

## **ELYAF SARMA İŞLEMİNDE SARIM PARAMETRELERİNİN KARBON ELYAF MUKAVEMETİNE ETKİSİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ**

### **THE STATISTICAL MODELING OF THE EFFECT OF WINDING PARAMETERS ON STRENGTH OF CARBON FIBER IN FILAMENT WINDING PROCESS**

*Garip GENÇ<sup>1</sup>, Nihat AKKUŞ<sup>2</sup>, Ersin TOPTAŞ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi / Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu / Makine Bölümü / Göztepe Kamp., İstanbul, Turkey, ggenc@marmara.edu.tr

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / Mekatronik Müh. / Göztepe Kamp., İstanbul, Turkey, nihatakkus@marmara.edu.tr

#### **ÖZET**

*Bu çalışmada, elyaf sarma işleminde kullanılan sürekli karbon elyafın sarım işlemi esnasında ön gerilme parametrelerinin etkisi ile oluşan mukavemet kaybının tahmini için istatistiksel bir model önerilmiştir. Basınçlı kaplar ve basınca dayanıklı borular gibi kompozit ürünler üzerine elyaf sarılarak dayanımlarının artması sağlanmaktadır. Bu tür kompozit ürünlerin en önemli üretim yöntemlerinden bir tanesi elyaf sarma işlemidir. Elyaf sarma işleminde üretime etki eden birden çok parametre vardır. Önemli parametrelerden birisi de sarım esnasında elyaf üzerinde bulunması gereken ön gerilme kuvvetidir. Bu ön gerilme kuvveti, ön gerilme ünitesi tarafından sarım esnasında sarım yolunu takip ederken elyafı çekmek suretiyle oluşturulur. Böylece sarım esnasında lifler arasında oluşması muhtemel boşluklar ve liflerin sarım yolundan çıkması önlenmiş olmaktadır. Kırılgan bir yapıya sahip olan karbon elyaf, ön gerilme parametrelerinden negatif yönde etkilenmektedir. Karbon elyaf mukavemetindeki kayıp miktarının sarım öncesi tahmini üretim açısından önemli bir avantaj sağlayacaktır. Bu sebeple, tasarım aşamasında kullanılan karbon elyaf liflerinin ön gerilme parametrelerinden ne kadarlık bir dayanım kaybına uğrayabileceğinin tahmini için kullanılacak bir model önerilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Sürekli karbon elyaf, ön gerilme, elyaf sarma teknolojisi, kompozit üretimi

#### **ABSTRACT**

*In this study, a statistical model has been proposed for the estimation of loss of strength of continuous carbon fiber that is formed as a result of pre tension parameters during the winding process. Increase in tension for composite materials such as pressure vessels and pressure resistant pipes is produced by filament winding. Filament winding process is one of the most important production methods for such composite materials. During filament winding process, many parameters are involved in the process. One of the most important parameters is the pre tension force that is formed on the carbon fiber during the winding process. This pre tension force is generated by pre tension unit, pulling the carbon fiber following winding path during the process. This way, possible problems are avoided, like gaps between the fibers or fibers' getting out of winding path. Pre tension parameters adversely affect the already brittle carbon fiber. Estimating the amount of loss in strength the amount of loss in strength before winding provides an advantage for production. In this study, a statistical model is suggested to estimate the amount of loss of carbon fibers from the pre tension parameters to use at design stage.*

**Key Words:** Continuous carbon fiber, pre tension, filament winding technology, composite manufacturing

## 1. GİRİŞ

Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınçlı tüpler ve boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu tüplerde aranan en önemli özellikler yüksek basınca karşı dayanım ve hafifliktir. Bu tüplerin dayanımının artırılması için yapılan en önemli işlemlerden birisi elyaf sarma teknolojisi ile tüp üzerine karbon elyaf sarmak yoluyla takviye etmektir.

Sarım işlemi esnasında kullanılan karbon elyafın hasar görmesi üretilecek ürünün dayanım kaybına neden olacaktır. Bu kayıp miktarının ön görülebilir olması tasarım aşamasında alınabilecek önlemler ile minimum seviyeye indirilebilecektir.

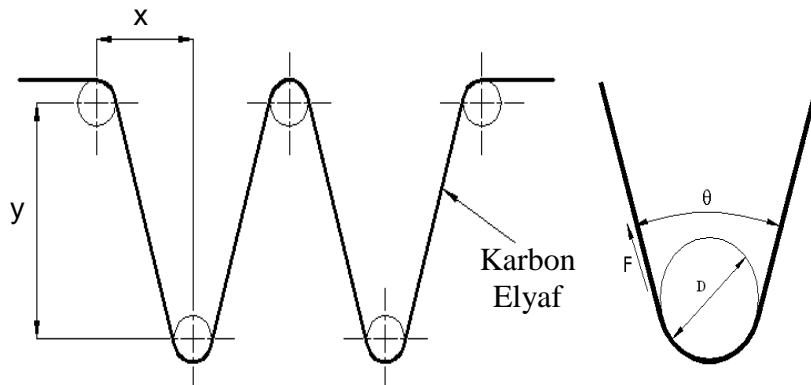
Literatür incelemesi yapıldığında, birçok çalışmanın yapay sinir ağları tabanlı bir model geliştirerek üretimde kullanılan lif demetinin dayanımının tahmini üzerine yapıldığı görülmüştür [1-3]. Örnek olarak; Furferi ve Gelli [1] lif demetlerini ileri-geri ilerleyerek yayma yöntemiyle teknisyenlerin demet dayanımının tahmininde kullanabilecekleri yapay sinir ağları tabanlı bir model geliştirmiştir. Majumdar ve Majumdar [4] pamuk liflerinin demet sayıları ve özelliklerine göre pamuk liflerinin kırılmasının tahmini ile ilgili model önermişlerdir. Önerdikleri bu model istatistik ve yapay sinir ağları tabanlıdır. Ucar ve Ertugrul [2] Sundukları çalışmalarında dokuma pamuk kumaşlarının makine ağzı ve çapına bağlı olarak tahmini için yapay zekâ – yapa sinir ağları tabanlı bir model önermişlerdir.

Bu çalışmada ise, elyaf sarma yöntemi ile üretilen ürünlerin dayanımını arttırmak amacı ile kullanılan karbon elyafın sarım esnasında maruz kaldığı sarım parametrelerine bağlı olarak mukavemet kaybının istatistiksel modelle tahmini amaçlanmaktadır. İstatistiksel modelin oluşturulmasında sarım esnasında toplanmış deneysel veriler kullanılmıştır.

Böylece elyaf sarma işlemi esnasında karbon elyafların dayanım özelliklerini etkileyen ön gerilme, sarım açısı gibi parametrelerin etkisinin tahmini yapılabilecek ve üretim aşamasına geçilmeden tasarım aşamasına veri toplanabilecektir.

## 2. ELYAF SARMA İŞLEMİNDE SARIM PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ

Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen elyaf sarma sisteminde sarım işlemleri farklı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.'de gösterilen elyaf sarım açısı ( $\theta$ ) ve ön gerilme kuvveti (F) parametrelerinin değiştirilmesi ile elde edilen toplam sekiz farklı koşul altında sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Sarım Parametreleri [5]

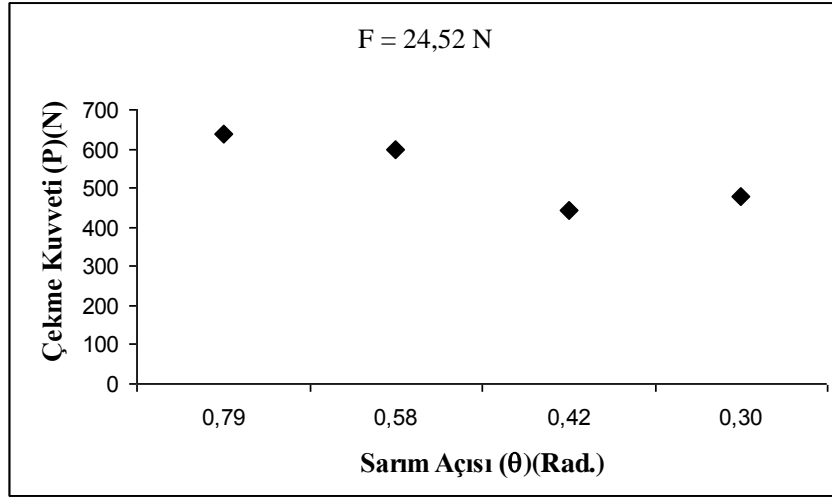
Bütün koşullar için, sarım işlemlerinde uygulanan parametre değerleri Tablo 1.'de verilmiştir. Farklı koşullar altında gerçekleştirilmiş sarım işlemleri ile elde edilen çekme numuneleri çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri sonucunda elde edilmiş çekme kuvvet (P) değerleri Tablo 1.'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kestirim Değerleri

Sarım Açısı (θ) (Rad)	Ön Gerilme Kuvveti (F) (N)	Max. Çekme Kuvveti (P) (N)
0,79	19,62	703,9
0,58	19,62	666,2
0,42	19,62	507,8
0,30	19,62	542,3
0,79	24,52	635,8
0,58	24,52	597,7
0,42	24,52	443,9
0,30	24,52	478,4

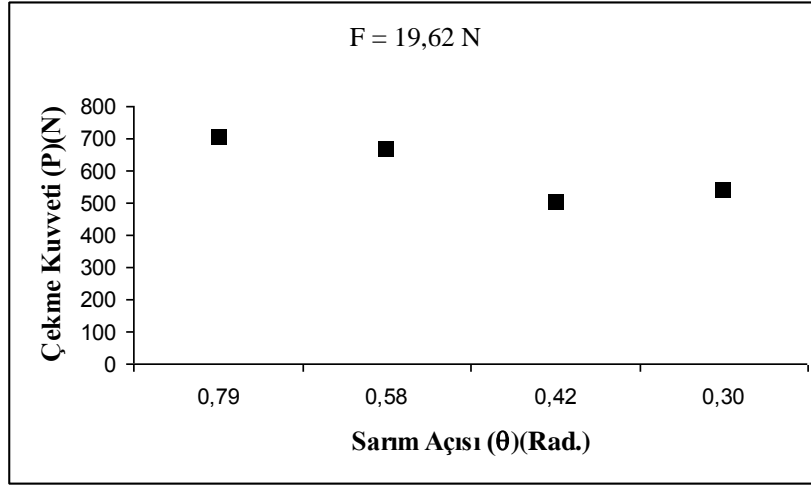
Tablo 1’de verilen çekme kuvveti (P) değerleri her koşul için çekme standardına göre uygun olarak kabul edilen farklı 15’er ölçümün aritmetik ortalaması dikkate alınmıştır.

Tablo 1’de verilen sarım açısı (θ) ve ön gerilme kuvveti (F) değerleri incelendiğinde sarım açısının (θ) 4 farklı değerinin 2 kez, ön gerilme kuvvetinin (F) 2 farklı değerinin 4 kez tekrarlandığı görülmektedir. Bu duruma ait en iyi modelin ortaya çıkarılabilmesine yardımcı olması amacıyla ön gerilme kuvvetinin (F) her bir değerine karşılık sarım açısının (θ), çekme kuvvetine (P) göre serpilme diyagramı Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir.



**Şekil 2.** F=24,52 N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Şekil 2’de gösterildiği gibi dört farklı sarım açısı (θ)’nın değerlerine karşılık ön gerilme kuvveti (F) parametresinin 24,52 N değerinde sabit tutulmasıyla elde edilmiş, sarım açısı değerlerine karşılık çekme kuvveti (P) değerlerinin serpilme diyagramı verilmiştir.



Şekil 3: F=19,62 N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Şekil 3'te gösterilen serpilme diyagramı ise ön gerilme kuvvetinin 19,62 N değerinde sabit tutulması ile elde edilen, sarım açısı değerlerine karşılık çekme kuvveti (P) değerlerinin serpilme diyagramını göstermektedir.

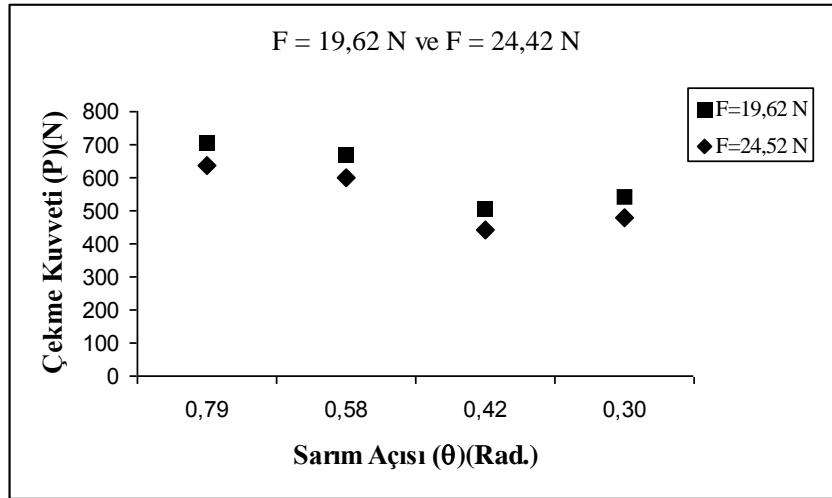
### 3. İSTATİSTİK MODELİN OLUŞTURULMASI VE IRDELEME

Sarım parametrelerinin belirlenerek modellenmesi sonucunda elde edilen serpilme diyagramlarının oluşturulması eğri uydurma işlemi yapılırken daha hassas değerlerin elde edilebilmesi için uygun bir fonksiyon seçiminde yardımcı olacaktır.

Şekil 2 ve Şekil 3'te verilen serpilme diyagramları incelendiği zaman, θ değerinin yaklaşık olarak Sinüs fonksiyonuna benzer bir dağılım sergilediği görülmektedir. Bu durumda istatistiksel eğri uydurma tekniklerinin yardımıyla, her iki durum için gösterilen noktalardan geçen bir eğri olarak Denklem (1) önerilebilir [6].

$$P = A + B \cdot \sin\left(\frac{\pi(\theta - C)}{D}\right) \quad (1)$$

Denklem 1, P değerinin θ'ya bağlı olduğu Fourier eğrisidir. Ancak denklem 1 sadece θ değişkenine bağlı bir denklemdir. Diğer yandan, iki farklı F değerlerinin dikkate alınması durumunda oluşan serpilme diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. F=19,62 N ve F=24.52 N için Sarılm Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Bu analizde oluşturulmak istenen, ön gerilme kuvveti (F) ve sarılm açısı (θ) değerlerine bağlı çekme kuvveti (P) değerlerinin tahminidir. Şekil 4 ve Tablo 1'den de görülebileceği gibi sabit sarılm açısı (θ) altında farklı ön gerilme kuvveti (F) değerleri kullanılarak gerçekleştirilen sarılm işlemlerinde ön gerilme kuvvetinin artırılması çekme kuvveti (P) değerlerinin azalmasına sebep olacaktır. Çünkü ön gerilme yükünün artması kullanılan karbon elyafın göreceği hasarı arttıracaktır. Bu durumda yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında P değeri ile F değeri arasında lineer ters orantılı bir ilişki olduğu görülebilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda denklem (1) yeniden düzenlenir ise denklem (2) elde edilir.

$$P = A.F + B.Sin\left(\frac{\pi(\theta - C)}{D}\right) \quad (2)$$

Burada çekme kuvveti (P) değerinin ön gerilme (F) ile lineer, sarılm açısı (θ) ile lineer olmayan (nonlinear) bir ilişki olduğu kabulü yapılarak denklem 2 önerilmiştir.

Denklem 2'de önerilen iki değişkenli nonlinear modelin parametre değerlerinin tahmini için Statistika istatistik paket programı kullanılmıştır [6]. Bu programda nonlinear regresyon modelinin parametre tahminleri için Gauss Newton yöntemi kullanılmıştır. Denklem 2'de verilen A, B, C, D parametrelerinin tahmini için standart olarak başlangıç değerleri A=1, B=1, C=1, D=1 olarak alınmıştır. Yapılan analiz sonucu Çekme Kuvveti (P) değerlerinin, ön gerilme (F) ve sarılm açısı (θ) değerlerine bağlı olarak % 87,31 açıklanabildiği görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre modelin elde edilen parametre tahminleri tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Parametrelerin Tahmin Değerleri [6]

Parametre	Tahmin
A	-7,17
B	836,80
C	65,22
D	4,22

Buna göre elde edilen model Denklem (3)'te gösterildiği gibi elde edilmiştir [6].

$$P = -7,17.F + 836,80.Sin\left(\frac{\pi(\theta + 65,22)}{4,22}\right) \quad (3)$$

Burada ön gerilme kuvvetinin çok düşük seçilmesi durumunda kullanılan karbon elyafın önceden belirlenen sarım yörüngesine oturması mümkün olmayacaktır. Bu durum sarım işleminin gerçekleşmesini engelleyecektir. Diğer bir yandan ön gerilme kuvvetinin çok yüksek seçilmesi durumunda da sarım esnasında karbon elyafın kopmasına neden olacağından bu durum da sarım işleminin gerçekleşmesini engelleyecektir.

Denklem 3'te tanımlanan diğer bir sarım parametresi de sarım açısıdır. Sarım açısının belirlenmesi aşamasında, sarım açısını oluşturan makara çapı ve makaralar arasındaki mesafeler dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak Denklem (3)'te verilen ön gerilme kuvveti ve sarım açısı değerlerinin uygun değerlerde seçilmesi çok önemlidir. Aksi takdirde verilen bu denklemden elde edilecek olan sayısal değerler anlamsız olacaktır.

**Tablo 3.** Spearman Korelasyon Katsayısı Kullanılarak Ön Gerilme Kuvveti (F) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi [7]

Yöntem	Parametre	Spearman Korelasyon Katsayısı
Non Parametrik	Ön Gerilme Kuvveti (F)	- 0,436
	Çekme Kuvveti (P)	

Tablo 3'te spearman korelasyon katsayısı kullanılarak hesaplanan ön gerilme kuvveti (F) ve çekme kuvveti (P) parametreleri arasındaki ilişki - 0,436 olarak belirlenmiştir. Elde edilen spearman korelasyon katsayısına göre ön gerilme kuvveti ile çekme kuvveti arasında negatif bir ilişki vardır. Ön gerilme kuvveti arttıkça karbon elyafın göreceği hasar artacağından dolayı çekme kuvveti ve dolayısıyla çekme gerilmesi düşecektir.

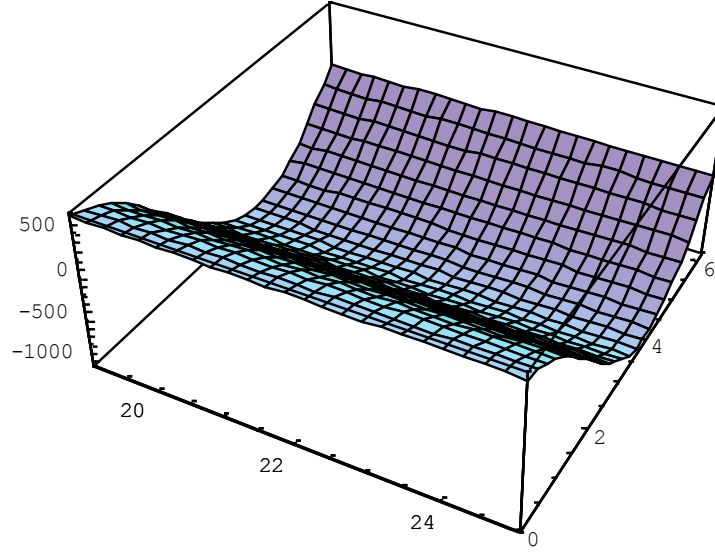
**Tablo 4.** Spearman Korelasyon Katsayısına Göre Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi [7]

Yöntem	Parametre	Spearman Korelasyon Katsayısı
Non Parametrik	Sarım Açısı (θ)	+ 0,781
	Çekme Kuvveti (P)	

Tablo 4'te spearman korelasyon katsayısı kullanılarak hesaplanan sarım açısı (θ) ve çekme kuvveti (P) parametreleri arasındaki ilişki + 0,781 olarak belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Elyaf sarma üretim yöntemiyle üretilecek olan tüplerin, basınçlı kapların veya borular yüksek basınç altında çalışması nedeniyle tasarım kriterleri önem arz etmektedir. Bu tür ürünlerin tasarımı ve üretimi çok hassas yapılmaktadır. Özellikle kırılğan yapıya sahip karbon elyaftan üretilen CFRP yapılı kompozit tüpler bu açıdan önemlidir. Sonuç olarak, elyaf sarım parametrelerindeki değişimler üretilecek olan ürünün mukavemetine direkt olarak etki etmektedir. Bu nedenle üreticinin sarım öncesi ürünün sahip olacağı dayanımı bilmesi veya tahmin etmesi son derece önemlidir.



Şekil 5. Sarım Açısı ( $\theta$ ) ve Ön Gerilme Kuvveti'ne (F) Bağlı Çekme Kuvveti (P) Yüzey Denklemi [8]

Elde edilen spearman korelasyon katsayısına göre sarım açısı ile çekme kuvveti arasında pozitif güçlü bir ilişki vardır. Sarım açısı arttıkça karbon elyafın maruz kalacağı eğilme gerilmelerinden dolayı göreceği hasar azalacağından dolayı çekme kuvveti ve dolayısıyla çekme gerilmesi artacaktır. Tahmin edilen P değerleri ile elde edilen yüzey Şekil 5'de verilmiştir. Üretilmesi hedeflenen ürünlerin tasarımı ve üretim sonrası elde edilmesi hedeflenen ürün dayanımının elde edilebilmesi için bir istatistiksel model önerilmiştir.

## 5. Referanslar

- [1.] Furferi, R. and M. Gelli, *Yarn Strength Prediction: A Practical Model Based on Artificial Neural Networks*. Advances in Mechanical Engineering, 2010.
- [2.] Ucar, N. and S. Ertugrul, *Predicting circular knitting machine parameters for cotton plain fabrics using conventional and neuro-fuzzy methods*. Textile Research Journal, 2002. **72**(4): p. 361-366.
- [3.] Ureyen, M.E. and H. Kadoglu, *Regression estimation of ring cotton yarn properties from HVI fiber properties*. Textile Research Journal, 2006. **76**(5): p. 360-366.
- [4.] Majumdar, P.K. and A. Majumdar, *Predicting the breaking elongation of ring spun cotton yarns using mathematical, statistical, and artificial neural network models*. Textile Research Journal, 2004. **74**(7): p. 652-655.
- [5.] Genc, G., N. Akkus, and E. Toptas, *The Theory Based and Experimental Determination of Dynamic Coefficient of Friction Between Aluminium Pulley and Continuous Carbon Fiber That Uses in Filament Winding Process*. Twelfth International Materials Symposium, 2008. **1**: p. 425-433.
- [6.] Statistica, *Data Analysis Software System*. 2001, StatSoft Inc.
- [7.] Statistics, S., *Data Analysis Software System*. 2005, IBM.
- [8.] Mathematica, *Data Analysis Software System*. 2004, Wolfram Research Inc.