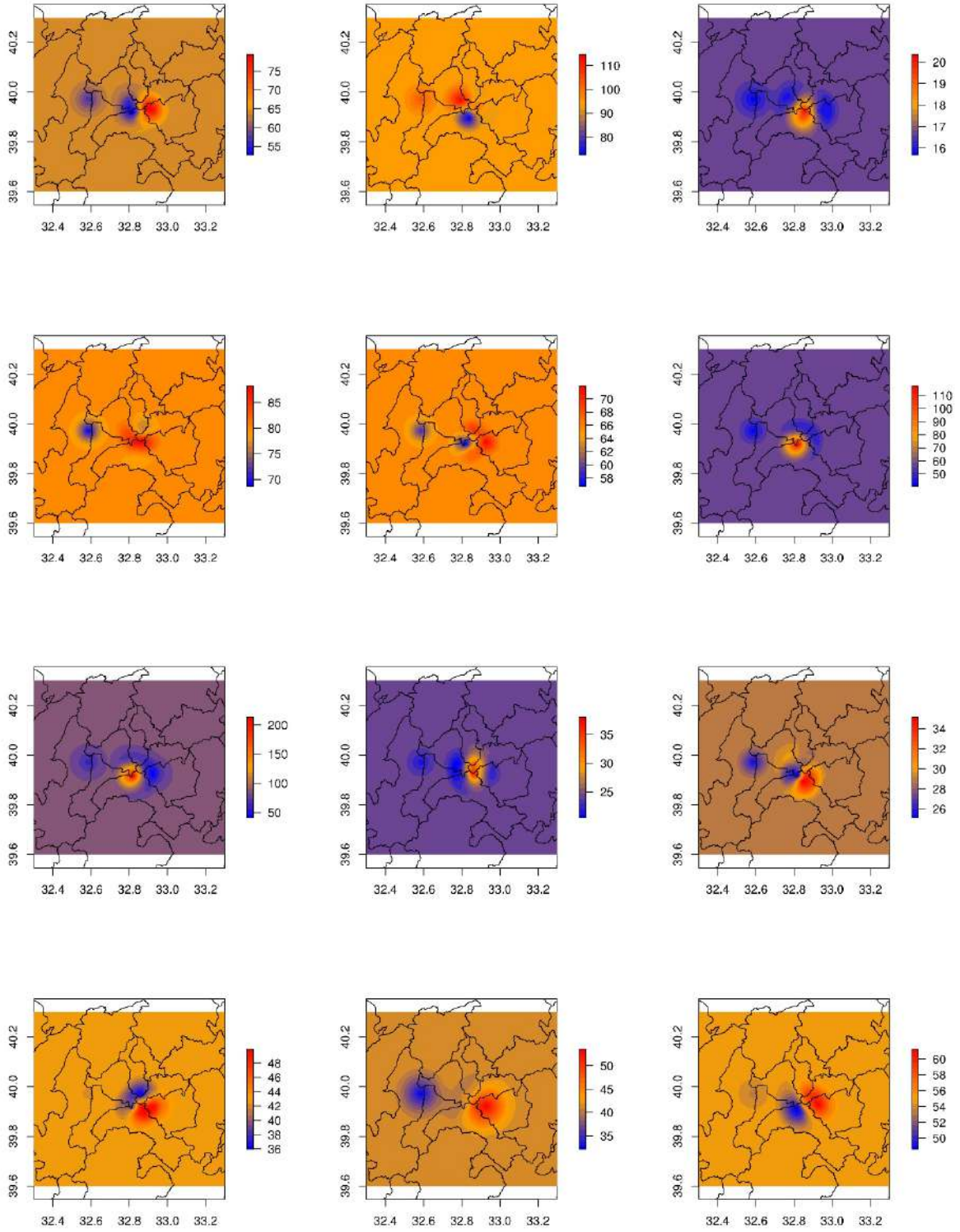
Şekil 3. 1 Ocak 2016 saatlik Kriging ile mekânsal dağılım örnekleri (sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)



Şekil 4. 1 Temmuz 2016 saatlik Kriging ile mekânsal dağılım örnekleri (sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)

b) Kriging Günlük Dağılım Örnekleri

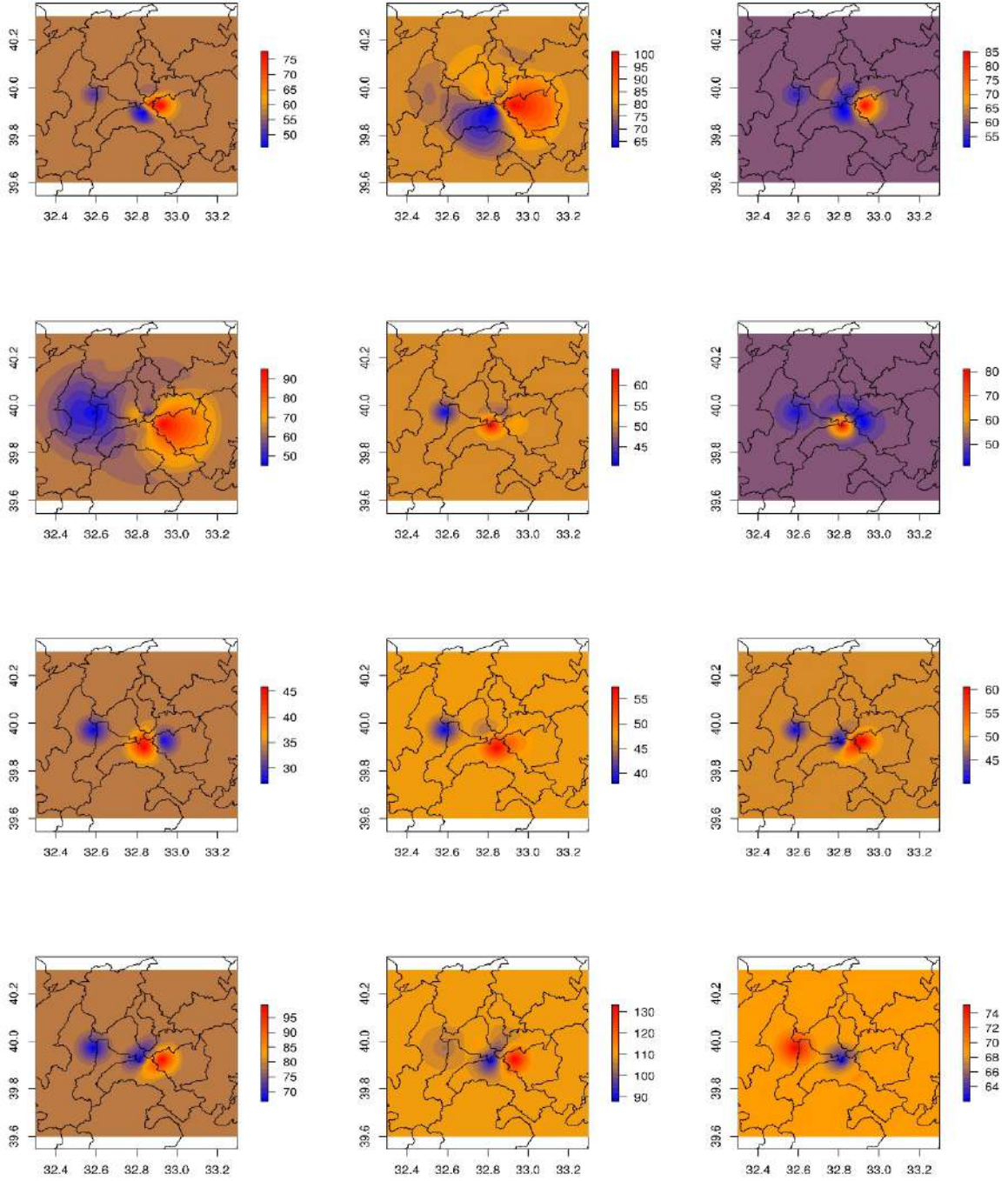
En uygun ara değer hesaplama yöntemi ile 2016 yılı her ayın 15. gününün değerlendirilmesi yapılmış ve Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Kriging ile her ayın 15. günündeki mekânsal dağılım (Görseller ay sırasına göredir.)

c) Kriging Aylık Dağılım Örnekleri

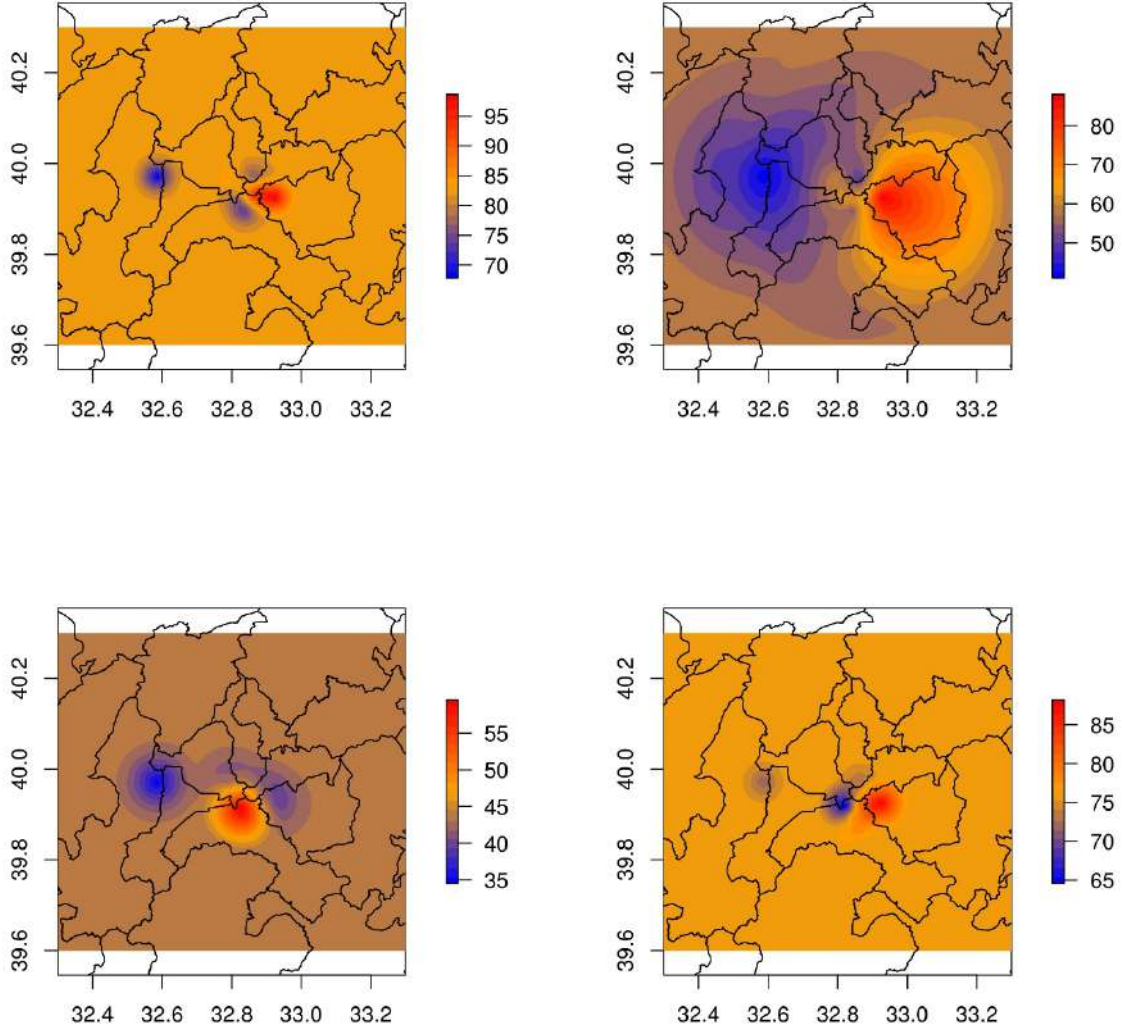
2016 yılı aylık ortalama değerleri ve Kriging yöntemi kullanılarak kirleticinin mekânsal dağılımı değerlendirilmiştir.



Şekil 6. Kriging ile aylık ortalama değerlerin mekânsal dağılımı

d) Kriging Mevsimlik Dağılım Örnekleri

En uygun ara değer hesaplama yöntemi kullanılarak Ankara ili 2016 yılı için mevsimsel dağılım değerlendirilmesi yapılmıştır.

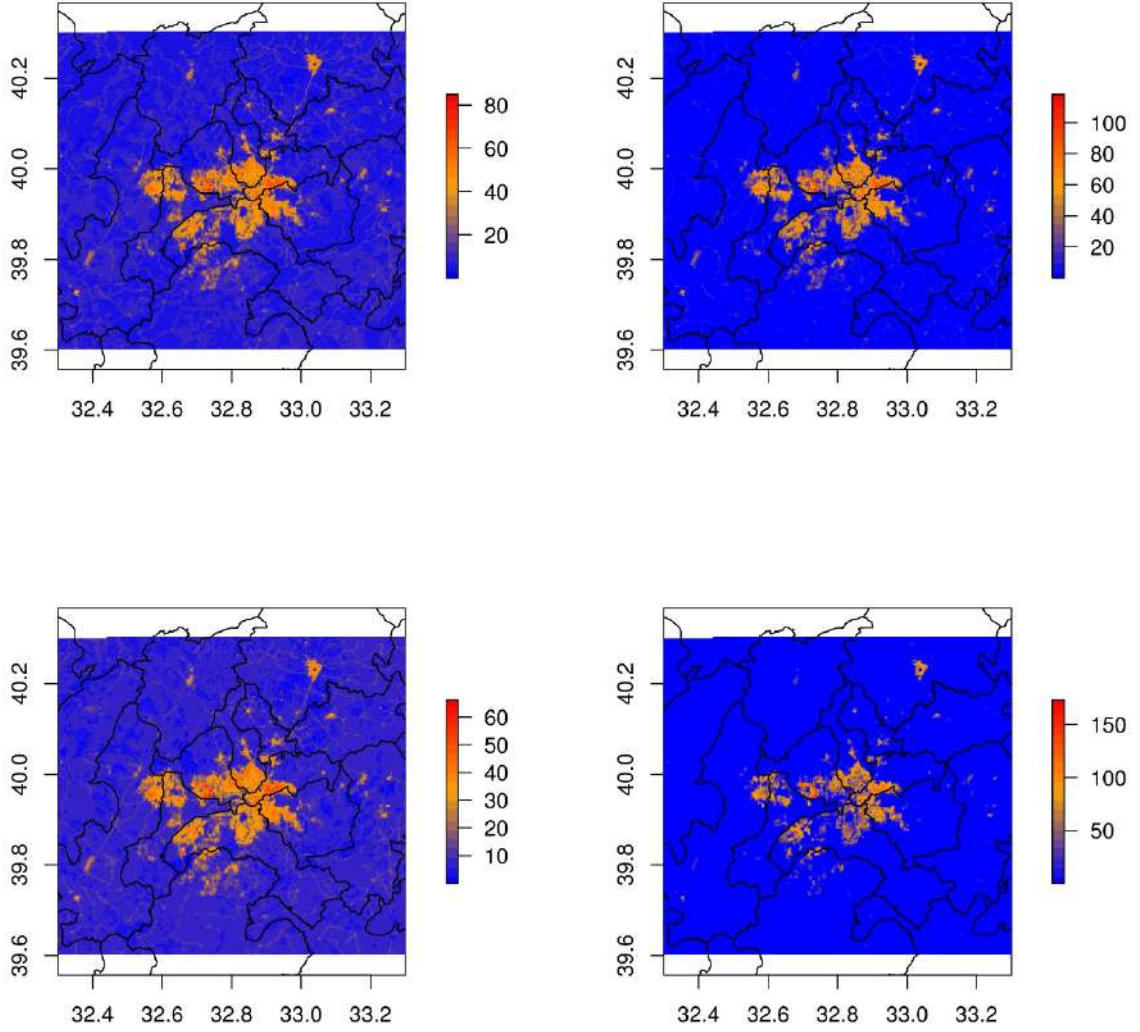


Şekil 7. Kriging ile mevsimlik ortalama değerlerin mekânsal dağılımı (Kış-İlkbahar-Yaz-Sonbahar)

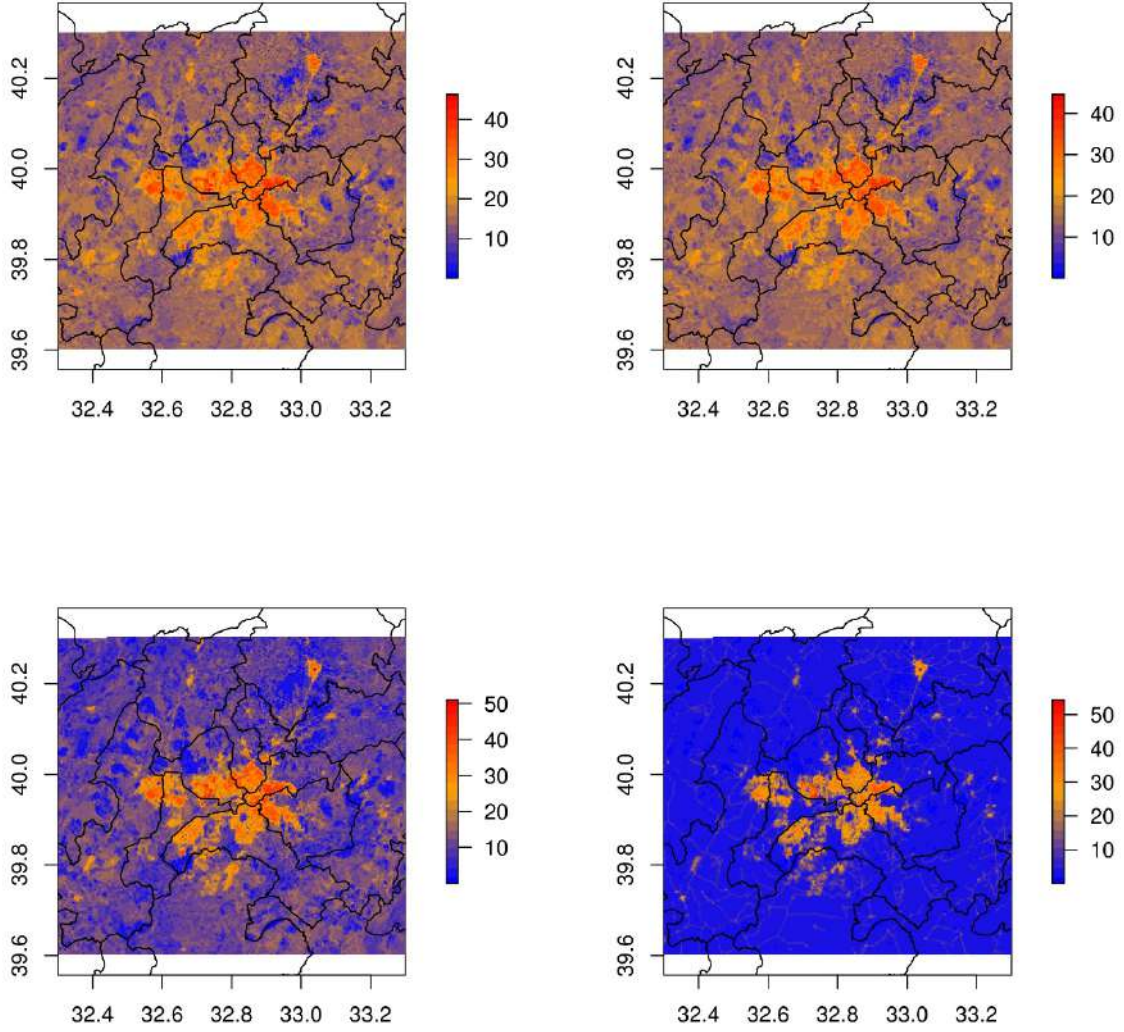
Arazi Temelli Enterpolasyon Yöntemi (ATEY)

a) ATEY Saatlik Dağılım Örnekleri

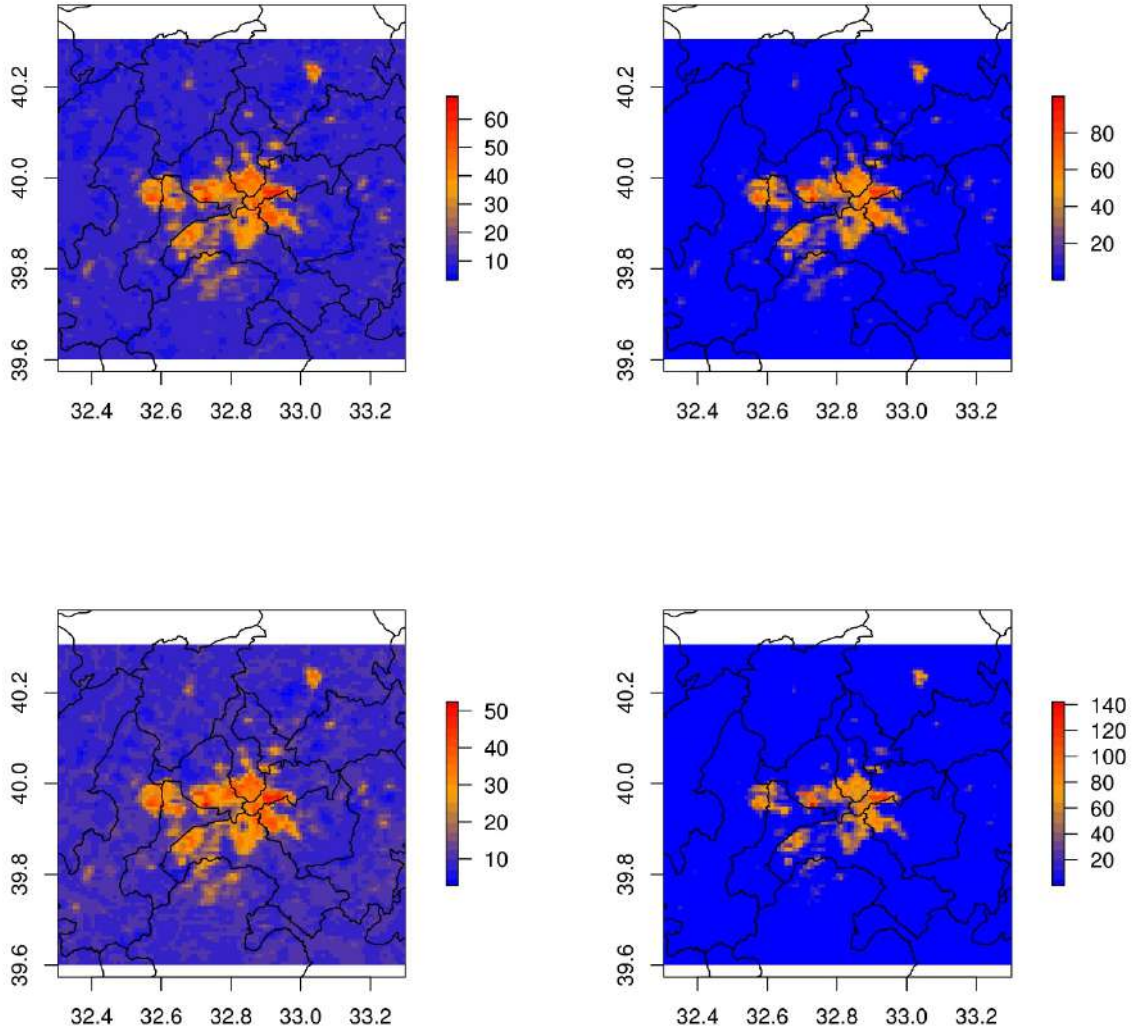
Ankara ili için tarafımızca geliştirilen arazi temelli enterpolasyon yöntemi ile yapılan saatlik analizde 1 Ocak ve 1 Temmuz 2016 günlerinde 0, 6, 12 ve 18 saatlerindeki ölçümler için uygulanmıştır.



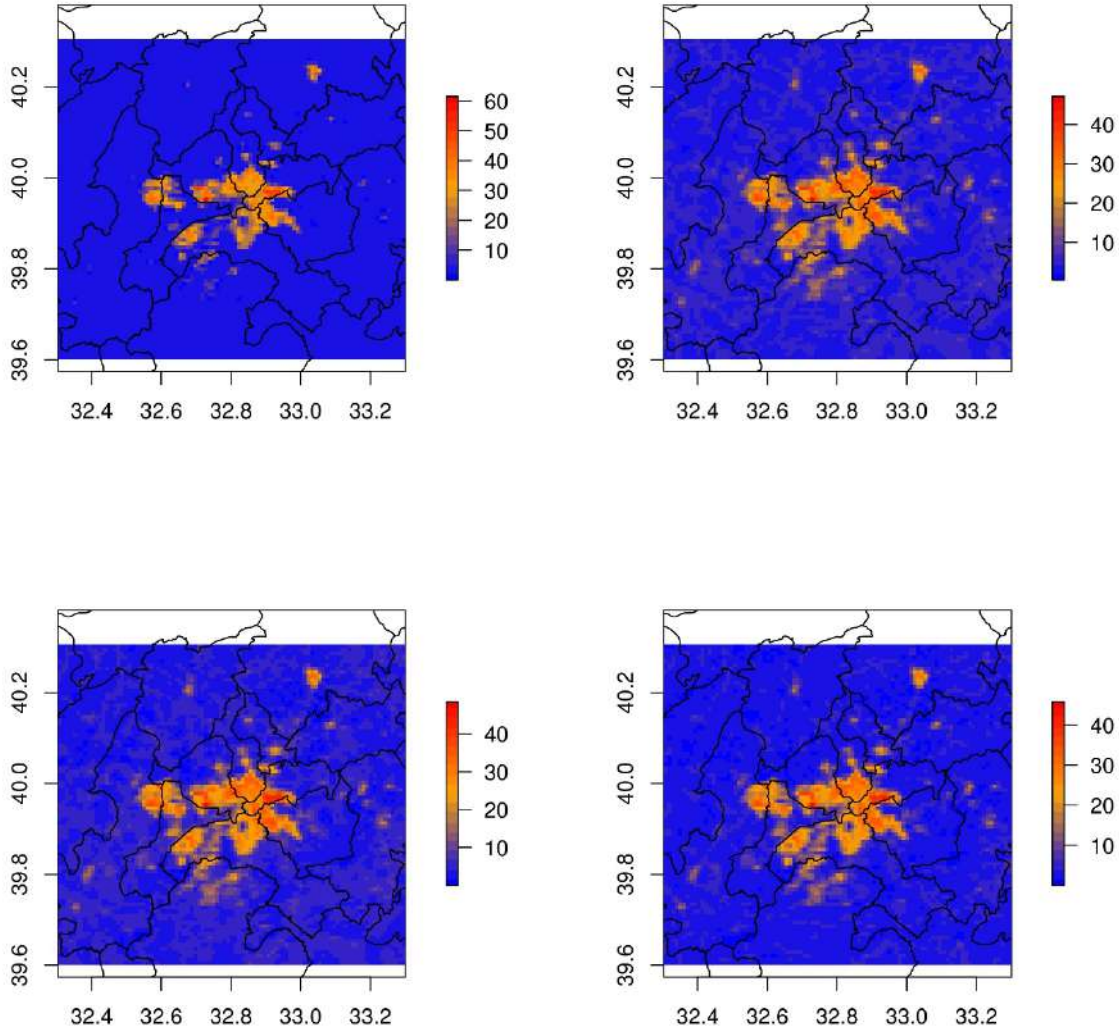
Şekil 8. 1 Ocak 2016 saatlik ATEY ile 300x300 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım örnekleri (Sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)



Şekil 9. 1 Temmuz 2016 saatlik ATEY ile 300x300 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım örnekleri (Sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)



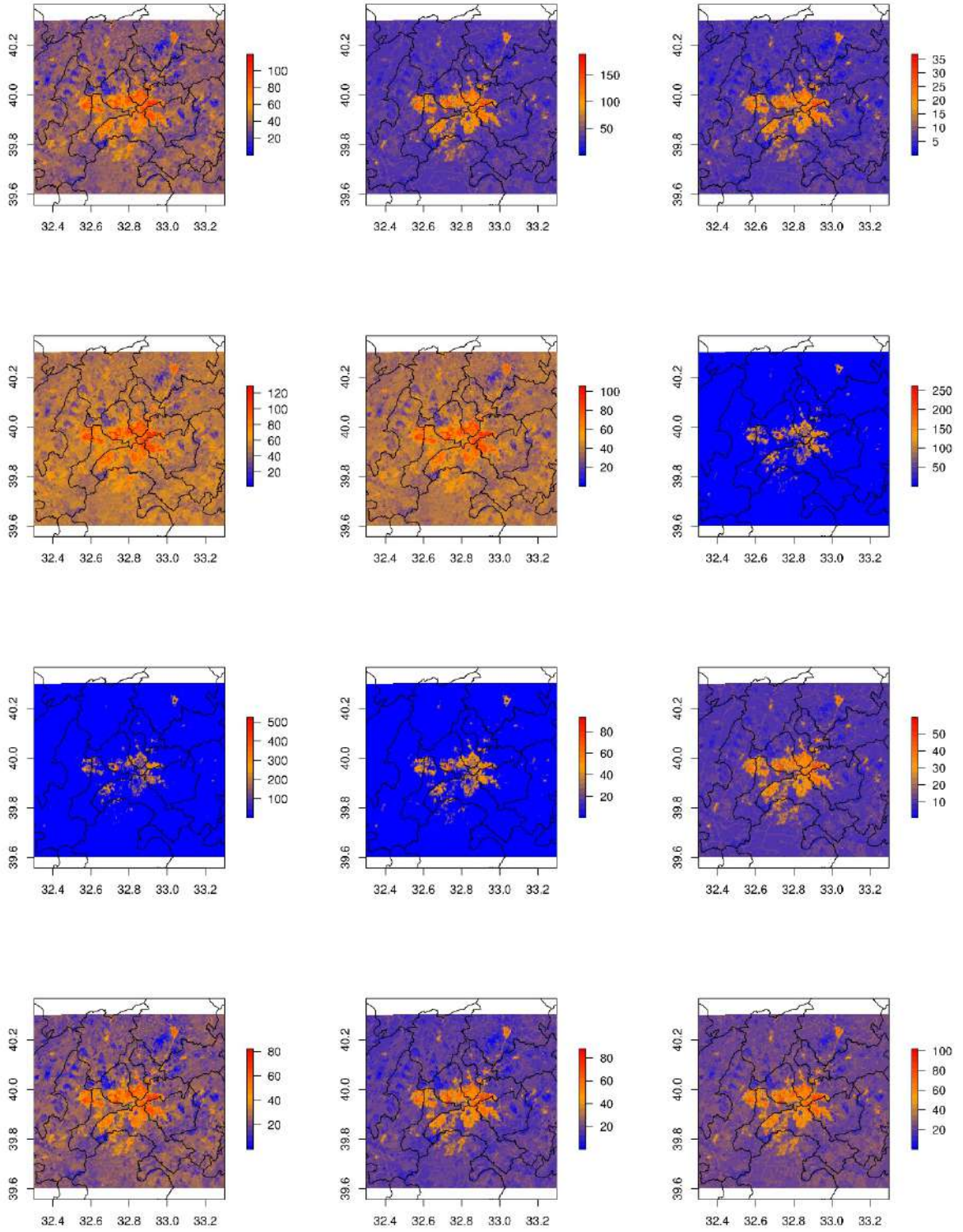
Şekil 10. 1 Ocak 2016 saatlik ATEY ile 900x900 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım örnekleri (Sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)



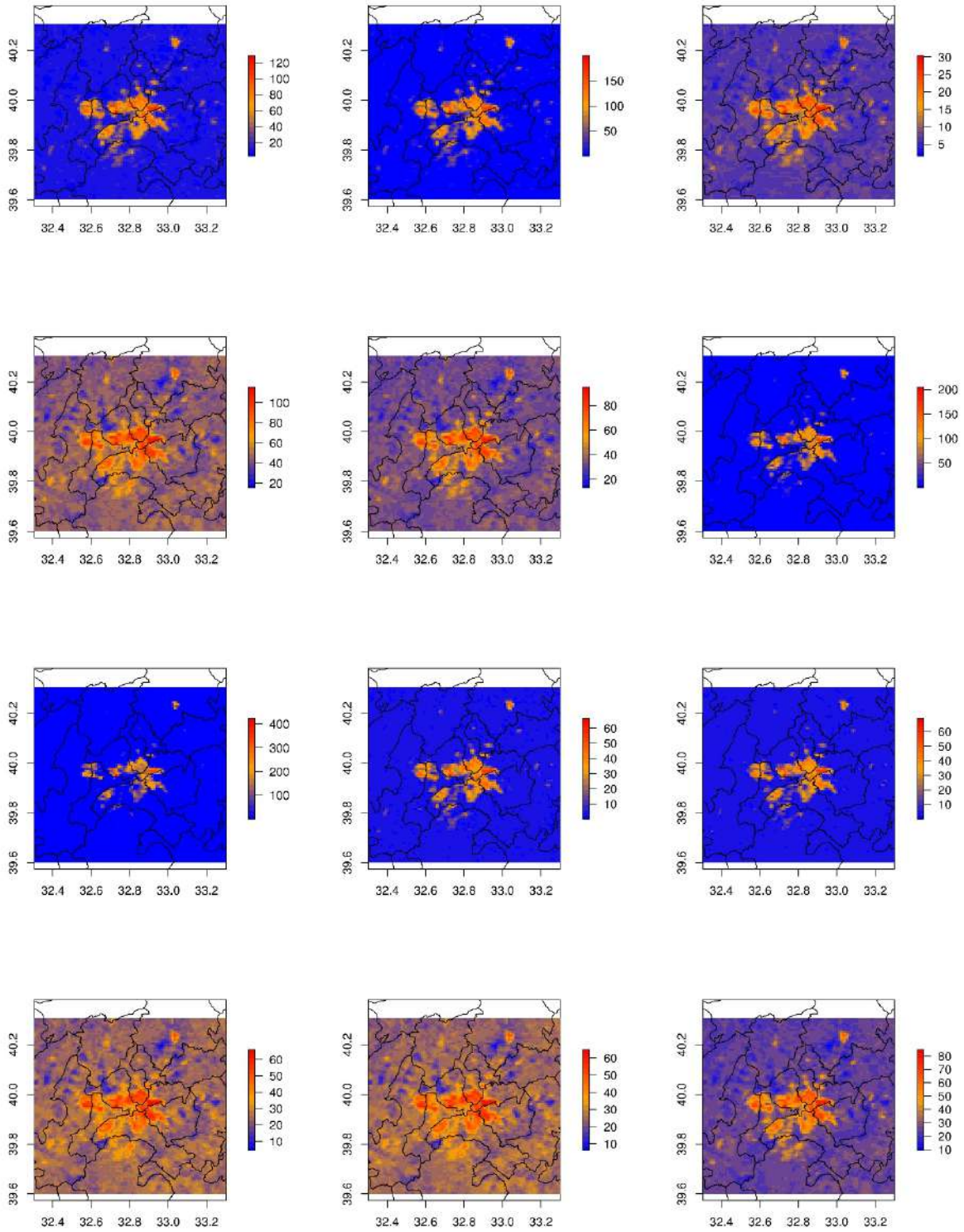
Şekil 11. 1 Temmuz 2016 saatlik ATEY ile 900x900 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım örnekleri (Sırasıyla saat 0, 6, 12, 18)

b) ATEY Günlük Dağılım Örnekleri

Arazi temelli enterpolasyon yöntemi ile 2016 yılı her ayın 15. gününün değerlendirilmesi yapılmış ve Şekil 22 ve Şekil 23'te gösterilmiştir.



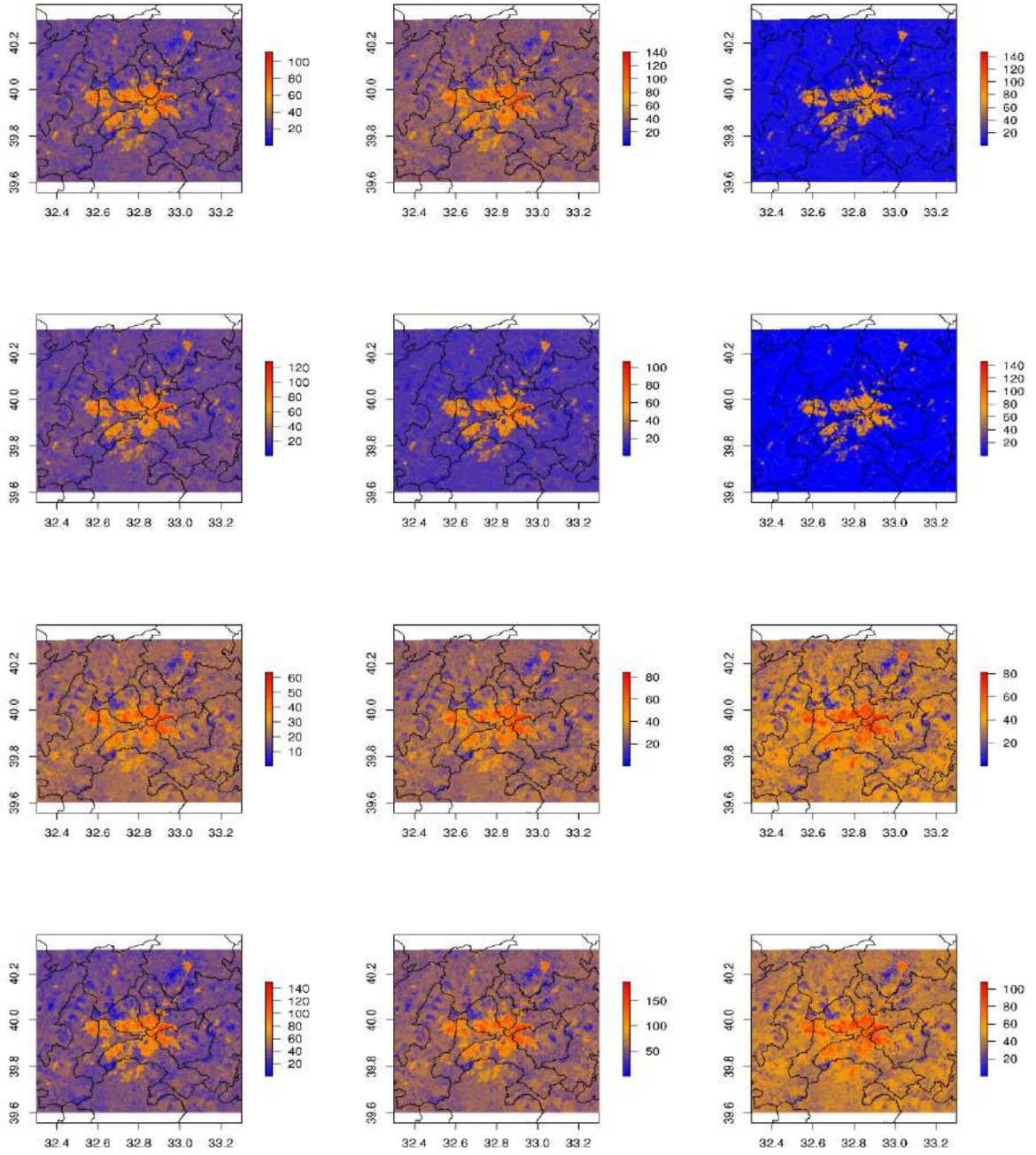
Şekil 12. ATEY ile her ayın 15. günündeki 300x300 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım (Görseller ay sırasına göre.)



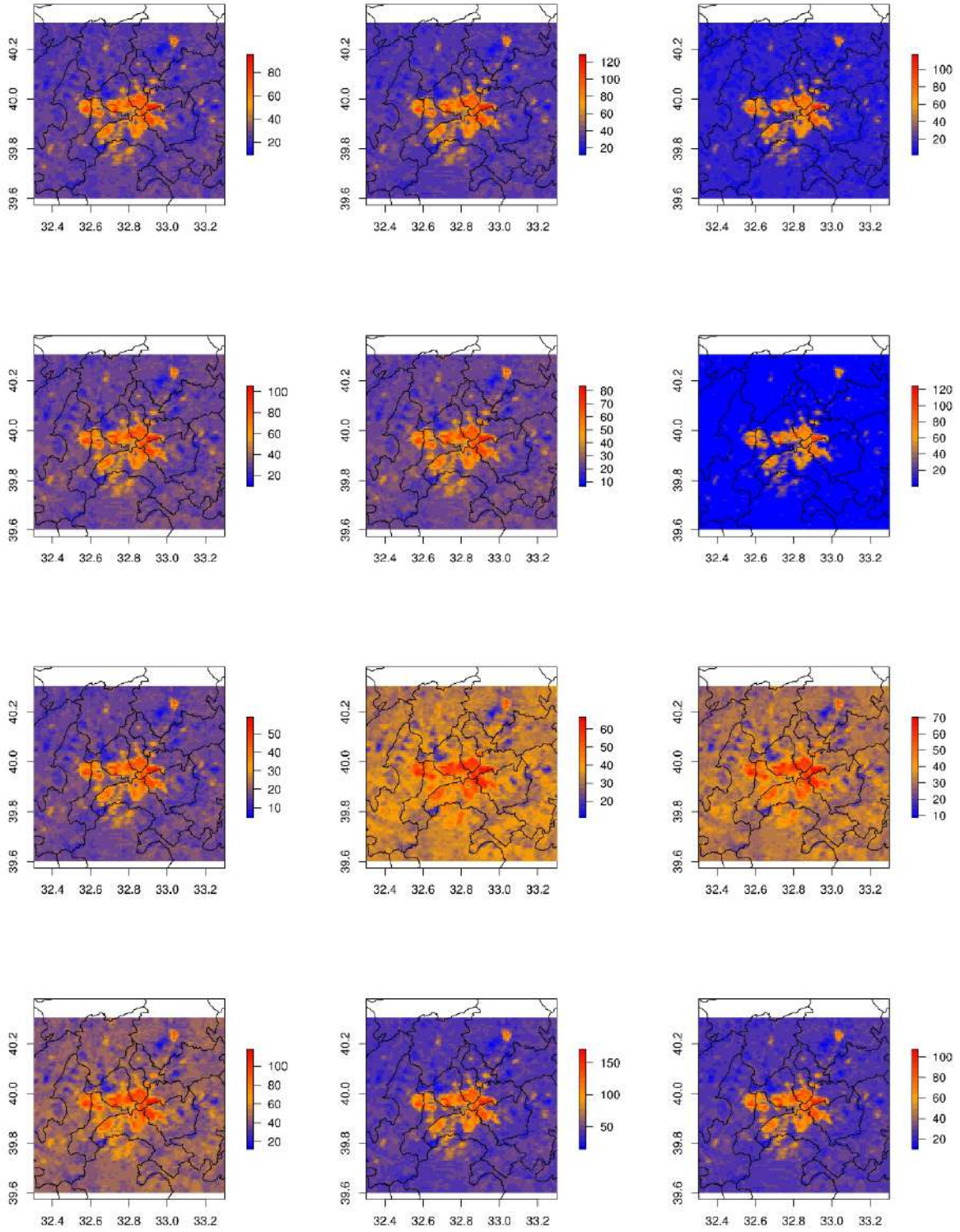
Şekil 13. ATEY ile her ayın 15. günündeki 900x900 metre çözünürlüklü mekânsal dağılım (Görseller ay sırasına göre dir.)

c) ATEY Aylık Dağılım Örnekleri

2016 yılı aylık ortalama değerleri ve ATEY yöntemi kullanılarak kirleticinin mekânsal dağılımı değerlendirilmiştir.



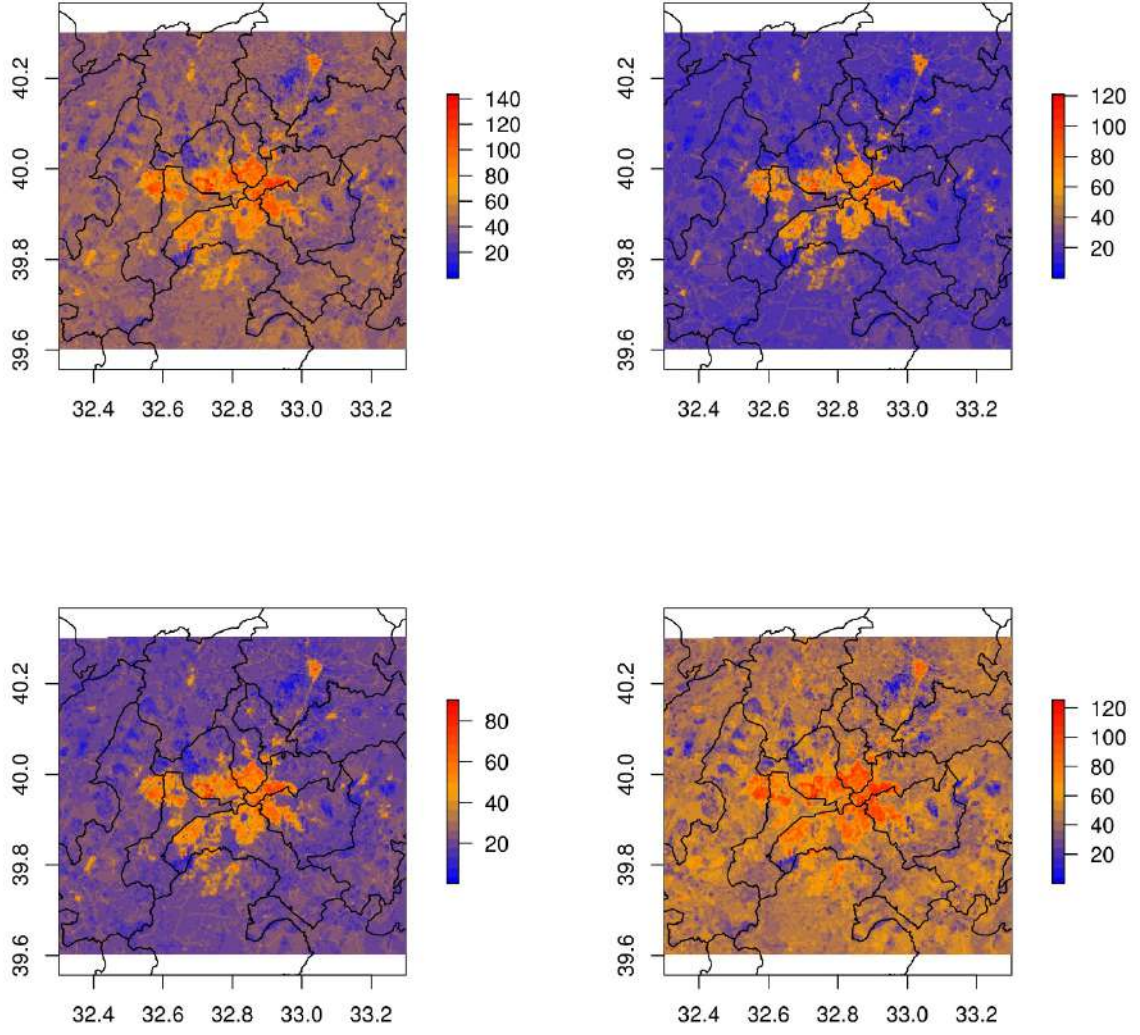
Şekil 14. ATEY ile aylık ortalama değerlerin 300x300 metre çözünürlükteki mekânsal dağılımı



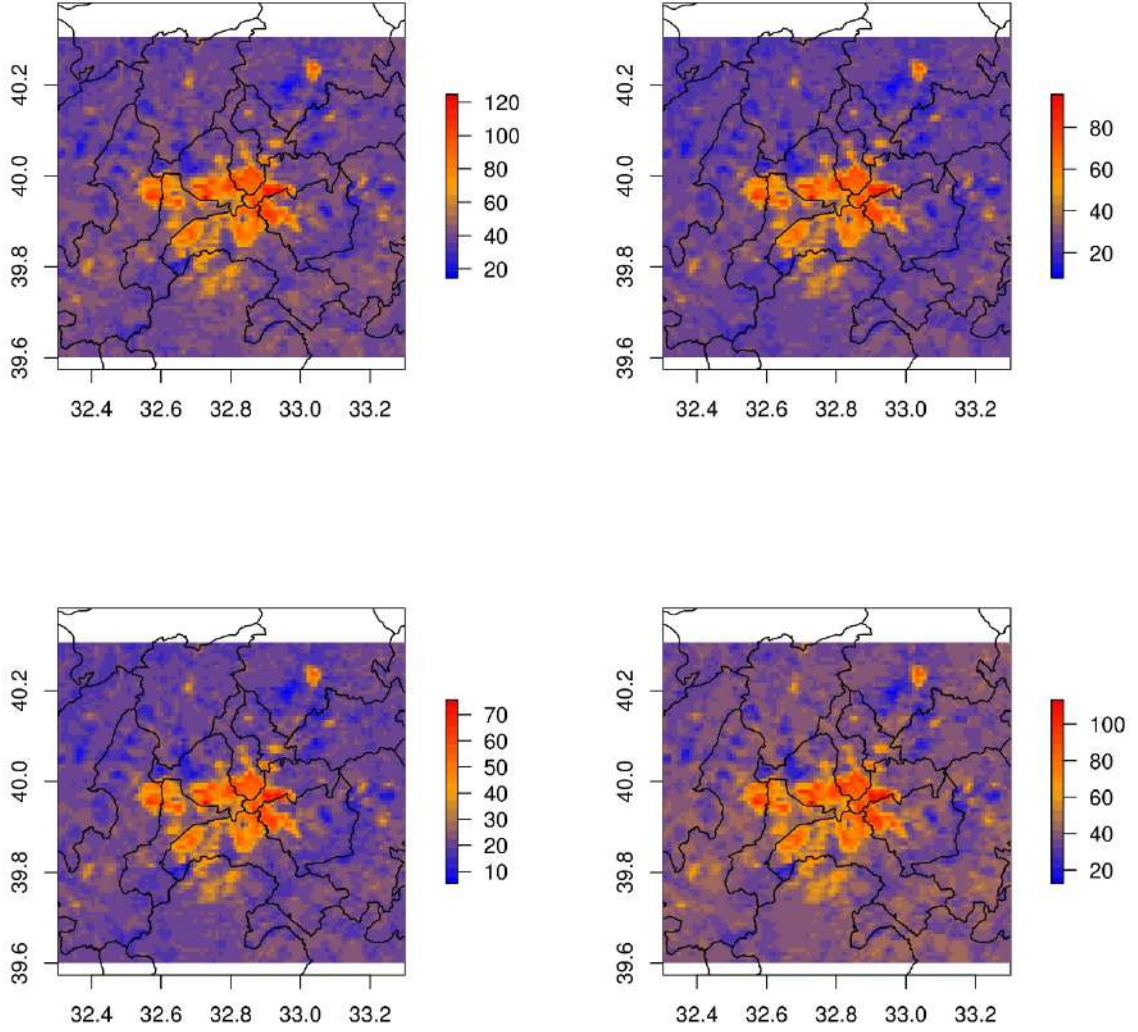
Şekil 15. ATEY ile aylık ortalama değerlerin 900x900 metre çözünürlükteki mekânsal dağılımı

d) ATEY Mevsimlik Dağılım Örnekleri

Arazi Temelli Enterpolasyon Yöntemi kullanılarak Ankara ili 2016 yılı için mevsimsel dağılım değerlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 16. ATEY ile mevsimlik ortalama değerlerin 300x300 metre çözünürlükteki mekânsal dağılımı (Kış-İlkbahar-Yaz-Sonbahar)



Şekil 17. ATEY ile mevsimlik ortalama değerlerin 900x900 metre çözünürlükteki mekânsal dağılımı (Kış-İlkbahar-Yaz-Sonbahar)

Uygulanan Yöntemlerin Karşılaştırılması

Bu dönem için hazırlanan raporda ölçümlerden yola çıkılarak kirleticilerin alansal dağılımı değerlendirildi. Geoistatistik yöntemler kullanarak istasyon olmayan noktalarda kirletici tahmini yapmaya çalışılmıştır. Temel geoistatistik yöntemler olan ters mesafe ağırlıklı (IDW) enterpolasyon ve Kriging enterpolasyon çalıştırılmıştır. Bu yöntemler ölçülen değerlere bağlı sonuç üretmektedir. IDW performansı ölçüm noktasının sıklığı ile doğru orantılı olup, ölçümlerin en küçük ve en düşük değerlerinin dışına çıkmaz. Ölçüm istasyonların şehir içi ve yerleşimin yüksek oranda olduğu noktalarda kurulmasından dolayı şehirleşmenin az olduğu noktaların tahmin performansı düşer. Kriging yöntemini çalıştırmak için ölçüm değerleri ve konumları arasında ilişki bulmaya çalışır, bir ilişki bulmadığında, IDW gibi davranır.

Yöntemlerin performansını görebilmek için 2010-2016 ölçüm değerleri IDW ve Kriging ve arazi temelli enterpolasyon yöntemleri kullanılarak saatlik, günlük, aylık ve mevsimlik veriler üzerinde enterpolasyon uygulanıp haritalar oluşturulmuştur. Analiz sonucu, sadece ölçümden yola çıkılarak alansal dağılım yapan yöntemler, alandaki farklı yüzey kullanım bilgisini içermediğinden, ölçüm noktalarından uzaklaştıkça doğruluk oranı düşmektedir. Bizim önerdiğimiz ve üzerinde çalıştığımız

yöntem ise arazi durum bilgisi uydu görüntüleri (2014 22 Mart NDVI, vejetasyon indisi) ve yol haritalarından oluşturulmuştur.

Tablo 1. 300 ve 900 m yatay çözünürlük için model sonuçları

İstasyon Adı	Enlem	Boylam	PM10	Çözünürlük 300			Çözünürlük 900		
				Şehirleşme	NDVI	Tahmini PM10	Şehirleşme	NDVI	Tahmini PM10
Bahçelievler	39,9181	32,8228	107	413	0,12	98	3184	0,08	97
Cebeci	39,9369	32,8781	75	326	0,09	90	4242	0,08	114
Demeteler	39,9675	32,7956	124	350	0,14	86	4109	0,07	113
Dikmen	39,8964	32,8406	86	142	0,11	62	2203	0,10	80
Kayaş	39,9253	32,9267	101	472	0,09	110	2260	0,10	81
Keçiören	39,9672	32,8628	57	496	0,11	110	3838	0,10	104
Sıhhiye	39,9272	32,8592	112	540	0,07	122	2786	0,07	94
Sincan	39,9719	32,585	79	337	0,10	91	4133	0,08	112
Senaryoda alınan değerler	min.	6	0	0,30	14	0	0,30	8	
	ortalama	93	380	0,20	81	3344	0,20	76	
	mak.	186	800	0,05	161	6000	0,05	145	

Tablo 2. 1.1.2016 saat 00:00 model sonuçları

1.01.2016 00:00					
	Ölçüm	IDW	KRIGING	Bizim 300	Bizim 900
Cebeci	40	41,15	42,05	38,91	30,92
Demeteler	32	37,22	38,38	30,24	33,17
Çubuk		39,61	38,61	27,51	27,11
Esenboğa		39,41	38,61	20,81	35,52
Hacımuratlı		36,14	38,61	25,77	60,85
Akçaali		40,10	38,61	36,82	73,37

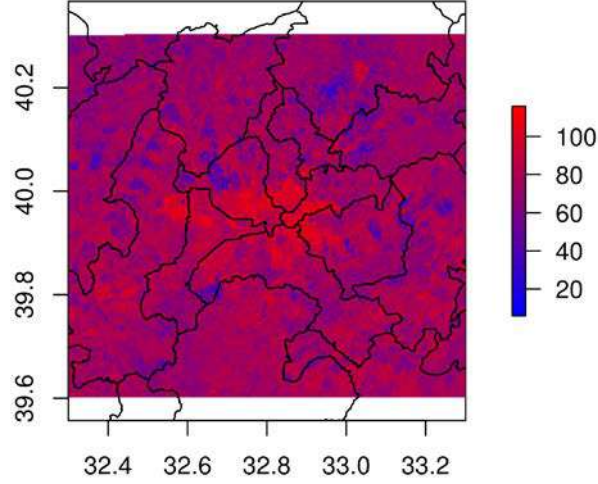
Tablo 3. 15.02.2016 Günlük Ortalama model sonuçları

15.02.2016 Günlük Ortalama					
	Ölçüm	IDW	KRIGING	Bizim 300	Bizim 900
Cebeci	118,21	88,58	84,12	78,92	113,34
Demeteler	136,78	78,62	83,18	75,08	110,47
Çubuk		81,92	83,37	45,18	86,50
Esenboğa		82,28	83,37	21,61	10,68
Hacımuratlı		80,56	83,37	27,58	16,33
Akçaali		79,48	83,37	34,46	15,61

Tablo 4. 15.03.2016 Günlük Ortalama model sonuçları

15.03.2016 Günlük Ortalama					
	Ölçüm	IDW	KRIGING	Bizim 300	Bizim 900
Cebeci	15,75	23,28	20,77	18,32	25,77
Demeteler	14,67	19,69	17,87	17,30	25,27
Çubuk		18,82	17,97	10,43	19,82
Esenboğa		18,86	17,97	4,94	3,96
Hacımuratlı		18,87	17,97	6,38	6,43
Akçaali		18,87	17,97	8,13	6,89

Elde edilen bu katsayılar neticesinde PM10 için mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur.



Şekil 18. PM10 için mekânsal dağılım haritası (Konut + NDV)

Ölçüm yapılmayan alanlarda kirlilik düzeyinin belirlenmesi için kurulu bulunan istasyonların ölçüm sonuçları referans alınarak ölçüm yapılmayan noktalarda kirliliğin kümelenmesi ve düzeyinin belirlenmesine yönelik analiz yöntemleri çalıştırılmıştır. Ölçüm yapılmayan alanlarda belirlenen sanal noktalarda sonuçlar tahmin edilmiştir. Tahmin noktalarında yapılacak mobil ölçümler bu kapsamda çalıştırılan model programının geliştirilmesine katkı sağlar. Mevcut istasyon yerlerindeki sanal tahminlerin kontrolü ile ölçüm yapılmayan noktalarda hava kalitesi düzeylerinin saatlik ve günlük olarak belirlenmesi mümkün olmaktadır. Sunulan model sürekli geliştirilmeye müsait durumdadır.

Teşekkür: Çalışmada katkılarından dolayı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Kuzey İç Anadolu Temiz Hava Merkezine, ürünlerini kullandığımız openstreetmap, LANDSAT ve R/Rstudio'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Toros H., Geertsema G., Cats G., Incecik S., 2011, Analysis of HIRLAM NWP Model During an Air Pollution Episode in Istanbul in 2009, Air Pollution Modeling and its Application XXI, 119--123, ISBN:978-94-007-1358-1, DOI 10.1007/978-94-007-1359-8_21, Springer Netherlands.
- [2] Baklanov, A., Korsholm, U., Mahura, A., Petersen, C., and Gross, A., 2008, ENVIRO-HIRLAM: On-line Coupled Modelling of Urban Meteorology and Air Pollution, Advances in Science and Research, 2, 41-46.
- [3] Jerrett, M., et. al, 2005, A Review and Evaluation of Intraurban Air Pollution Exposure Models, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 15, 185–204.
- [4] Beelen, R., Voogt, M., Duyzer, J., Zandveld, P., and Hoek, G., 2010, Comparison of the Performances of Land Use Regression Modelling and Dispersion Modelling in Estimating Small-Scale Variations in Long-Term Air Pollution Concentrations in a Dutch urban area, Atmospheric Environment 44, 4614-4621.
- [5] Beelen, R., et al, 2013, Development of NO2 and NOx Land Use Regression Models for Estimating Air Pollution Exposure in 36 Study Areas in Europe, Atmospheric Environment, 72, 10-23.
- [6] Shad, R., Ashoori, H., and Afshari, N., 2008, Evaluation of Optimum Methods for Predicting Pollution Concentration in GIS Environment, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B2. Beijing.
- [7] Merbitz, H., Buttstädt, M., Michael, S., Dott, W., and Schneider, C., 2012, GIS-Based Identification of Spatial Variables Enhancing Heat And Poor Air Quality in Urban Areas, Applied Geography 33, 94-106.
- [8] Beelen, R., Hoek, G., Pebesma, E., Vienneau, D., Hoogh, K., and Briggs D, J., 2009, Mapping of Background Air Pollution at a Fine Spatial Scale Across the European Union, Science Of The Total Environment, 407, 1852-1867.

- [9] Janssen, S., Dumont, G., Fierens, F., and Mensink, C., 2008, Spatial interpolation of Air Pollution Measurements Using CORINE Land Cover Data, *Atmospheric Environment*, 42, 4884–4903.
- [10] Jef, H., Clemens, M., Gerwin, D., and Fran, F., 2006, Spatial Interpolation of Ambient Ozone Concentrations From Sparse Monitoring Points in Belgium, *Journal of Environmental Monitoring*, 8, 1129-1135.
- [11] Matejcek, L., 2014, Using Geostatistical Tools for Mapping Traffic Related Air Pollution in Urban Areas, *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 7th Intl. Congress on Env. Modelling and Software*, San Diego, CA, USA.
- [12] Leelossy, A., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, A., Lagzi, I., and Mészáros, R., 2014, Dispersion Modelling of Air Pollutants in The Atmosphere: A Review, *Central European Journal of Geosciences*, 6(3), 257-278.
- [13] Hoogh, k., et al, 2014, Comparing Land Use Regression And Dispersion Modelling to Assess Residential Exposure to Ambient Air Pollution for Epidemiological Studies, *Environment International*, 73, 382–392.
- [14] Hoek, G., Beelen, R., Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., and Briggs, D., 2008, A Review of Land-Use Regression Models to Assess Spatial Variation of Outdoor Air Pollution, *Atmospheric Environment*, 42, 7561–7578.
- [15] Enkhtur, B., 2013, Geostatistical Modelling And Mapping of Air Pollution, web sayfası: https://www.itc.nl/library/papers_2013/msc/gfm/enkhtur.pdf.
- [16] Akyürek, Ö., Arslan, O., Karademir, A., 2013, SO₂ ve PM₁₀ hava kirliliği parametrelerinin CBS ile konumsal analizi: kocaeli örneği, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara.
- [17] Toros, H., and Bağış, S., 2017, Hava Kirlilik Modellerinde Kullanılacak Emisyon Envanteri Oluşturulması için Yaklaşımlar ve İstanbul Hava Kirliliği Dağılımı Örneği, *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 32(2), 1-12.