

# NEGATİF POISSON ORANINA SAHİP (AUXETIC) MALZEMELER VE UYGULAMA ALANLARI

Muhammet UZUN

University of Bolton, Institute for Materials Research and Innovation BL3 5AB-Bolton, UK  
Marmara Üniversitesi, Tekstil Eğitimi Bölümü 34722-Göztepe, İstanbul

## ÖZET

Akıllı malzemelere olan ilgi ve ihtiyacın her geçen gün artmasıyla yeni ve çok fonksiyonlu malzemeler tasarlanıp üretilmektedir. Akıllı malzeme üretimi ya yeni bir ürün geliştirilmesiyle ya da geleneksel malzemeye ek özellikler kazandırılmasıyla oluşur. Bu çalışmada geleneksel malzemelerin negatif Poisson oranına sahip olmaları durumunda ne gibi ek özellikler kazanacağı ve kullanımdaki artı özellikleri incelenmiştir. Çevremizde gördüğümüz malzemelerin büyük çoğunluğu pozitif Poisson oranına sahipken sınırlı sayıda ki malzeme negatif Poisson oranına sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı malzemeler, Pozitif Poisson oranı, Negatif Poisson oranı, Teknik tekstiller

## NEGATIVE POISSON RATIO (AUXETIC) MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS

### ABSTRACT

The interest and demand of smart materials are increasing with each passing day. For this reason, many new functional materials are designed and fabricated. There are two methods for fabrication of smart materials. One of them is creating entirely new material, another is by adding novel properties to the traditional materials. The aim of this study is to give an idea about the negative Poisson ratio behaviour for new smart materials. Which features of materials can be enhanced with negative Poisson ratio? If we look around, we can see large majority of materials have positive Poisson ratio but there is some materials which have negative Poisson ratio.

**Keywords:** Smart Materials, Negative Poisson ratio, Positive Poisson ratio, Technical Textile

## 1. TANIM

### 1.1. Poisson Oranı

Fransız bilim adamı Simeon Denis Poisson tarafından ortaya atılan ve kendi adını taşıyan Poisson oranı günümüzde çoğu mühendislik alanında malzemenin yapısını belirlemeye yarayan önemli özelliklerden biridir. Birçok farklı tanımlamanın yapıldığı Poisson oranı kısaca, bir malzemede kuvvet uygulanan yöndeki kısalma miktarı ile diğer yöndeki uzama miktarı arasındaki bağıntıdır. Diğer bir deyişle cisimlerdeki enine kısalmanın boyuna uzamaya oranıdır. Bu oran pozitif ve negatif olabilir. Çoğu malzeme pozitif Poisson oranına sahipken yakın geçmişte bazı negatif Poisson oranına sahip doğal ve yapay malzemeler bulunmuştur. Poisson oranı, elastik eşyönlü (izotropik) malzemeler için teorik olarak -1 ile 0.5 arasında değişmektedir. Lastik ve kauçuk gibi elastik malzemelerde oran pozitif yönde artarken daha katı malzemelerde sıfıra yakındır. Tablo 1'de bazı malzemelerin Poisson değerleri verilmiştir. [1]

**Tablo 1:** Bazı Malzemelerin Poisson Oranları[2,3,4]

Malzeme	Poisson Oranı (ν)
Alüminyum	0.334
Bakır	0.355
Bronz	0.140
Buz	0.330
Beton(yüksek performanslı)	0.13-0.16
Cam	0.240
Çelik (Yumuşak)	0.27-0.30
Çelik (Yüksek dayanımlı)	0.30
Epoxy Reçine	0.38-0.40
Gümüş	0.37
Kauçuk	0.48-0.50
Naylon	0.40
Kükürt	0.21-0.34
Polisitren	0.340
Porselen	0.208
PVC	0.35
Teflon	0.399
Şişe Mantarı	0
Seramik	0.290

Poisson oranı genel olarak Yunan nu (ν) sembolüyle belirtilir ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$\nu = -\varepsilon_E / \varepsilon_B \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (2)$$

Eşitlikte;

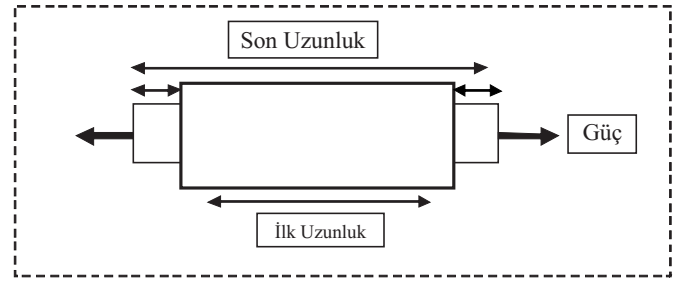
ν = Poisson Oranı

$\varepsilon_E$  = Enine Uzama Oranı

$\varepsilon_B$  = Boyuna Uzama Oranı

$\Delta L$  = Uzunluk Değişimi

$L$  = İlk Uzunluk



**Şekil 1:** İzotropik Pozitif Poisson Oranlı malzemenin çekme kuvveti altındaki şekil değiştirmesi

Çoğu mühendislik malzemelerinde Poisson oranıyla (ν) Young modülü (E) (elastisite), kayma modülü (G) ve aksel direngenlik (K) (katılık) arasında malzeme özelliklerini belirleyecek kullanışlı bağıntılar vardır. Aşağıda bu bağıntılar gösterilmektedir.

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

$$G = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

3 numaralı eşitlikte Poisson oranıyla aksel direngenlik ve kayma modülü arasındaki bağıntı gösterilmektedir. 4 numaralı denklemde ise kayma modülü ile Young modülü ve Poisson oranı gösterilmektedir.

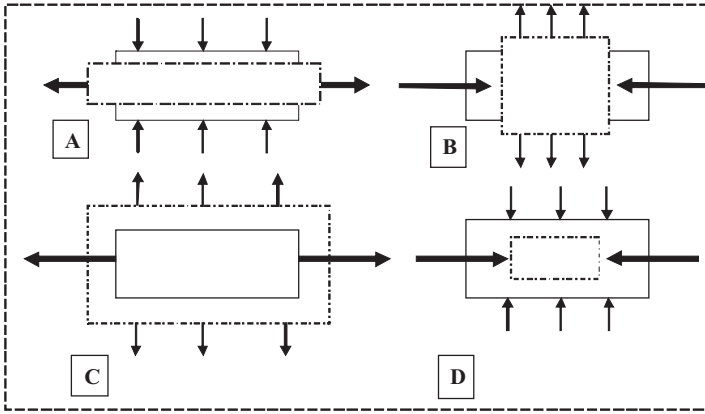
### 1.2. Negatif Poisson Oranı (Auxetic)

Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğu pozitif Poisson oranına sahip olmakla birlikte sınırlı sayıda malzeme negatif Poisson oranına sahiptir. Negatif Poisson oranına sahip malzemelere auxetic malzemeler olarak da adlandırılmaktadır. Çalışmanın devamında negatif Poisson oranına sahip malzemelere daha çok kullanılan terim olan auxetic malzeme(ler) denilecektir. Auxetic terimi Yunanca kökenli olup auxetikos'tan gelmektedir ve kelime anlamı “genişlemeye eğilimli” dir. İlk olarak Profesör Ken Evans tarafından 1991 yılında kullanılmıştır [5].

Auxetic malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin tersine olağanüstü bir özellik olarak gerildikçe genişlerler ve basıldıkça daralırlar (Şekil 2). Bu özellik geçen yüzyıldan beri bilinmesine rağmen mekanik ve mantık olarak anlaşılması ve malzemelere uygulanması 1980li yıllarda başlamıştır. İlk olarak 1987 yılında Rod Lakes tarafında Science dergisinde negatif Poisson oranına sahip “foam” yapılar yayınlanmıştır [6].

Daha sonra kompozit yapılarda, lif, iplik, kumaş ve film üretiminde denemeler yapılmıştır. Uygulama alanları oldukça yeni olmakla birlikte gelecek vadeden sonuçlara ulaşılan malzemeler üretilmiştir.

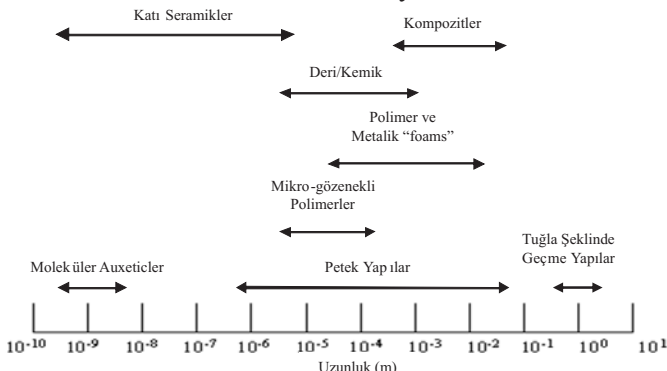
Şekil 2'de pozitif ve negatif Poisson oranına sahip yapılar karşılaştırılmaktadır. Şekil 2A'da malzeme boyuna çekildikçe enine incelmekte şekil 2B'de tam tersi olarak boyuna yapılan basınç ile eninde kalınlaşmaktadır. Şekil 2A-B pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin özelliğidir. Şekil 2C'de durum oldukça ilginç olarak boyuna çekilen malzeme bilinenin aksine incelmek yerine kalınlaşmaktadır. Şekil 2D'de ise yine bilinenin aksine boyuna yapılan basınçla enine genişlemesi gerekirken daralmaktadır. Auxetic malzemeleri özel kılan temel özellik budur ve akıllı malzeme üretiminde yeni ufuklar açma potansiyeline sahiptir.



Şekil 2: Pozitif ve Negatif Poisson Oranına sahip malzemelerin çekme ve basınç altındaki şekil değiştirmeleri

## 2. AUXETİC MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Auxetic malzemeler genel olarak doğal ve yapay olarak iki sınıfa ayrılır. Şekil 3'te büyüklüklerine göre auxetic malzemelerin sınıflandırılması gösterilmektedir. Sıvı kristal yapılar mikro (moleküler seviye) boyuttaki "auxetic" malzemelerdir. Petek yapılar makro (yapı seviyesi) boyuttaki malzemelerdir. Doğal ve yapay "auxetic"ler de bu malzemeler detaylı anlatılacaktır.



Şekil 3: Mikro ve makro seviyedeki auxetic malzeme ve yapılar [7]

### 2.1. Doğal Auxetic Malzemeler

Demir sülfür, moleküler seviyedeki ilk "auxetic" doğal malzemedir ve 1900lu yıllarda bulunmuştur [8]. Daha sonra Ledbetter tarafından  $YBa_2Cu_3O_7$ 'nin "auxetic" özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir [9]. Auxetic özelliği moleküler seviyedeki doğal tek kristal yapılarda da gözlemlenmiştir. Tek kristal yapılara örnek arsenik ve kadmiyum verilebilir [10,11]. 1979 da Milstein ve Huang onlardan sonra 1998 de Baughman ve arkadaşları tarafından kübik metallerin %69 oranında "auxetic" özelliğe sahip oldukları vurgulanmıştır. Baughman "auxetic" metallerden yapılan elektrotların piezoelektrik duyarlılığını normalden iki kat arttıracaklarını öne sürmektedir [12,13]. Yeganeh-Haeri ve arkadaşları  $\alpha$ -cristobalite silis kristalinde "auxetic" özelliğini bulmuşlardır [14].

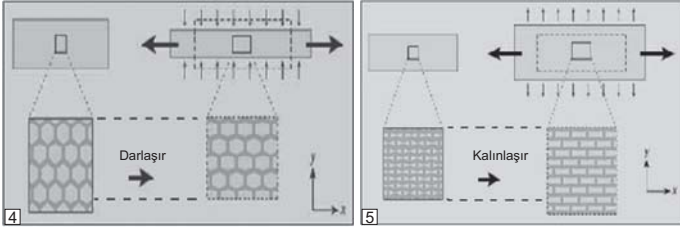
Auxetic özelliği tetrahedral hücreler içeren  $\alpha$ -cristobalite ve bazı malzemeler için modellenmiştir.  $\alpha$ -cristobalite ve  $\alpha$ -quartz için pozitif ve negatif Poisson oranları analitik modellerle bulunmaktadır [15]. Bazı derilerde (kedi), inek meme yüzeyinde, semender derisi ve ağırlığı taşıyan süngerimsi (cancellous bone) insan kemiği gibi bazı biomalzemelerde "auxetic" özellik bulunmuştur [16,17].

### 2.2. Yapay Auxetic Malzemeler

Eğrilmiş zincir yapıdaki "auxetic" (twisted-chain auxetics) moleküler ağ ilk olarak Baughman tarafından ortaya atılmıştır. Bu yapıdan olumlu sonuçlar alınmış ve özellikle elektriksel ve optik özelliklerde faydalı olacağı varsayılmıştır [18]. Guo ve Goddard 1995te  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarda karbon nitratin "auxetic" özellikte olduğunu tahmin etmişlerdir [19]. Yine yapay "auxetic" malzemelere bir diğer örnek şimdilerde Griffin tarafından yapılmıştır ve Griffin kristalin polimerlerdeki asıl zincir likitlerinin "auxetic" olduğunu vurgulamıştır [20].

Nükleer reaktörler için tasarlanan birbirine geçmiş tuğla biçiminde ki (keyed brick yapılar) grafit çekirdekler makro boyuttaki "auxetic" yapılardır. Bu tip malzemeler deprem de meydana gelebilecek yatay hareketlerin zararlarını minimum seviyeye düşürmek için tasarlanmıştır [21].

İlk hüresel "auxetic" yapı 1982 de 2-D silikon kauçuk petek (honeycomb) yapılarda tasarlanmıştır [22]. Daha sonra "auxetic" petek yapılar üzerine birçok (chiral honeycombs) başarılı çalışma yapılmıştır. Şekil 4'te normal, Şekil 5'te "auxetic" petek yapıların gerilme sonundaki değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4-5: Normal ve auxetic petek yapıların gerilme sonundaki değişimleri

Roderic Lake 1987'de yapmış olduğu çalışmalar sonucunda poliüretan köpüklerin sıcaklık ve üç yönlü sıkıştırma sonucunda auxetic yapıya dönüştüğünü vurgulamıştır [6]. Şimdilerde polimerik ve metalik bazı köpüklerin -0,7 ile -0,8 arasında Poisson oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Lakes "auxetic" köpüklerin normallerden daha esnek olduğunu bulmuştur. Özellikle küçük filtrelerde bu özellik hassaslığı arttırmaktadır [23].

Yapay olarak oluşturulan önemli "auxetic" malzemelerden biri de kompozitlerdir. Lif takviyeli laminelerde auxetic özelliği oluşturulmuştur [24, 25]. Bu uygulamayla kompozitin darbe dayanımının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Auxetic petek yapılarla sandviç kompozitler dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Bu tip kompozitler çift kavisli eğrilik özelliği göstermişlerdir. Araba ve uçak parça yapımında bu tip kompozitler kullanım avantajına sahiptirler [26].

Caddock ve Evans ilk "auxetic" polimeri geliştirmişlerdir. Bu polimer mikro gözenekli PTFE'dir ve Poisson oranı yaklaşık -12 civarında bulunmuştur [27, 28]. Auxetic UHMWPE, polipropilen (PP) ve poliamid lif başarıyla üretilmiştir [29]. Özellikle birçok PP lif üretimi gerçekleştirilmiş ve negatif Poisson oranı bulunmuştur. Son olarak, yapay olarak oluşturulan auxeticler için pek çok modelleme çalışmaları yapılmıştır. Uygulamalı mühendislik dâhilinde olmadığı için bu çalışmada modelleme örneklerine yer verilmemiştir.

### 3. AUXETİC MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, pozitif Poisson oranına sahip malzemelerle karşılaştırıldıklarında önemli avantajlara sahiptirler. Bu özelliklerin başında daha iyi sürütünme dayanımı gelmektedir. Matematiksel hesaplamalar bu teoriyi desteklemektedir. Diğer bir üstün özelliği kopma dayanımının daha iyi olmasıdır [4,6]. Poisson oranıyla doğrudan bağlantılı özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

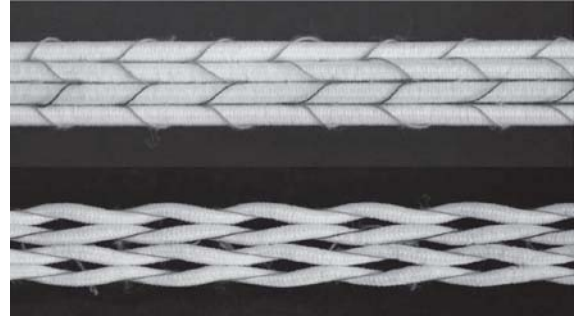
- Ekstra sürütünme dayanımı
- Akustik davranış
- Üstün enerji emme (darbe, ultrasonik ve sonik)
- Islak (yaş) verimlilik
- Tutunma (arayüzey/matris) dayanımı
- Isıl darbe dayanımı
- Kopma dayanımı
- Daha iyi kayma modülü [30]

Teoride ve modellemede, auxetic malzemelerin üstün özelliklerinin ispat edilmesiyle beraber uygulama alanında yeni çalışmalarla pratikte de bu özelliklerin ne oranda var olduklarının incelenmesi gerekmektedir.

### 4. AUXETİC MALZEMELERİN TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE POTANSİYEL KULLANIM ALANLARI

Auxetic tekstil yapılarının üretilmeye ve kullanılmaya başlanması gayet yenidir. Üstün özelliklerinden dolayı özellikle teknik tekstillerde ihtiyaç duyulan farklı yapıdaki malzeme talebini karşılama potansiyeline sahiptir. Bu bölümde bazı teknik tekstil uygulamaları örneklerle açıklanacaktır.

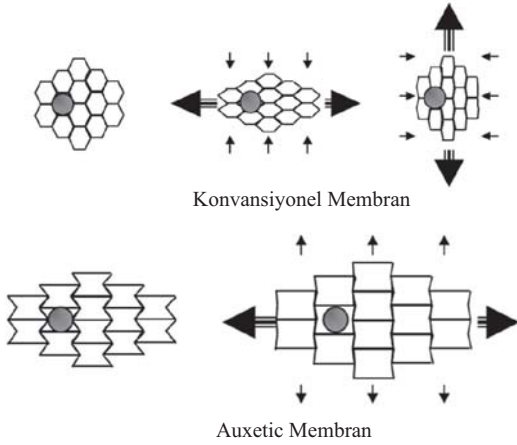
- Koruyucu tekstil ürünlerinde kullanılabilir. Kurşun-geçirmez yelek ve patlama etkilerine dayanıklı perde üretilmeye çalışılmaktadır. Koruyucu tekstillerde kullanılan auxeticler yapısaldır [31, 32].
- Auxetic özelliği endüstriyel dayanıma sahip halat ve iplik üretiminde kullanılabilir. Şekil 6'da yapısal olarak hazırlanan "auxetic" halat gösterilmektedir [31].



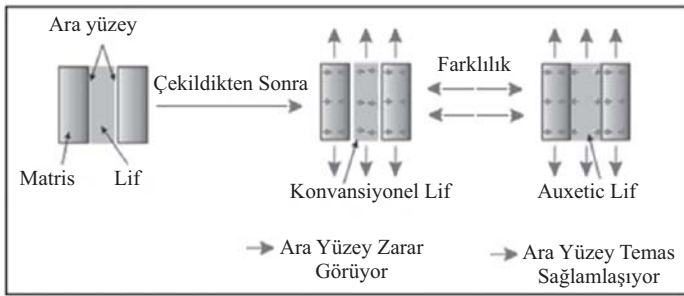
Şekil 6: Yapısal auxetic iplik ve halat üretim modeli [31]

- Auxetic yapıların bir diğer kullanım alanı hava alabilen kumaşlardır. Gözenek büyüklükleri hava sirkülasyonuna yardım etmektedir. Özellikle giyim konforunun ön planda olduğu spor giysilerinde kullanılabilecek önemli bir özelliktir.
- Auxetic köpük ve petek yapıları gözenek boyutları ve şekilleri sayesinde gelişmiş hassaslıkta filtre üretiminde kullanılabilir. Şekil 7de normal ve "auxetic" filtreler görülmektedir.
- Tekstil takviyeli kompozit üretiminde kullanılabilir ve normal materyalden maksimum yükte iki kat daha dayanım gösterebilmektedir [34]. Bu özellik tekstil takviyeli kompozitler için oldukça önemlidir. Şekil 8 de çekme test sonuçlarında meydana gelen değişiklikler verilmektedir. Kubbe şeklindeki eğiminden dolayı kompozit yapılarının kıvrılma ve darbe özelliklerini arttırmaktadır [35]. Şekil 9 da normal ve auxetic yapılar görülmektedir.

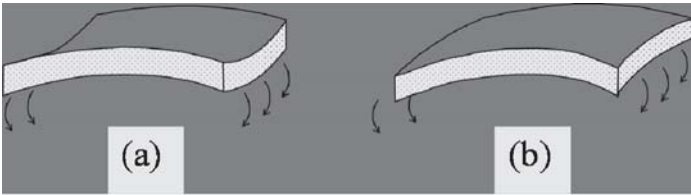




Şekil 7: Normal ve Auxetic Filtrelere Yapıları [33]



Şekil 8: Çekme dayanımı [36]



Şekil 9: Normal (a) ve Auxetic (b) yapıların eğilme özellikleri [35]

• Gözenek yapısından dolayı bandajlarda da kullanımı avantaj sağlayabilir. Özellikle herhangi bir sıvının cilde belli aralıklarla aktarılması gereken medikal uygulamalarda kullanımı fayda sağlayacaktır. Diğer muhtemel medikal uygulamaları ameliyat ipliği, yapay kas ve kanal genişleticilerdir [33].



Şekil 10: Auxetic bandajın yapısal değişimi [33]

• Toprak destekleyici malzeme olarak kullanımı için çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle araç-tren yolu, duvar ve köprü destekleyicisi olarak kullanımı önemli gelişmelere neden olabilir.

• Diğer bir kullanım alanı emniyet kemerleridir.

• Son olarak sürtünme dayanımından dolayı bu özelliğin önemli olduğu tekstil ürünlerinde gerek malzeme gerekse yapı olarak yeni sistemler geliştirilebilir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma yeni bir konsept olan "auxetic" yapılar hakkında temel bilgiler ve potansiyel tekstil uygulamaları hakkında genel bilgiler vermektedir. En basit tanımlamayla Poisson oranı bir malzemenin basınç altında ne kadar daraldığının ya da genişlediğinin matematiksel değeridir. Bu değer malzemenin başlıca mekanik özellikleri ile doğrudan ilişki halindedir. Bilinen malzemelerin çoğu pozitif Poisson oranına sahiptir. Az sayıda negatif Poisson oranına sahip diğer adıyla "auxetic" malzeme mevcuttur.

Son yıllarda hızla artan fonksiyonel malzemelere olan ihtiyaca, "auxetic" özellik gösteren malzemeler yeni bir soluk getirebilir. Bu çalışmada yapılan potansiyel kullanım alanlarına ek olarak hem malzeme hem de yapı olarak daha yeni alanlar geliştirilebilir ve teoride var olan avantajlar pratikteki neticeler ile kıyaslanabilir.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma için gerekli olan kaynaklara ulaşmamda desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Andy Alderson ve Prof. Dr. Kim Alderson'a şükranlarımı bir borç bilirim.

## 7. KAYNAKLAR

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio) (01/09/2009)
2. Lorman W.R., (1968), Engineering Properties of Shotcrete, American Concrete Institute, Sp-14.
3. Kinney J.H., Gladden J.R., Marshall G.W., So J.H., Maynard J.D., (2004), Resonant Ultrasound Spectroscopy Measurements of the Elastic Constants of Human Dentin, Journal of Biomechanics, 37:437-441.
4. [http://www.engineersedge.com/manufacturing\\_spec/average\\_p\\_properties\\_structural\\_materials.htm](http://www.engineersedge.com/manufacturing_spec/average_p_properties_structural_materials.htm) (01/09/2009)
5. Evans K.E., Nkansah M.A., Hutchison I.J., Rogers S.C., (1991), Molecular Network Design, Nature 353, 124.
6. Lakes R.S., (1987), Foam structures with a negative Poisson's ratio" Science, 235:1038-1040.
7. Alderson A., (1999), A Triumph of Lateral Thought, Chemistry and Industry.
8. Love A.E.H., (1944) A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Dover, New York, Fourth Edition.
9. Ledbetter H. and Lei M., (1991), Poisson's Ratio of Porous and Microcracked Solids: Theory and Application to Oxide Superconductors, Journal of Materials Research, 6:2253-2255.
10. Gunton D.J. and Saunders G.A. (1972), The Young's Modulus and Poisson's Ratio in Arsenic, Antimony and Bismuth, Journal of Materials Science, 7:1061-1068.
11. Li Y., (1976), The Anisotropic Behavior of Poisson's Ratio, Young's Modulus and Shear Modulus in Hexagonal Materials, Physica Status Solidi Series A, 38:171-175.
12. Milstein F. and Huang K., (1979), Existence of a Negative Poisson's Ratio in fcc Crystals. Physical Review B, 9:2030-2033.

13. Baughman R.H., Shacklette J.M., Zakhidov A.A., and Stafstrom S., (1998), Negative Poisson's Ratio as a Common Feature of Cubic Metals. *Nature*, 392:362–365.
14. Caddock B.D. and Evans K.E., (1995), Negative Poisson Ratios and Strain Dependent Mechanical-Properties in Arterial Prostheses, *Biomaterials*, 16:1109–1115.
15. Alderson A. and Evans K.E., (2002), Molecular Origin of Auxetic Behavior in Tetra-hedral Framework Silicates, *Physical Review Letter*, 89:225503–1.
16. Veronda D.R. and Westmann R.A. (1970), Mechanical Characterisation of Skin Finite Deformations, *Journal of Biomechanics*, 13:111–124.
17. Williams J.L. and Lewis J.L., (1982), Properties of an Anisotropic Model of Cancellous Bone from the Proximal Tibial epiphysis, *Journal of Biomechanical Engineering*, 104:50–56.
18. Baughman R.H. and Galvao D.S., (1993), Crystalline Networks with Unusual Predicted Mechanical and Thermal Properties, *Nature*, 365:735–737.
19. Guo Y.J. and Goddard W.A., (1995), Is Carbon Nitride Harder than Diamond - no, but its Girth Increases when Stretched (negative poisson ratio), *Chemical Physics Letters*, 237:72–76.
20. He C., Liu P., Griffin A.C., (1998), Toward Auxetic Materials Through Molecular Design, *Macromolecules*, 31:3145–3147.
21. Muto K., Bailey R.W., and Mitchell K.L., (1963), Special Requirements for the Design of Nuclear Power Stations to Withstand Earthquakes, *Proc. Inst.Mech. Eng.*, 177:155–203.
22. Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S., and Robertson C.I., (1982), The Mechanics of two Dimensional Cellular Solids, *CI proceedings of Royal Society London*, 382(A):25–42
23. Lakes R.S. and Elms K.J. (1993), Indentability of Conventional and Negative Poisson's Ratio Foams, *Journal of Composite Materials*, 27:1193–1202
24. Evans K.E., Donoghue J.P., and Alderson K.L. (2004), The Design, Matching and Manufacture of Auxetic Carbon Fibre Laminates, *Journal of Composite Materials*, 38:95–106
25. Herakovich C.T., (1985), Composite Laminates with Negative Through-the-thickness Poisson's Ratio, *Journal of Composite Materials*, 18:447–455.
26. Evans K.E., (1991), Doubly-Curved Sandwich Panel Composites with a Negative Poisson's Ratio. *Composite Structures*, 17:95.
27. Caddock B.D. and Evans K.E., (1989), Microporous Materials with Negative Poisson's ratio: I. Microstructure and Mechanical Properties, *Journal of Physics D: Applied Physics.*, 22:1877–1882
28. Evans K.E. and Caddock B.D., (1989), Microporous Materials with Negative Poisson's ratio-2: Mechanism and Interpretation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22:1883–1887
29. Alderson K.L., Webber R.S., and Evans K.E., (2000), Novel Variations in the Microstructure of Auxetic ultra-high Molecular Weight Polyethylene Part-2: Mechanical Properties, *Polymer Engineering and Science*, 40:1906–1914.
30. Uzun M., Alderson A., Alderson K., (2009), Textile Applications of Auxetic Materials, 6. International Workshop on Auxetics and Related Systems, UK
31. <http://www.auxetix.com/index.htm> (15/7/2009)
32. Evans E. and Savage L., (2007), Auxetic Blast Protection Textiles -Crime Feasibility Study, EPSRC Project, Reference EP/d036690/1.
33. <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=168> (15/7/2009)
34. Coenen V.L., (2003), Auxetic Composite Laminates with Enhanced Impact Resistance, Phd Thesis, Bolton Institute of Higher Education.
35. <http://data.bolton.ac.uk/auxnet/index.html> (15/7/2009)
36. Alderson, K.L., Simkins, V.R., Coenen, V.L., Davies, P.J., Alderson, A. And Evans, K.E., (2005) How to Make Auxetic Fibre Reinforced Composites, *Phys. Stat. Sol.*, Vol.242, No.3, pp.509-518.