

Coğrafi Sosyo-Ekonomik Mahrumiyetin ve Hava Kirleticilerinin Bebek Doğum Ağırlığı Üzerindeki Etkisi

Impacts of Geospatial Socio-Economic Deprivation and Air Pollutants on Infant Birth Weight

Nur H. ORAK¹ 

¹*Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye*

Öz

Klasik çevresel sağlık risk tahmin yöntemleri, insan-çevre sistemlerinin döngüsellğine çözüm getirmede ve çevresel kirleticici değişkenlerinin insan sağlığı üzerindeki olası etkilerinin incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada Bayesian yöntemleri kullanarak nitrojen dioksit (NO₂) maruziyeti, partikül madde (PM), sosyoekonomik mahrumiyet ve bebek doğum ağırlığı arasındaki ilişkinin New York şehri örneği üzerinde araştırılması hedeflenmiştir. Epidemiyolojide NO₂ ve PM_{2.5} maruziyetinin olası karıştırıcı etkenler (ör. vücut kitle indeksi) üzerindeki etkilerini göz önüne alabilmek için, ve NO₂, PM_{2.5} ve değişkenlerin (ör. sosyoekonomik mahrumiyet) teorik etkileri arasında iki yönlü ilişkinin incelenmesi için Bayesian Ağ (BA) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen PM-NO₂-BA etki modeli ile farklı türdeki bilgileri biraraya getirerek risk analizi gerçekleştirilmiştir. Bu makalede sunulan modelleme yaklaşımı halk sağlığına etki eden risk faktörleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin değerlendirilmesi konusunda önemli katkıda bulunacaktır. Düşük Vücut Kitle İndeksine (VKI) sahip annelerin hava kirleticilerine maruziyeti ve buna bağlı olarak bebek doğum ağırlığı riskinin etkilendiği gözlenmiştir. Normal VKI'ne sahip annenin yüksek NO₂ konsantrasyonuna maruziyeti sonucunda düşük doğum riski %7 iken düşük VKI'ne sahip annenin yüksek NO₂ kirliliğine maruz kalması sonucunda bu risk %36'ya çıkmaktadır. Farklı sosyo-ekonomik mahrumiyet indeksine (SMI) ait vakalar kirleticilere maruziyet sonucunda farklı risklerle karşılaşmaktadır. NO₂ maruziyetine benzer olarak PM_{2.5} maruziyeti düşük SMI'da yüksek risk (%27) oluştururken daha yüksek indekse sahip grupta bu riskin azaldığı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel istatistik, risk analizi, maruziyet-sağlık ilişkisi, halk sağlığı, hava kirliliği, sosyoekonomik mahrumiyet

Abstract

Conventional environmental health risk estimation methods are insufficient to solve the cyclicity of human-environmental systems and to examine the possible effects of environmental pollutant variables on human health. In this study, it is aimed to investigate the relationship between nitrogen dioxide (NO₂) exposure, particulate matter (PM) exposure, socioeconomic deprivation and infant birth weight by using Bayesian methods on the New York City example. In order to consider the effects of NO₂ and PM_{2.5} exposure on possible confounding factors in epidemiology, and to investigate the two-way relationship between theoretical effects of NO₂, PM_{2.5} and variables (e.g. socioeconomic deprivation), Bayesian Network (BN) model has been developed. Risk analysis was carried out by combining different types of information based on literature knowledge and data. The proposed modeling approach presented in this article will make a significant contribution to assessing the nonlinear relationship between risk factors affecting public health. It was observed that mothers with Low Body Mass Index (BMI) were exposed to air pollutants and consequently the risk of infant birth weight was affected. While the risk of low birth is 7% as a result of exposure to high NO₂ concentration of the mother with normal BMI, this risk increases to 36% as a result of the exposure of the mother with low BMI to high NO₂ pollution. Cases of different socio-economic deprivation index (SMI) face different risks as a result of exposure to pollutants. Similar to NO₂ exposure, PM_{2.5} exposure poses a high risk (27%) in low SMI, whereas this risk decreases in the higher index group.

Keywords: Environmental statistics environmental risk analysis, exposure-health relationship, public health, air pollution, socioeconomic deprivation

I. GİRİŞ

Çevresel sağlık araştırmalarında sosyo-ekonomik etkenlerin ve çevresel kirleticilere maruziyetin entegre edilme ihtiyacı uzun süredir bilinmektedir [1, 2]. Aynı zamanda günümüzde gebelik sürecinde hava kirleticilerine maruziyetin olumsuz etkilerini inceleyen araştırma sayısı artmaktadır [3]. Birçok literatür çalışması hava kirliliğinin doğum sürecini ve sonuçlarını olumsuz etkilediğini, buna sebep olan biyolojik mekanizmayı ve sistematik oksidatif stres etkenlerini ortaya koymaktadır [4]. Ancak az sayıda çalışma bu korelasyon ile ilişkili sosyo-ekonomik etkenleri incelemektedir. Bunun sebebi kirleticilere maruziyetin tahmin yöntemleri veya ölçüm hatası [5] gibi farklı ispat aşamalarında belirsizliklerin olmasıdır. Ayrıca, karıştırıcı etkenlerin analiz eksikliği de bu tutarsızlığa neden olmaktadır. Mevcut çalışmalar arasında ortak amaçlardan biri sosyo-ekonomik mahrumiyet ile coğrafi kirlenme maruziyeti arasındaki korelasyonun etkin bir şekilde incelenmesidir [6]. Bireysel sosyo-ekonomik düzeyin (SED) dikkate alındığı birçok çalışma, coğrafi mahrumiyetin hamilelik sonuçlarına olumsuz etki ettiğini göstermektedir [7]. Ancak, bu çalışmaların çok azı hava kirleticilerine maruziyetin ve gebelik gelişimi sonuçları arasındaki diferansiyel ilişkiyi sosyo-ekonomik düzlemde incelemiştir. Bu çalışma kapsamında Bayesian yöntemleri kullanılarak sosyo-ekonomik etkenler, hava kirliliği parametreleri ve doğum ağırlığı arasındaki doğrusal olmayan ilişki olasılıksal olarak incelenmiştir.

Hızlı ve düzensiz şehirleşme hava kirleticileri ile insan sağlığı arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin incelenmesini kritik hale getirmiştir. Tıp ve çevre bilimlerinin uyguladığı yöntemler sınırlı olmakla birlikte, çevresel boyutun analizinde yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada örnek bir durum üzerinden çevresel ve sağlıksal etkenleri entegre edecek istatistiksel bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Hava kirleticilerinin halk sağlığı üzerinde uzun süreli kritik etkileri bulunmaktadır. Bu risk ile ilişkili etkilerin en aza indirgenmesi için öncelikle oluşma sürecinin ve etkenler arasındaki korelasyonun tespiti gerekmektedir. Sosyo-ekonomik düzeyin tanımlanması ve hesaplanmasında birçok farklı görüş bulunmaktadır. Temel etkenler arasında ırk, eğitim seviyesi ve gelir düzeyi sayılabilir. Ancak her çalışmada SED'ye etki eden değişkenler farklıdır, bu nedenle fikir birliği sağlayacak bir tespit metodu önermek bugüne kadar mümkün olmamıştır. SED değişkenlerinin önemi ve risk oluşumuna katkısı senaryo bazında değişmektedir. Bu problem holistik bir yaklaşımın gerekliliğini göstermektedir.

Çevre sağlığı araştırmalarında kimyasal ve kimyasal olmayan etkenlerin insan sağlığı üzerine olan birleşik etkisine olan ilgi uzun bir süredir artmaktadır [1, 2, 8, 9]. Yeni

araştırma sonuçları kronik psikososyal stresin, kirleticilerin insan sağlığı üzerine etkisini modifiye eden bir etken olduğunu bir takım epidemiyolojik ve toksikolojik kanıtlar ile ortaya koymaktadır [10, 11]. Araştırmacıların sosyal ve fiziksel çevre arasındaki ilişkiyi anlayabilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Psikososyal stres genel olarak sosyal stres faktörlerine (olay, durum, fiziksel veya psikolojik bir etken ile karşılaşılması) maruziyet sonucu gelişir. Bireylerin kaldırabileceğinin ötesinde stres faktörüne düzenli olarak maruz kalması sonucunda stres kronik hale gelir. Kronik psikososyal stres olumsuz duygu durumları ile ilişkilidir, bu durum immün, endokrin, ve metabolik fonksiyonlara etki eder [12]. Bu fizyolojik değişimler bireylerin kimyasal maruziyetlere (örn. kirleticiler, patojenler) olan tepkisine etki edebilir ve bu grupların birçok hastalığa olan maruziyet riskini artırabilir [13]. Bunun bir sonucu, kronik olarak sosyal stres faktörlerine maruz kalan birey ve toplumlar çevresel kirleticilerin olumsuz sağlık etkilerine daha hassas olabilir [14]. Stres faktörlerinin ölçümü öncelikli olarak bireysel anketlere veya stresli olayların tahmini için kullanılan biomarker verisine [14], stres oluşumuna sebep olabilecek durumlara [15], ve akıl sağlığına etki eden kronik stres faktörlerine bağlıdır [16].

Kronik psikososyal stresin değerlendirilmesine odaklanan birçok epidemiyolojik çalışma bireysel seviyede stresi ölçemediğinden toplumsal indikatörleri kullanmaktadır (suç oranı, fakirlik seviyesi, muhit güvenliği, finansal stres gibi). Ancak her bireyin toplumsal stres faktörlerine karşı vereceği tepki farklıdır. Sosyal ve çevresel etkenlerin birleşik sonuçlarını inceleyen birçok epidemiyolojik çalışma SED ve demografik ölçümleri kullanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak SED indikatörlerinin sosyal ve psikososyal stres maruziyetini ifade etmede yeterli olması konusunda belirsizlik doğmaktadır. Çok sayıda araştırma bölgesel mahrumiyetin ve SED'in doğum sonuçlarına olumsuz etki ettiğini göstermektedir [17]. Ancak bu çalışmalardan pek azı hava kirleticilerine maruziyet ile bebek doğum ağırlığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Bu çalışmada gebelik sürecinde NO₂, partikül madde PM_{2.5} maruziyeti ve coğrafi sosyo-ekonomik mahrumiyetin bebek gelişimine etkisini incelemek için istatistiksel bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu yöntem tıbbi bilimlerde hasta durum analizinin gerçekçi bir şekilde yapılmasında kullanılabilecektir. Bu entegre yaklaşım hava kirleticilerinin ve farklı SED değişkenlerinin kümülatif etkisini değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmada test edilmesi ve cevaplanması planlanan hipotez ve soruların başlıcaları: Ayrı ayrı ve birleşik olarak NO₂ ve PM_{2.5}'in hangi konsantrasyon seviyeleri doğum

ağırlığı üzerinde en yüksek riski oluşturmaktadır, değişkenler (doğum ağırlığı, annenin eğitim seviyesi, sağlık güvencesi, gibi) ve stres faktörleri arasındaki olasılıksal ilişki nedir, hangi senaryolar en yüksek riski oluşturur, bu etkenler ile ilgili olarak hangi anne adayları grubu hamilelik sonucunda en yüksek düşük riski ile karşı karşıyadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Gebelik sürecinde NO_2 , $PM_{2.5}$ maruziyeti ve coğrafi sosyo-ekonomik mahrumiyetin bebek gelişimine etkisini incelemek için detaylı veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu araştırmanın gerçekleştirilebilmesi için ABD'deki New York Şehri örnek olarak incelenmiştir. Bu şehrin seçilmesinin nedeni gerekli veri bankasının bulunmasıdır. Bu çalışmada Shmool ve diğ. (2015) [18] tarafından raporlanan ve 2008-2010 yılları arasında dört mevsim süresince New York City Community Air Survey (NYCCAS) tarafından toplanan yüksek çözünürlüklü coğrafi hava kirliliği verisi ve 2008-2010 yılları arasında New York Şehri hastane doğum kayıtlarını ($n=243,853$) özetleyen sonuçlar kullanılarak (Tablo 1) Koşullu Olasılık Tabloları (KOT) oluşturulmuştur. Buradaki amaç mekansal mahrumiyetin tanımlanabilmesi için doğum sonuçlarıyla ilişkili coğrafi tabanlı değişkenlerin kategorize edilmesidir.

Bu çalışmada kullanılan değişkenler: doğum ağırlığı, annenin eğitim seviyesi, sağlık güvencesi durumu, ırk, annenin yaşı, doğum öncesi vücut kitle indeksi, gebelik süresince sağlık hizmeti alma durumu, toplam gerçekleştirdiği doğum sayısı, gestasyonel yaş (hafta), yıl, konutsal bölgedeki NO_2 konsantrasyonu (ppb), konutsal bölgedeki $PM_{2.5}$ konsantrasyonudur ($\mu g/m^3$).

Sosyo-ekonomik mahrumiyet indeksi (SMI) referans olarak kullanılan Shmool ve diğ. (2015) çalışmasına bağlı olarak modellenmiştir. Referans çalışmanın komposit indeksinin hesaplanmasında baz aldığı yaklaşım Messer ve diğ. (2006) [19] çalışmasında belirtilen coğrafi tabanlı mahrumiyet indeksi hesabıdır. Bu indeksinin amacı şehrin farklı bölgelerindeki heterojen paternleri yeni bir jeostatistik yaklaşım ile kategorize etmektir.

Bayesian modelleri GeNIe (Graphical Network Interface) programı ile geliştirilmiştir. GeNIe son yirmi yılda geliştirilen Bayesian tabanlı bir network programıdır [20]. Bayesian Ağları 1980'lerin sonlarında değişkenler arasındaki olasılık ilişkisini anlamak için olasılıklı bağımlılık modellerini yönlendirilmiş asiklik grafiklerle (DAG) görselleştirmek için geliştirilmiştir [21, 22]. BA'lar güçlü karar verme araçlarıdır ve diğer modelleme yaklaşımlarına kıyasla nispeten basittir [23]. Değişkenler arasındaki

bağlantıların karakterizasyonu, hem nicel hem de nitel bilgilerin kullanılmasına izin verecek şekilde deterministikten ziyade, tipik olarak olasılıksaldır. KOT'lar üst hücrelerdeki olası her bir durum kombinasyonu için alt hücredeki her olası durumun olasılığını verir. Bayes kuralı (Denk. 1) ağdaki her bir düğümün inanç olasılığını sürekli olarak günceller [24]:

$$p(X = x|Y = y) = \frac{p(X = x, Y = y)}{p(Y = y)} = \frac{p(X = x)p(Y = y|X = x)}{\sum_{x'} p(X = x')p(Y = y|X = x')} \quad (1)$$

Burada X olasılığını hesaplamak istediğimiz olay, Y ise X ile ilgili olan yeni kanıtlardır. İncelenen senaryoda X ve Y'nin aldığı değerler x ve y olarak belirtilmiştir. $p(X|Y)$ posterior olarak adlandırılır, bu bizim tahmin etmeye çalıştığımız koşullu değerdir. $p(Y|X)$ ilk hipotezimizi gözönüne aldığımızda yeni kanıtların gözlenme olasılığıdır. İlk olarak konsept model oluşturulmuştur. Konsept model iki önemli aşamadan oluşmaktadır: ağ değişkenlerinin belirlenmesi ve bu değişkenleri kullanarak model iskeletinin (etki diagramı) oluşturulması. Bayesian Ağ Modelleri sebep-sonuç ilişkisini etki diagramları üzerinden tanımladığı için bu aşama model oluşturma sürecinin önemli bir aşamasıdır. Konsept model oluşturma konusunda birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım uzman görüşü ile veri kaynaklı elde edilen bilginin birleştirilmesidir. Buna hibrid model de denilebilir. Veri kaynaklı etkileşim bilgilerinin elde edilmesi konusunda birçok farklı algoritma kullanılmıştır. Bunlar arasında Bayesian Search, PC, Essential Graph Search, Greedy Thick Thinning, Tree Augmented Naive Bayes (TAN), Augmented Naive Bayes, ve Naive Bayes bulunmaktadır. Modelin bu aşamasında birçok iterasyon adımı gerçekleştirilmiştir.

Etki diagramı oluşturulduktan sonra Bayesian Ağ modeli içindeki her bir hücre için KOT'lar referans çalışmaya göre tahmin edilir, başka bir deyişle BA modelindeki her bir hücre için gerekli olan koşullu olasılık tabloları veri kaynaklı öğrenilir. Model tamamlandıktan sonra Şekil 1'de örneklendirildiği şekilde BA modeli oluşturulmuş olur. Bu model ile çeşitli senaryolar incelenerek doğum ağırlığı üzerindeki kümülatif etkisi incelenmiştir. Kirletici konsantrasyonlarının farklı risk faktörleri ile biraraya gelerek oluşturduğu doğum ağırlığı riski incelenmiştir. Bu sayede düşük yapma riski yüksek olan anne adaylarının dahil olduğu grup olasılıksal olarak belirlenmiştir.

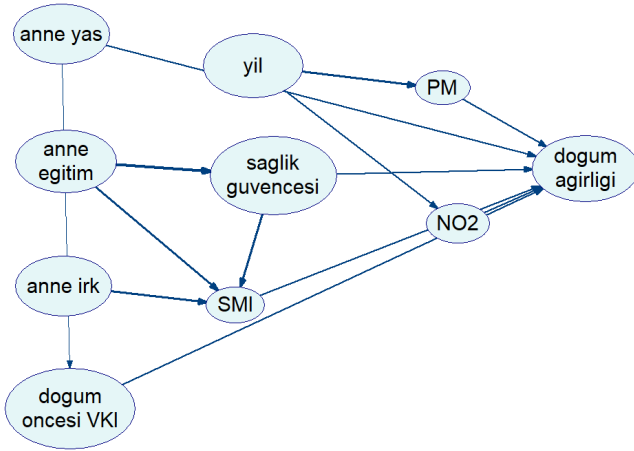
Tablo 1. Popülasyon karakteristikleri (Shmool ve diğ. 2015 [18] çalışmasından uyarlanmıştır). Parantez içindeki değerler ilgili kategorideki hasta sayısıdır.

	Çalışma popülasyon n=243,853
Doğum ağırlığı (g)	% (n)
<1500	0,04 (88)
1500-2499	2,6 (6402)
2500-3999	90,3 (220,156)
4000	7,1 (17,207)
Anne eğitim düzeyi (yıl)	% (n)
<9	8,1 (19731)
9-11	17,6 (42819)
12 (lise)	23,9 (58286)
13-15	21,9 (53376)
16 (lisans)	16,3 (39793)
>16	12,2 (29857)
Sosyal güvence	
Evet	61,1 (149106)
Hayır	38,9 (94,747)
Anne ırk	
ABD doğumlu – beyaz	19,4 (47233)
Yabancı-beyaz	9,4 (22912)
ABD doğumlu-siyahi	12,0 (29339)
Yabancı-siyahi	9,8 (23856)
ABD doğumlu – hispanic	12,4 (30346)
Yabancı-hispanic	21,8 (53248)
ABD doğumlu-Asyalı	1,2 (2899)
Yabancı-Asyalı	14,0 (34,020)
Maternal (anne) yaş	%(n)
<20	6,6 (16108)
20-25	20,8 (50608)
25-30	26,6 (64814)
30-35	26,4 (64481)
35-40	15,3 (37246)
≥40	4,4 (10596)
Doğum öncesi Vücut Kitle İndeksi (VKI)	
<18,5 (düşük)	5,5 (13445)
18,5<25 (normal)	54,3 (132442)
25<30 (yüksek)	23,7 (57842)
≥30 (obez)	16,5 (40124)
Veri Yılı	
2007	
2008	
2009	
2010	
Yerleşim birimine yakın ortalama NO _x (ppb)	26,8 (5,3)
Yerleşim birimine yakın ortalama PM _{2,5} (µg/m ³)	11,8 (1,9)

Belirtilen bilgilere dayanarak konsept Bayesian ağ modeli Şekil 1’de gösterildiği formuyla oluşturulmuştur. BA modelinde 10 (on) adet hücre bulunmaktadır. Her bir hücre farklı sayıda kategorilere ayrılmıştır. “anne yas” hücresi 6 kategoriye (20 yaş ve altı, 20-25 yaş aralığı, 25-30 yaş

aralığı, 30-35 yaş aralığı, 35-40 yaş aralığı, 40 yaş ve üzeri), “anne eğitim” hücresi 8 kategoriye (9 yıldan az, 9-11 yıl arası, 12 yıl/lise, 13-15 yıl arası, 16 yıl/lisans, 16 yıl üzeri eğitim), “anne ırk” hücresi beş kategoriye (beyaz, ABD doğumlu siyahi, ülke dışı doğumlu siyahi, hispanic, asyalı),

“SMI” hücresi üç kategoriye (<1,5, 1,5-2,5 aralığı, >2,5), “PM” hücresi 4 kategoriye (<10 µg/m³, 10-11 µg/m³ arası, 11-12 µg/m³ arası, >12 µg/m³), “NO₂” hücresi dört kategoriye (<23 ppb, 23-26 ppb, 26-29 ppb, >29 ppb), “doğum öncesi VKI” hücresi dört kategoriye (zayıf, normal, aşırı kilolu, obez), hedef hücre olan “doğum aralığı” hücresi dört kategoriye (<3040 g, 3040-3320 g, 3320-3625 g, >3625) ayrılmıştır.



Şekil 1. Konsept Bayesian Ağ Modeli

İkinci adım olarak her bir hücre için referans çalışmada verilen ortalama verilere ve literatürden elde edilen bilgilere göre KOT’lar oluşturuldu. EK-Şekil 1’de her bir hücre için oluşturulan KOT’lara ait histogramlar gösterilmiştir. Şekil 3, KOT’lar ile öğrenilmiş revize Bayesian ağ modelini göstermektedir.

Model tarafından sağlanabilecek öngörü türlerini vurgulamak için çeşitli alternatif senaryolar incelenmiştir. Bunlar:

- Farklı SMI kategorilerinin doğum ağırlığını nasıl etkilediği
- Artan hava kirlenici konsantrasyonlarının (PM_{2,5} ve NO₂) doğum ağırlığını nasıl etkilediği
- Doğum öncesi annenin VKI’nin doğum ağırlığını nasıl etkilediği

Bu amaçla simüle edilen yirmidört senaryo Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Simüle edilen yirmidört senaryo (Düşük ve yüksek konsantrasyon ifadelerinin solundaki maddeler simülasyon numaralarıdır.)

		SMI Senaryo					
		s1		s2		s3	
		NO ₂	PM	NO ₂	PM	NO ₂	PM
VKI Senaryo	Düşük	1) düşük s1_below_23	13) düşük s1_below_10	5) düşük s1_below_23	17) düşük s1_below_10	9) düşük s1_below_23	21) düşük s1_below_10
		2) yüksek s4_29_up	14) yüksek s4_12_up	6) yüksek s4_29_up	18) yüksek s4_12_up	10) yüksek s4_29_up	22) yüksek s4_12_up
	Normal	3) düşük s1_below_23	15) düşük s1_below_10	7) düşük s1_below_23	19) düşük s1_below_10	11) düşük s1_below_23	23) düşük s1_below_10
		4) yüksek s4_29_up	16) yüksek s4_12_up	8) yüksek s4_29_up	20) yüksek s4_12_up	12) yüksek s4_29_up	24) yüksek s4_12_up

Model tamamlandıktan sonra hedef (H) hücre olarak “doğum ağırlığı” hücresi belirlenmiştir ve modele duyarlılık testi GeNIe tarafından dahili sağlanan test özelliği ile yapılmıştır. Türev, hedef hücrenin sonsal (posterior) olasılık H’nin senaryodaki p parametresine olan ilk türevinin aldığı değerdir. Sonsal olasılık, aşağıdaki lineer rasyonel fonksiyonel form ile ifade edilir²⁰:

$$H = \frac{a \times p + b}{c \times p + d}$$

Duyarlılık analizi algoritması dört sabiti hesaplar; a, b, c ve d. Dört sabit hesaplandıktan sonra türevi alınarak hedef sonsal olasılık hesap edilir. Türevin formülü:

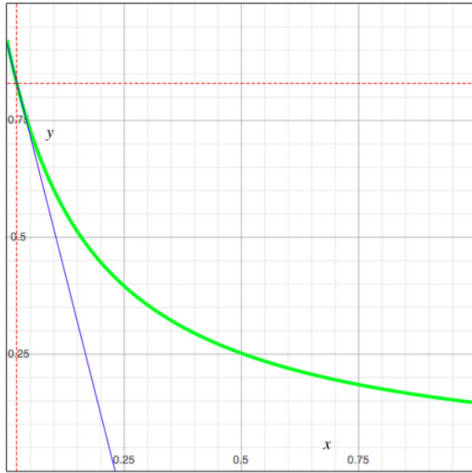
$$D = \frac{a \times d - b \times c}{(c \times p + d)^2}$$

Payda pozitif olduğundan türevin işareti p’nin tüm değerleri için sabittir ve fonksiyon monotonik veya sabittir. İlk denklemden p olasılığına göre p’nin bütün aralıkta değişmesiyle sonsal olasılığın ne kadar değişeceği hesaplanır. Aralık şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$p_1 = \frac{b}{d}$$

$$p_2 = \frac{a+b}{c+d}$$

$a \times d - b \times c$ terimi hangi değerin (p_1 ve p_2 'den) minimum ve maksimum olduğuna karar verir. Şekil 2 hassasiyet testinin nasıl uygulandığını göstermektedir. X-ekseni p 'nin aldığı değeri, y ise H hedef hüresinin seçili kategorisinin aldığı sonsal olasılığı göstermektedir. Yeşil grafik çizgisi çalışmada baz alınan parametrenin sonsal olasılığını, mavi çizgi ise türevini ifade etmektedir.

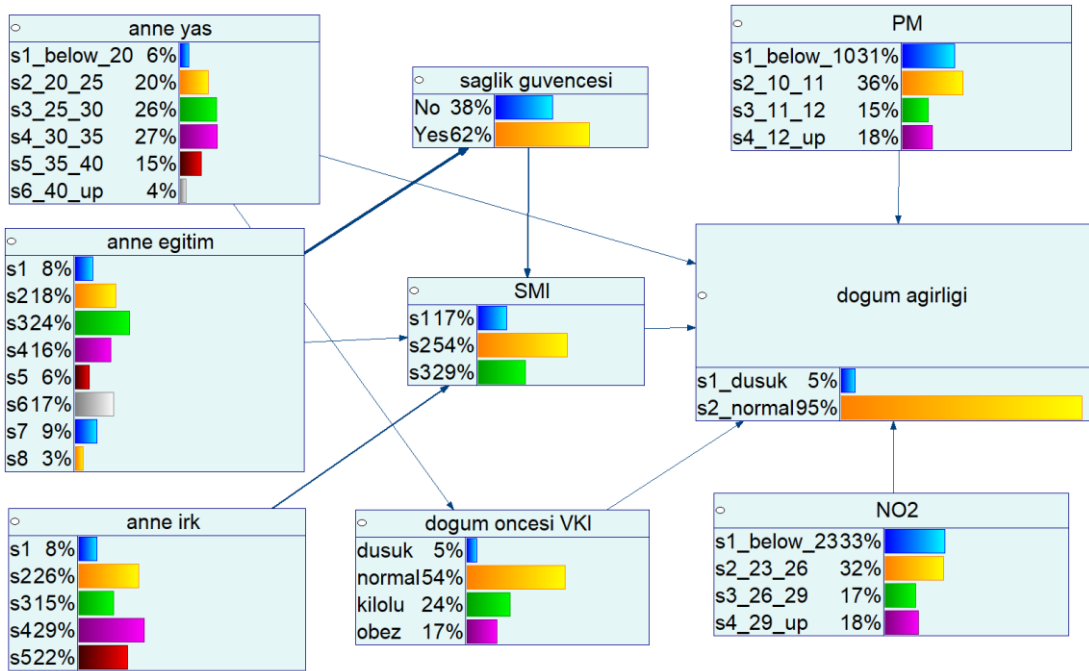


Şekil 2. GeNie duyarlılık testi örnek [20]

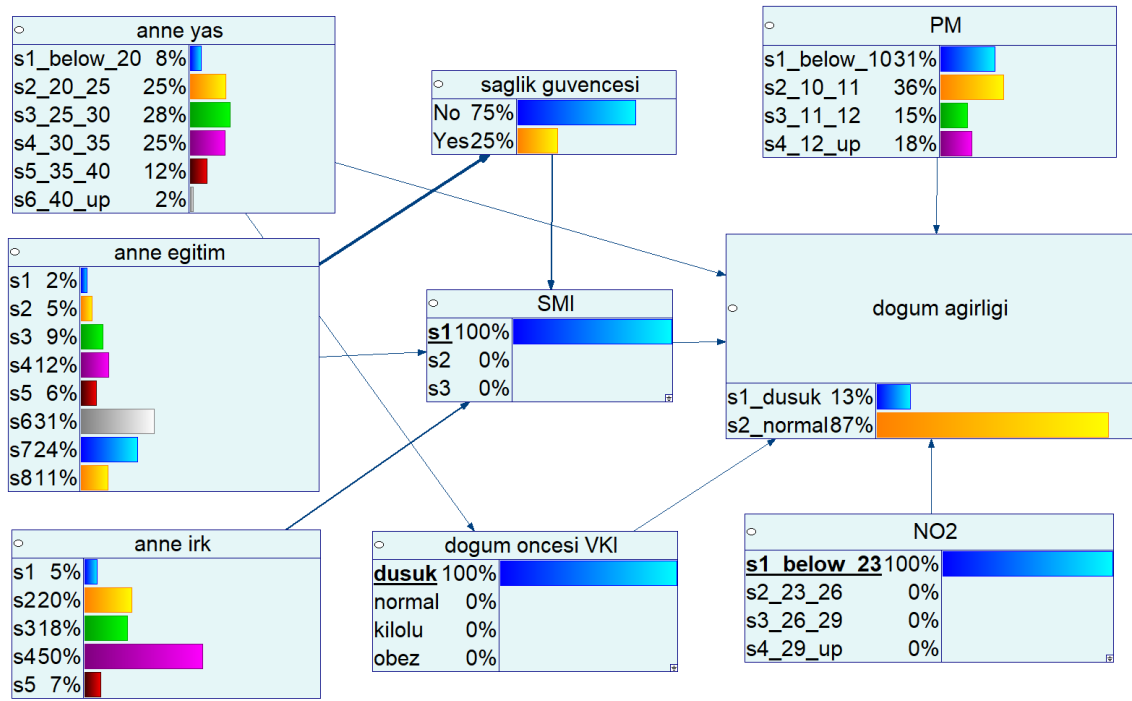
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te öğrenilmiş revize Bayesian Ağ modeli gösterilmiştir. *Anne yas* ve *anne eğitim* değişkenlerinde normal dağılım gözlenmektedir. Düşük olarak belirtilen 2500 g ve altı doğum ağırlıklarının ortalama olasılığı %5 olarak belirtilmiştir. Bu ağ modelini baz alarak yapılan yirmidört simülasyonun ilki Şekil 4'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere düşük VKI'ya sahip düşük SMI'ndeki annenin 23 ppb altında NO_2 kirliliğine maruz kalması durumunda bebek doğum ağırlığının düşük aralıkta olma riski %5'ten %13'e çıkmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için benzer şekilde Tablo 2'de belirtilen yirmidört senaryo simüle edilmiştir.

Tablo 3 bütün senaryolar için simüle edilen sonuçları özetlemektedir. Annenin düşük VKI'ne sahip olması hava kirleticilerine maruziyetini ve buna bağlı olarak bebek doğum ağırlığı riskini etkilemektedir. S1 indeksindeki normal VKI'ne sahip annenin düşük NO_2 konsantrasyonuna maruz kalması sonucunda düşük doğum ağırlığı riski %2 iken, aynı şartlarda düşük VKI'ne sahip olması riski %13'e çıkarmaktadır. VKI'nin etkisi yüksek NO_2 konsantrasyonuna maruziyette daha önemli boyutta görülmektedir. Normal VKI'ne sahip annenin yüksek NO_2 konsantrasyonuna maruziyeti sonucunda düşük doğum riski %7 iken düşük VKI'ne sahip annenin yüksek NO_2 kirliliğine maruz kalması sonucunda bu risk %36'ya çıkmaktadır. Diğer iki SMI kategorisinde de yaklaşık olarak benzer trendler görülmektedir. S2 indeksinde yüksek NO_2 maruziyeti normal



Şekil 3. Koşullu Olasılık Tabloları ile öğrenilmiş revize Bayesian Ağ Modeli (Her bir kategori için olasılıklar yüzde olarak gösterilmiştir, her bir hücrenin olasılıklarının toplamı 100 etmektedir.)



Şekil 4. Senaryo 1-Bayesian Ağ Modeli

VKI'ne sahip annede %4 düşük doğum riski oluştururken bu risk düşük VKI'de %17'e çıkmaktadır. S3 indeksinde de benzer bir ilişki görülmektedir. Düşük VKI'nin $PM_{2.5}$ konsantrasyonuna maruziyet sonucunda normal VKI'ne sahip adaylara göre düşük doğum ağırlığı riskinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin s1 indeksindeki bir annenin normal VKI'ya sahip olması durumunda düşük $PM_{2.5}$ konsantrasyonu maruziyeti sonucunda düşük doğum ağırlığı riski %5 iken, düşük VKI'ya sahip olması durumunda bu risk %27'e çıkmıştır. Ancak aynı VKI'ne sahip annede artan PM maruziyetinin doğum ağırlığı riskini artırdığı gözlenmemiştir. Farklı SMI kategorilerini karşılaştıracak olursak farklı kirleticilere maruziyet ve farklı VKI kategorisine aidiyet etkileri farklılaştırmaktadır, diğer bir deyişle

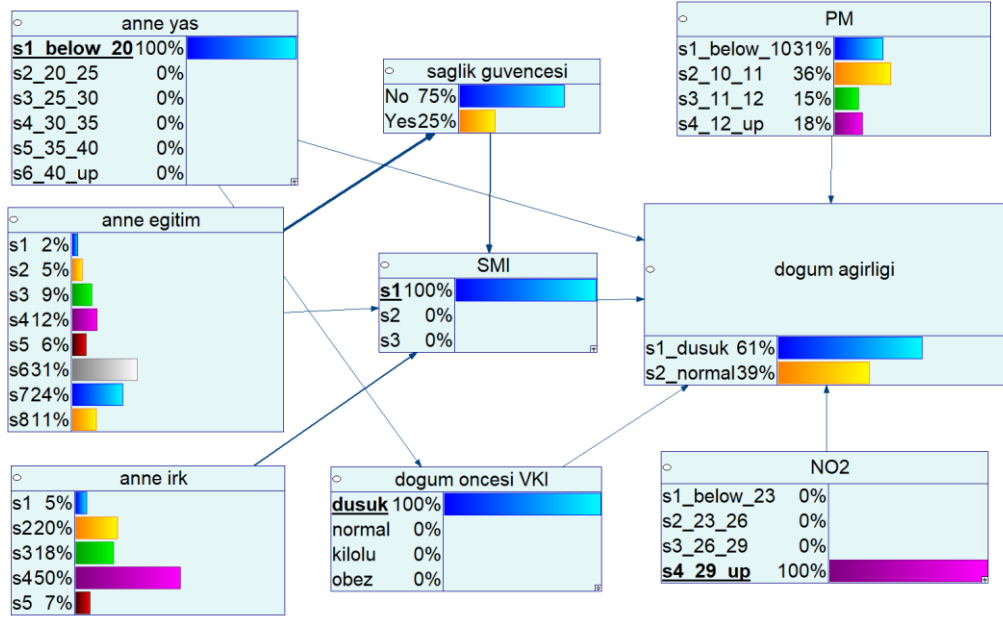
tek bir trend gözlenmemiştir. Örneğin, düşük VKI kategorisine bakacak olursak s1 indeksinde yüksek NO_2 kirleticisine maruz kalma sonucu %36 risk oluşurken bu risk s2'de %17'ye, s3 indeksinde %23'e düşmektedir. Benzer trend düşük kirletici konsantrasyonunda gözlenmemiştir. Normal VKI kategorisinde ise yüksek NO_2 konsantrasyonunda düşük doğum ağırlığı riski artan SMI indeksinde s1-s2 arasında azalma, s2-s3 arasında artış göstermiştir. Ancak s2 ve s3 arasındaki fark istatistiksel olarak belirgin değildir. NO_2 maruziyetine benzer olarak $PM_{2.5}$ maruziyeti düşük SMI'da yüksek risk (%27) oluştururken daha yüksek indekse sahip grupta bu riskin azaldığı ancak s3'de aynı kaldığı elde edilmiştir. Benzer ilişki yüksek kirletici konsantrasyonunda da elde edilmiştir.

Tablo 3. Yirmidört senaryo için simülasyon sonucunda elde edilen düşük doğum ağırlığı olasılıkları (Tablo 2'de belirtilen her bir senaryo numarasının yanında yüzde olarak düşük doğum riski belirtilmiştir)

		SMI Senaryo					
		s1		s2		s3	
		NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$	NO_2	$PM_{2.5}$
VKI Senaryo	Düşük	1) %13	13) %27	5) %10	17) %16	9) %31	21) %27
		2) %36	14) %18	6) %17	18) %13	10) %23	22) %31
	Normal	3) %2	15) %5	7) %3	19) %5	11) %8	23) %4
		4) %7	16) %3	8) %4	20) %2	12) %8	24) %9

Şekil 5'te görüldüğü gibi düşük SMI indeksindeki genç anne kategorisi yüksek NO_2 kirliliğine maruz kaldığında en yüksek doğum ağırlığı riskini göstermektedir. Annenin yaşı 20'nin altına düştüğünde kümülatif düşük doğum ağırlığı riski %61'e çıkmaktadır. Aynı şartlarda annenin obez aralığına çıkması durumunda risk neredeyse aynı kalmakta (%60) ancak normal ve kilolu aralığına düşmesi durumunda risk %45'e gerilemektedir. VKI'nın hava

kirleticilerinden etkilenme mekanizmasına ve sonuç olarak doğum ağırlığı riskiyle olan ilişkisi önemlidir. Ayrıca aynı şartlara sahip annenin s3 kategorisine dahil olması durumunda %61'lik risk %17'e gerilemektedir. Bu sonuç sosyal mahrumiyet indeksinin yüksek kirleticilere maruz kalırsa dahili dolaylı oluşturduğu şartlardan dolayı düşük doğum ağırlığı riskini önemli ölçüde pozitif doğrultuda etkilediğini göstermektedir.



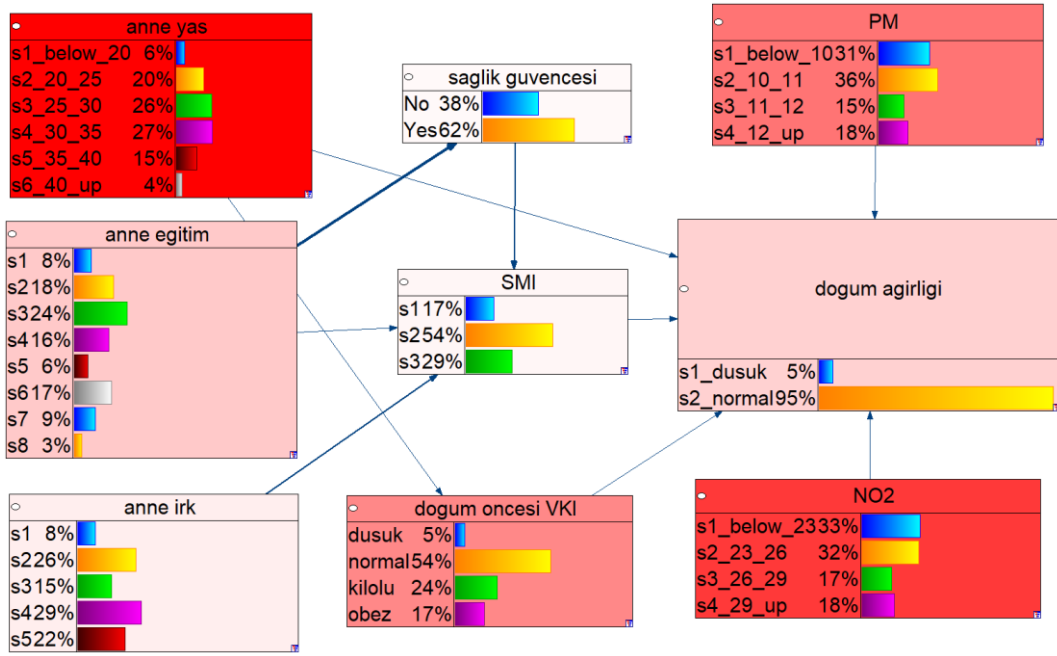
Şekil 5. Senaryo: Anne yas: <20, SMI: s1, doğum öncesi VKI: düşük, NO2: >29 ppb

Bu çalışmada duyarlılık analizi ile geliştirilen Bayesian modelin hedef hücresine etki eden en önemli değişkenler tespit edilmiştir. Ancak araştırmanın doğası gereği bir takım kısıtlamalar bulunmaktadır. Referans alınan çalışmada yalnızca bir bebeğe hamile, sigara içmeyen, 37-42 haftayı tamamlayan doğumlar veri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca anne adaylarının gündelik yaşam tarzlarıyla ilgili hiçbir ölçüm kullanılmamıştır. Anne adaylarının hamilelik süresince ikamet değiştirmedikleri varsayılmıştır.

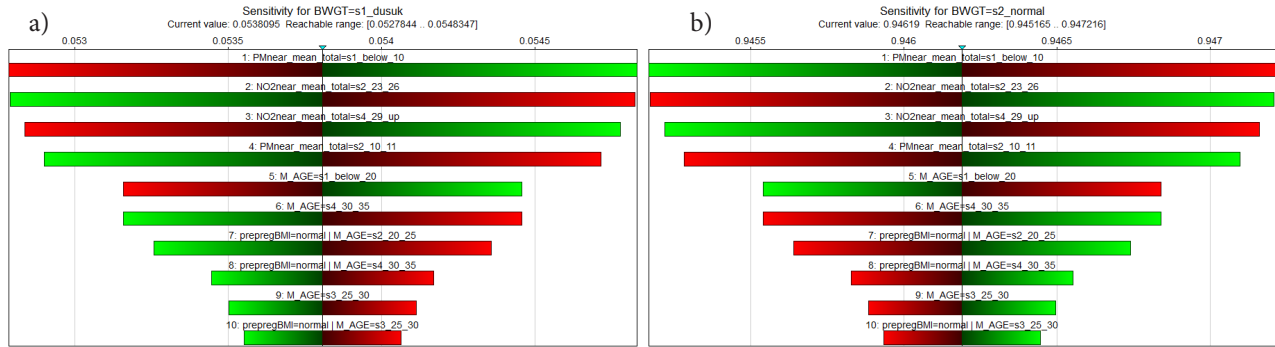
Şekil 6'da hedef hücre olan *dogum ağırlığı*'na etki eden hücrelerin duyarlılık derecesi gösterilmiştir. En koyu kırmızı en güçlü ilişkiyi, en açık kırmızı tonu en zayıf ilişkiyi temsil etmektedir. Hiçbir senaryo belirtilmeyen ve KOT'larının öğrenildiği bu ham modelde doğum ağırlığının duyarlılığı en fazla anne yaşına ve hava kirleticilerine maruziyete bağlıdır.

Şekil 7'de hassasiyet testi sonucunda elde edilen tornado diyagramları gösterilmektedir. Şekil 7a'da hedef hücre için sonsal olasılık aralığı görülmektedir. Minimum ve

maksimum değerler seçilen senaryoya bağlı olarak değişmektedir. Diyagram en duyarlı değişkenden en az duyarlı değişkene doğru sıralanmaktadır. Bar rengi hedef hücredeki değişimin hangi yönde olduğunu göstermektedir; kırmızı negatif, yeşil pozitif değişimi belirtmektedir. Yöntem bölümünde açıklanan a, b, c ve d katsayılarına bağlı olarak hesaplanan türev geliştirilen ağırlık parametrelerinin ne kadar net olduğu konusunda bilgi verir. Eğer parametre p'nin türevi büyükse p değeriindeki küçük değişiklikler bile hedef hücrenin sonsalında büyük değişiklikler olmasına neden olabilir. Eğer türevi küçükse, parametredeki büyük değişiklikler sonsalında çok küçük değişikliklere sebep olacağına işaretçisidir. *Dusuk* doğum ağırlığı kategorisi en fazla düşük $\text{PM}_{2.5}$ konsantrasyonlarından, normal ve çok yüksek NO_2 konsantrasyonundan etkilenmektedir. Hava kirletici konsantrasyonlarını takip eden en hassas değişken annenin 20 yaşın altında olma kategorisidir. Benzer trend *normal* doğum ağırlığı kategorisi için de geçerlidir (Şekil 7b).



Şekil 6: Öğrenilmiş Bayesian Ağ Modeli duyarlılık testi



Şekil 7: Öğrenilmiş Bayesian Ağ Modeli Tornado Diyagramı

IV. SONUÇ

Mevcut teknolojik gelişmeler yüksek çözünürlüklü veri teminini mümkün kılmıştır. Ancak veri analizi konusunda benimsenen klasik istatistiksel yöntemler veriden öğrenebileceğimiz bilgiyi kısıtlamaktadır. Tıbbi bilimlerde çevresel kirleticilerin halk sağlığı üzerindeki etkisini inceleyen bilimsel gruplar verilerin değerlendirmesi ve değişkenlerin kümülatif etkisini inceleme konusunda zorluk yaşamaktadır. Bu zorluklar ve belirsizlikler halk sağlığını koruma amaçlı etkin mevzuat değişikliklerinin yapılmasını engellemektedir. Bu çalışmada halk sağlığına etki eden risk faktörleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin değerlendirmesi konusunda yeni bir yöntem sunulmuştur. Geleneksel yaklaşım olan değişkenler arasındaki ikili ilişkilerin değerlendirilmesinden farklı olarak risk faktörleri arasındaki ilişkiler ağ analizi ile incelenmiştir. Örnek olarak seçilen New York

şehri hava kalitesi ($PM_{2.5}$ ve NO_2 konsantrasyonları), sosyoekonomik mahrumiyet ve doğum ağırlığı arasındaki ilişki olasılıksal olarak incelenmiştir. Yirmidört farklı vaka senaryosu oluşturularak meydana gelebilecek risk seviyeleri karşılaştırılmıştır. Bebek doğum ağırlığına hava kirleticilerinin, annenin yaşının ve doğum öncesi VKI'sının önemli etkide bulunduğu gösterilmiştir. VKI'nın etkisi yüksek NO_2 konsantrasyonuna maruziyette daha önemli boyutta görülmektedir. Ayrıca annenin dahil olduğu SMI'nın hava kirleticilerine olan maruziyeti ve bunun sonucunda doğum ağırlığına etki ettiği gösterilmiştir. Düşük VKI kategorisine bakacak olursak s1 indekisinde yüksek NO_2 kirleticisine maruz kalma sonucu %36 risk oluşurken bu risk s2'de %17'ye, s3 indekisinde %23'e düşmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların halk sağlığı-çevresel risk analizi alanlarına birçok önemli katkısı bulunacaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında

geliştirilen holistik değerlendirme çerçevesi farklı çevresel risk senaryolarına uygulanarak çok sayıda risk faktörü ve değişken aynı anda değerlendirilebilir.

Teşekkür

Bu araştırma kamu, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından özel bir fon almamıştır. Bu makalede geliştirilen modeller, BayesFusion, LLC, <http://www.bayesfusion.com/> adresinden akademik araştırma kullanımı için ücretsiz olan GeNIe Modeller kullanılarak oluşturulmuştur.

KAYNAKÇA

- [1] Gee, G.C. and D.C. Payne-Sturges, Environmental health disparities: A framework integrating psychosocial and environmental concepts. *Environmental Health Perspectives*, 2004. 112(17): p. 1645-1653.
- [2] Morello-Frosch, R. and E.D. Shenassa, The environmental "Riskscape" and social inequality: Implications for explaining maternal and child health disparities. *Environmental Health Perspectives*, 2006. 114(8): p. 1150-1153.
- [3] Stieb, D.M., et al., Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res*, 2012. 117: p. 100-11.
- [4] Burton, G.J. and E. Jauniaux, Oxidative stress. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 2011. 25(3): p. 287-299.
- [5] Dadvand, P., et al., Maternal Exposure to Particulate Air Pollution and Term Birth Weight: A Multi-Country Evaluation of Effect and Heterogeneity. *Environmental Health Perspectives*, 2013. 121(3): p. 367-373.
- [6] Tian, N., J. Xue, and T.M. Barzyk, Evaluating socioeconomic and racial differences in traffic-related metrics in the United States using a GIS approach. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2013. 23(2): p. 215-222.
- [7] Blumenshine, P., et al., Socioeconomic Disparities in Adverse Birth Outcomes A Systematic Review. *American Journal of Preventive Medicine*, 2010. 39(3): p. 263-272.
- [8] Nweke, O.C., et al., Symposium on Integrating the Science of Environmental Justice into Decision-Making at the Environmental Protection Agency: An Overview. *American Journal of Public Health*, 2011. 101: p. S19-S26.
- [9] Sexton, K. and S.H. Linder, Cumulative Risk Assessment for Combined Health Effects From Chemical and Nonchemical Stressors. *American Journal of Public Health*, 2011. 101: p. S81-S88.
- [10] Zota, A.R., E.D. Shenassa, and R. Morello-Frosch, Allostatic load amplifies the effect of blood lead levels on elevated blood pressure among middle-aged US adults: a cross-sectional study. *Environmental Health*, 2013. 12.
- [11] Hicken, M.T., et al., Do Psychosocial Stress and Social Disadvantage Modify the Association Between Air Pollution and Blood Pressure? The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *American Journal of Epidemiology*, 2013. 178(10): p. 1550-1562.
- [12] McEwen, B.S., Stress, adaptation, and disease – Allostasis and allostatic load, in *Neuroimmunomodulation: Molecular Aspects, Integrative Systems, and Clinical Advances*, S.M. McCann, et al., Editors. 1998. p. 33-44.
- [13] McEwen, B.S. and T. Seeman, Protective and damaging effects of mediators of stress – Elaborating and testing the concepts of allostasis and allostatic load, in *Socioeconomic Status and Health in Industrial Nations: Social, Psychological, and Biological Pathways*, N.E. Adler, et al., Editors. 1999. p. 30-47.
- [14] Attar, B.K., N.G. Guerra, and P.H. Tolan, Neighborhood Disadvantage, Stressful Life Events, and Adjustment in Urban Elementary-School-Children. *Journal of Clinical Child Psychology*, 1994. 23(4): p. 391-400.
- [15] Ross, C.E. and J. Mirowsky, Disorder and decay – The concept and measurement of perceived neighborhood disorder. *Urban Affairs Review*, 1999. 34(3): p. 412-432.
- [16] Cohen, S., T. Kamarck, and R. Mermelstein, A Global Measure of Perceived Stress. *Journal of Health and Social Behavior*, 1983. 24(4): p. 385-396.
- [17] Pickett, K.E. and R.G. Wilkinson, Income inequality and health: a causal review. *Soc Sci Med*, 2015. 128: p. 316-26.
- [18] Shmool, J.L., et al., Area-level socioeconomic deprivation, nitrogen dioxide exposure, and term birth weight in New York City. *Environ Res*, 2015. 142: p. 624-32.
- [19] Messer, L.C., et al., The development of a standardized neighborhood deprivation index. *Journal of Urban Health-Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 2006. 83(6): p. 1041-1062.
- [20] Bayesfusion.com. GeNIe software, available from <http://www.bayesfusion.com/> 2016 [cited 2016; Available from: software, available from <http://www.bayesfusion.com/>].
- [21] Newton, A.C., Bayesian Belief Networks in Environmental Modeling: A Review of Recent Progress. *Environmental Modelling* 2009: p. 13-50.
- [22] Pearl, J., Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. 1988, Los Angeles: Morgan Kaufmann Publishers.
- [23] Pollino, C.A. and C. Henderson, Bayesian networks: A guide for their application in natural resource management and policy, 2010, Australian Government.
- [24] Murphy, K.P., Machine Learning A Probabilistic Perspective. 2012, Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press.