

# Gemi Yapılarında Peridinamik Teorisinin Uygulama Alanları

Dr. Çağan Diyaroğlu<sup>a</sup> ve Dr. Erkan Öterkuş<sup>b</sup>

- Arizona Üniversitesi, Tucson / ABD, Doktora sonrası araştırmacı
- Strathclyde Üniversitesi, Glasgow / Birleşik Krallık, Doçent

## 1- Peridinamik Teorisine Giriş

Peridinamik (Peridynamic) teorisi ilk olarak Amerika'nın Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda araştırmacı Dr. S. A. Silling tarafından 2000 yılında ortaya atılmış oldukça yeni ve gelecek vaat eden bir metottür [1]. Peridinamik teorisinde, A. L. Cauchy tarafından yaklaşık 200 sene önce ortaya atılan klasik sürekli ortamlar mekaniğinin hareket denklemleri tekrar formüle edilmiş ve denklemlerin yapısında bulunan konuma bağlı türevler kaldırılarak sadece hacimsel integraller kullanılmıştır (Bkz. Şekil 1).

Malzeme üzerindeki herhangi bir noktanın hareket denklemleri

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) = \int_V \mathbf{f}(\mathbf{u} - \mathbf{u}', \mathbf{x} - \mathbf{x}') dV' + \mathbf{b}(\mathbf{x},t) \quad \text{Peridinamik Teorisi}$$

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b}(\mathbf{x},t) \quad \text{Klasik Teori}$$

Şekil 1 – Peridinamik teorisi ve klasik teori arasındaki fark

Peridinamik kelimesi Yunanca peri (yakın) ve dinamik (kuvvet) kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur. İsminden de anlaşılacağı gibi bu teoride herhangi bir noktanın ( $\mathbf{x}$ ) hareket denklemleri birbirini etkileyen iki noktanın etki ve tepki kuvvetlerinden ( $\mathbf{f}$  ve  $\mathbf{f}'$ ) oluşmaktadır (Şekil 2). Bu yüzden bu noktaların arasındaki etkileşime bağ (bond) adını veriyoruz.

# Peridynamics for Marine Structures Applications

Dr. Çağan Diyaroğlu<sup>a</sup> ve Dr. Erkan Öterkuş<sup>b</sup>

- University of Arizona, Tucson / USA, Post Doctoral Research Associate
- University of Strathclyde, Glasgow / UK, Associate Professor

## 1- Introduction to Peridynamic Theory

Peridynamic theory was first introduced by Dr. S. A. Silling at Sandia National Laboratories, USA, in the year of 2000. It is a state-of-the-art technique which is relatively new and promising tool [1]. It is basically re-formulation of classical continuum mechanics theory introduced by A. L. Cauchy more than 200 years ago. The volumetric integral, which does not include spatial derivatives, is used in its formulations (Fig. 1).

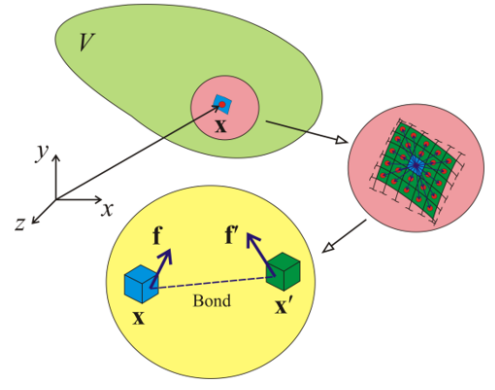
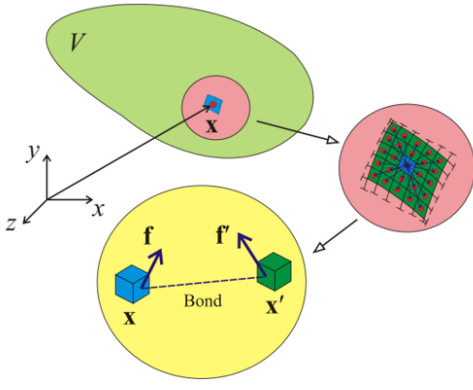
The Equation of Motion of any point on a material

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) = \int_V \mathbf{f}(\mathbf{u} - \mathbf{u}', \mathbf{x} - \mathbf{x}') dV' + \mathbf{b}(\mathbf{x},t) \quad \text{Peridynamic Theory}$$

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b}(\mathbf{x},t) \quad \text{Classical Theory}$$

Fig. 1 – Comparison of Peridynamic and classical theories

The origin of Peridynamic comes from the combination of greek words Peri (near) and dynamic (force). In this sense, the equation of motion of a point ( $\mathbf{x}$ ) is composed of action and reaction forces ( $\mathbf{f}$  and  $\mathbf{f}'$ ) of two points that interact with each other (Fig. 2). Thus, the interaction between material points are called as a bond.

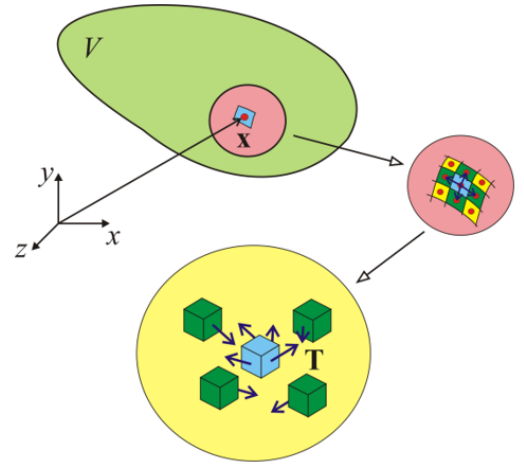
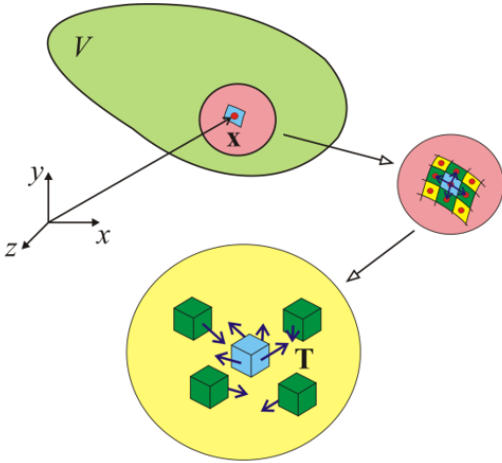


Şekil 2 – Malzemedeki herhangi bir noktaya etki eden kuvvetlerin Peridinamik teorisinde gösterimi [2]

Fig. 2 – The representation of forces, which influence a material point, in Peridynamic theory [2]

Peridinamik teorisinin avantajı hareket denklemindeki integral ifadesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3’de de görüleceği üzere klasik teori de bir noktaya etki eden kuvvetler hesaplanırken sadece kendisine en yakın noktalar hesaba katılmaktadır. Peridinamik teorisinde ise sadece kendisine en yakın noktalar değil aynı zamanda kendinden uzak noktaların etkisi de dikkate alınmaktadır (bkz. Şekil 2).

The main advantage of Peridynamic theory is the integral form of its equation of motion. The bond forces which influence a material point constitute from only nearest neighbour points of that point in classical theory, as shown in Fig 3. In Peridynamic theory, however, not only the nearest neighbors but also distant points have also effect to a point of interest (Fig. 2).



Şekil 3 – Klasik Sürekli Ortamlar Mekaniğinde malzemedeki herhangi bir noktaya etki eden kuvvetlerin (T) gösterimi [2]

Şekil 3 – The forces (T) that interact with a material point in classical continuum theory [2]

Peridinamik teorisindeki denklemlerin yapısı (hacimsel integral) özellikle süreksizlik olan ortamlarda; mesela iki farklı malzeme arasındaki ara yüzeylerde, çatlak ve hasar gibi durumlarda (bkz.

Peridynamic theory is superior to other classical methods because of its form (volumetric integral) of fundamental equations. The best advantage takes place in cases which include discontinuity such as the interface between two different materials, cracks and damage appearance (Fig. 4) in a material or when analyzing shock problems.

teorisini diğer klasik yöntemlere göre oldukça üstün kılmaktadır.



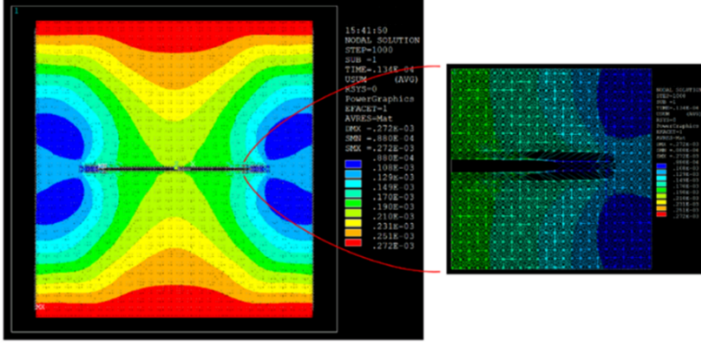
Fig. 4 – Damage on the ship structures in the event of an accident [3] [4]

Şekil 4 – Herhangi bir kaza anında gemilerde oluşan hasarlar [3] [4]

Peridinamik teorisinin denklemleri sonlu elemanlar ağına (finite element mesh) gerek kalmadan nümerik olarak modellenebileceğinden dolayı kırılma gibi problemlerin analizi tekrar ağ oluşturmaya (remeshing) gerek kalmadan kolayca yapılabilir. Ayrıca bu metotta malzemedeki bir çatlak veya hasar sadece iki nokta arasındaki kuvvetleri sıfırlayarak kolayca modellenebilir (Şekil 5). Peridinamik teorisinin bir avantajı da denklemlerin içinde doğal olarak bulunan uzunluk (length – scale) parametresidir. Bu parametre sayesinde değişik ölçeklerdeki (multi – scale) problemler, örneğin mikro ölçekli moleküler yapılar ile makro düzeydeki mühendislik yapıları kolayca modellenip, birleştirilebilir (coupling).

Since the equation of motion of Peridynamic theory can be constructed numerically in a meshless form, there is no need to use remeshing strategies in the analysis of crack problems. Furthermore, the cracks or damage which appeared in a material can be modeled easily by canceling out forces between any two material points (Fig. 5). One of the advantage of Peridynamic theory is the length – scale parameter which inherits in the governing equations. In light of this parameter, many multi –scale problems can be handled very easily. The micro scale molecular systems and the macro scale engineering structures can be modeled easily as well as the coupling procedures can be applied between different scales.

Günümüzde nano seviyede elektronik cihazlar oldukça yaygın kullanılmaya başlamış ve her alanda çokça karşımıza çıkmaktadır; örneğin cep telefonlarındaki elektronik çipler gibi. Bu cihazların analizinde özellikle klasik lokal yöntemler haricinde Peridinamik gibi uzunluk parametresi içeren lokal – olmayan (non - local) teoriler kullanılmalıdır.



Şekil 5 – Peridinamik teorisinde bir plakadaki çatlığın modellenmesi [5]

## 2- Gemi Yapıları Uygulama Alanları

Peridinamik teorisinin gemi yapılarındaki uygulama alanlarına şu şekilde örnekler verilebilir:

### Sualtı Şok Etkisinin Gemi Yapılarına Etkisi ve Analizi

Gemi yapılarına, su altı patlaması gibi, şok etkilerinin yaptığı hasarlar sonlu elemanlar (FE) yöntemi gibi birçok sayısal (nümerik) teknik kullanılarak incelenmiştir. Bu sayısal çalışmalar deneysel yöntemlerle de desteklenerek araştırmacılar her zaman daha yeni ve iyi bir yöntemi aramışlardır. Şimdiye kadar gerçekleştirilen bu nümerik çalışmalar sadece klasik sürekli ortamlar teorisine bağlı sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir ki bunlar da birçok yönden istenilen sonucu sağlayamamışlardır.

Recently, nano technology has become widespread around the world and nano scale electronic devices can be used in many applications, i.e. electronic chips in our mobile phones. In the analysis of these devices, not only the local theories but also non – local theories, which incorporate a length-scale parameter, should be taken into account as in the Peridynamic theory.

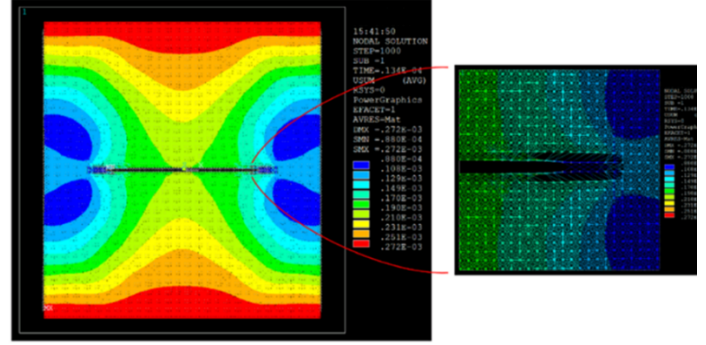


Fig. 5 – The crack model in Peridinamik theory [5]

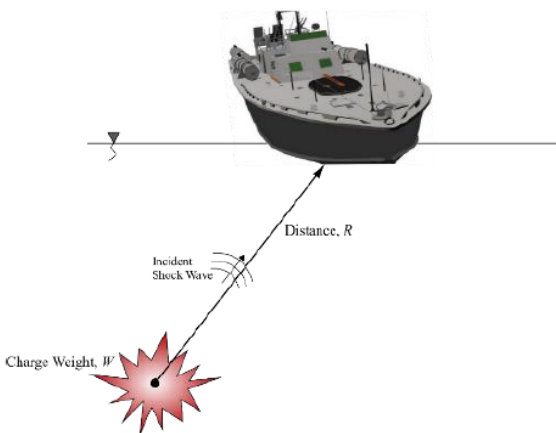
## 2- Marine Structures Applications

Some of the examples that can be considered as the applications of Peridinamik theory in marine structures are as follows:

### Analysis of Underwater Shock Response of Marine Structures

The failure and damage characteristics of ship structures under shock loading, i.e. underwater explosion, are analyzed with many numerical techniques by researchers and mostly the finite element method is used. These numerical techniques are also accompanied with experimental studies which allow researchers to always find better, new and promising methods. So far, the numerical studies are based only on finite element method which uses classical continuum mechanics theory. However, the desired results can not always be obtained.

Günümüzde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin hareket denklemleri klasik teoriye (giriş kısmında belirttiğimiz Cauchy' nin hareket denklemleri) bağlıdır ki bunlar da hasarın tespiti, analizi ve zamanla çatlak gibi oluşumların ilerlemesinin tespiti yönünden oldukça sorunludur. Çünkü çatlak veya hasar gibi durumlarda konuma bağlı türevlerden oluşan hareket denklemleri tekilliğe doğru yakınsar ki bunların çözümü için ilave kinematik denklemler ve/veya hasar ilerleme (damage evolution) denklemleri gereklidir. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminde darbenin yaptığı hasarın tespiti sonlu elemanlar ağına (mesh) karşı oldukça hassastır ve doğru bir şekilde gerçeğe yakın analizi oldukça zordur. Peridinamik yöntemi ise denklemlerinin yapısı gereği hasarın analizinde ve çatlağın ilerlemesinde herhangi ilave kinematik denklemlere ihtiyaç duymaz çünkü süreksizlik peridinamik denklemlerinin kendi yapısında doğal olarak bulunabilmektedir. Ayrıca Peridinamik teorisinin nümerik modellenmesi sonlu elemanlar ağı kullanılmadan (meshless) yapıldığından dolayı, ağa bağlı herhangi bir olumsuz etki ile karşılaşmaz ve analizi oldukça kolaydır. Şekil 6'da gösterildiği gibi suyun altında oluşmuş herhangi bir patlama düşünelim ve bu patlamanın sonucunda oluşan şok dalgaları gemi yüzeyine doğru hızla küresel dalgalar şeklinde ilerlesin.



Şekil 6 – Su altında patlamanın temsili gösterimi [6]

The derived equations of finite element method, which is currently used, are based on classical theory. Thus, they are inherently controversial in the event of damage and/or crack occurrence, propagation and their analysis. In these cases, spatial derivatives of equation of motion converge to singularity which has no meaning physically thus kinematic and/or damage evolution relations should be incorporated to the analysis. Moreover, FE analysis greatly suffers from mesh sensitivity in impact analyses and it is challenging to obtain reasonable results. On the other hand, the governing equations of Peridynamics are in the form of integro – differential equations, which naturally incorporates damage into the structure, and no additional equations are needed. Furthermore, its numerical implementation is done by meshless approach which results in no unrealistic energy dissipations and their analyses are quite simple. As in the Fig. 6, if any explosive is detonated under the sea which is well below the ship surface, the spherical shock waves instantly propagate through the ship surface.

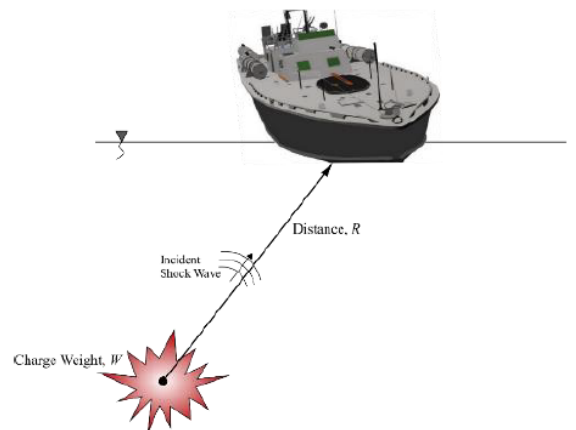


Fig. 6 – Schematic representation of underwater explosion phenomena [6]

İlerleyen dalgalar gemi yüzeyi ile etkileşime geçince çeşitli hasar ve çatlaklara sebebiyet verir. Gemi yüzeyinin Şekil 7’ de gösterilen şekilde kompozit, çok katmanlı üst üste bindirilmiş tabakalardan (laminat) oluştuğunu varsayalım.

Whenever shock waves interact with the ship surface, several damage and cracks emerge on it. The material of a ship is laminated composite structure which is composed of many laminas stacked on top of each other.

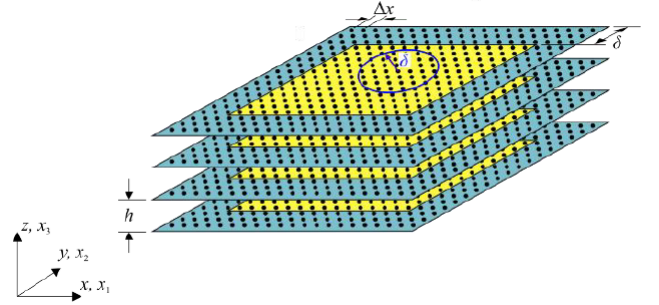
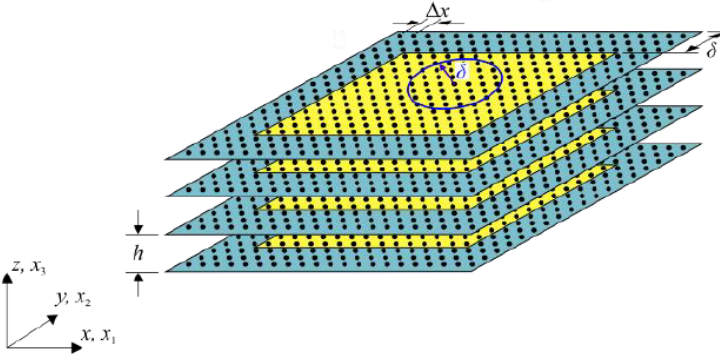
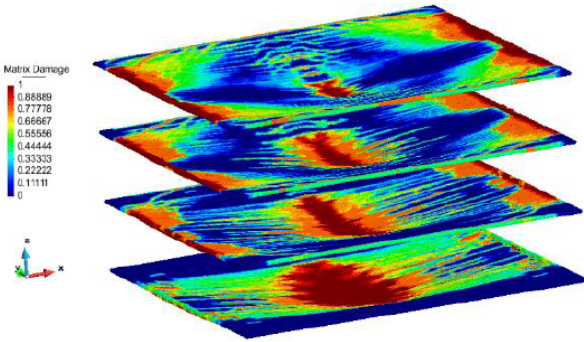


Fig. 7 – 4- ply composite laminate [6]

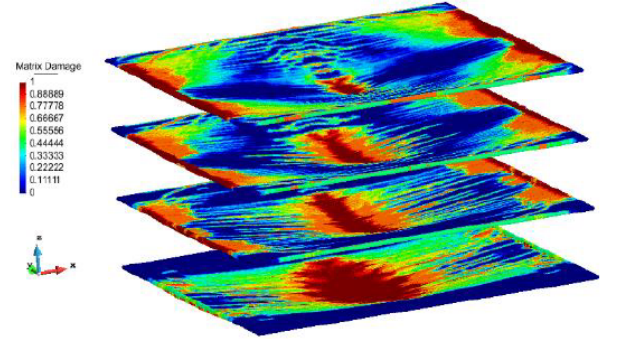
Şekil 7 – 4 katmanlı kompozit tabaka (laminat) [6]

The damage that is caused by impact of shock waves can be evaluated and analyzed by Peridynamic theory. Fig. 8 shows several damage characteristics and results of composite laminates which is predicted by Peridynamic theory.

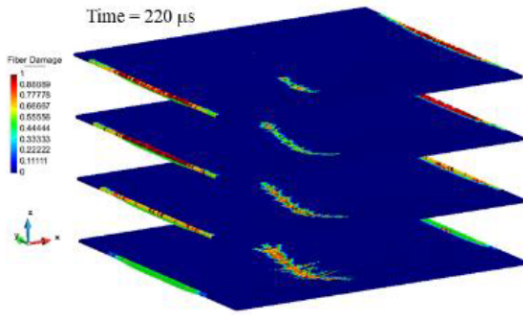
Şok dalgalarının bu tabakaya darbesi sonucu oluşan hasarlar Peridinamik teorisi tarafından kolayca tespit edilip incelenebilir. Şekil 8’de Peridinamik analizleri sonucu tespit edilen çeşitli hasarlar gösterilmektedir.



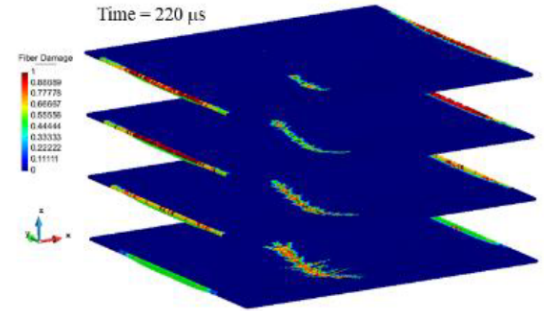
a) Kompozit malzemenin PEEK matrisinde oluşan hasar



a) Damage of PEEK matrix in a composite material



b) Kompozit malzemenin karbon fiberlerinde oluşan hasar



b) Damage of carbon fibers in a composite material

Şekil 8 - Şok dalgasının temasından 220 μs sonra kompozit malzemede oluşan hasar [7]

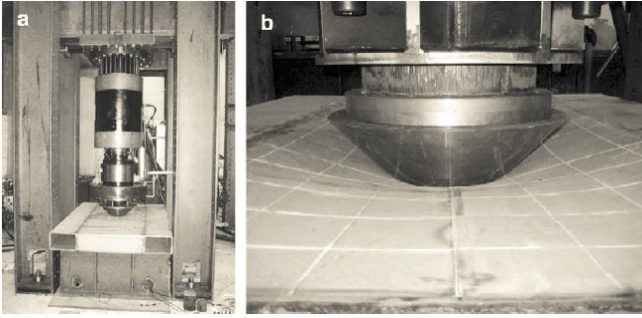
Fig. 8 – Damage results at the end of 220 μs

## Karaya Oturma ve Çarpma gibi Kazalarda Oluşan Hasarın Tespiti ve Analizi

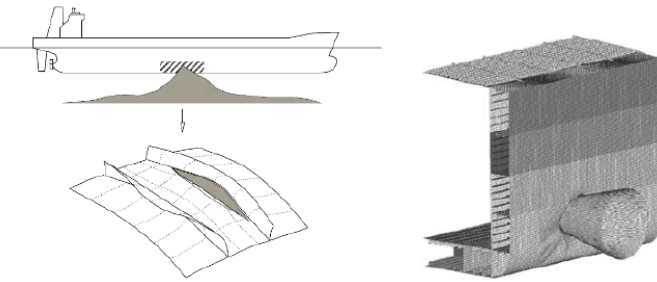
Gemi kazaları insan hataları, teknik sorunlar veya kötü hava koşulları neticesinde ortaya çıkabilmektedir. Bu kazalar iki geminin çarpışması, bir geminin offshore yapısına çarpması veya karaya oturma şekillerinde görülebilmektedir. Sonuç olarak istenmeyen ve insan hayatına mal olan veya denize dökülen yakıtın yayılması sonucu oluşan çevresel etkileri olabilmektedir. Bu gibi hasarların tespitinde ve analizinde Peridinamik teorisi etkin bir şekilde kullanılabilir. Yapılan analizin sonuçları çeşitli deneysel verilerle karşılaştırılabilir. Şekil 9a'da koni şeklinde katı (rijid) bir yapının ince bir plakaya etkisi gösterilmiştir. Burada koni şeklindeki yapı geminin yumru başını (bulbous bow) ve ince levhada diğer bir geminin yüzeyini temsil etmektedir. Yada benzer bir şekilde koni şeklindeki rijid yapıyı herhangi bir kaya ya da deniz tabanı olarak da düşünebiliriz (bkz. Şekil 9b).

## The Evaluation and Analysis of Damage in the Event of Ship Grounding and Collision

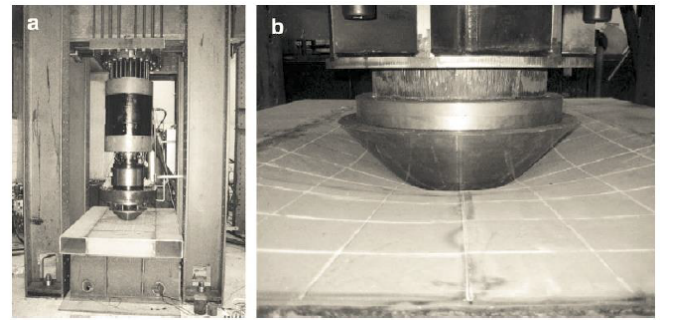
Accidents can happen at any time due to human error, technical problems or harsh environmental conditions. For the ships, accidents may occur in several forms such as collision of two ships, collision of a ship with a flexible offshore structure or grounding phenomenon. All of these may result in undesirable and catastrophic consequences including human life losses, environmental problems due to oil spill, etc. The consequences and damage characteristics of these phenomena can effectively be analysed with Peridynamic theory. The results of those analyses can be compared with experimental studies. The impact of rigid conic structure to a thin plate is shown in Fig. 9a. The conic striking object can be assumed as bulbous bow of ship and thin plate is the representative of the ship surface. In a similar manner, the rigid structure may be assumed as sharp rock or seabed topology (Fig. 9b).



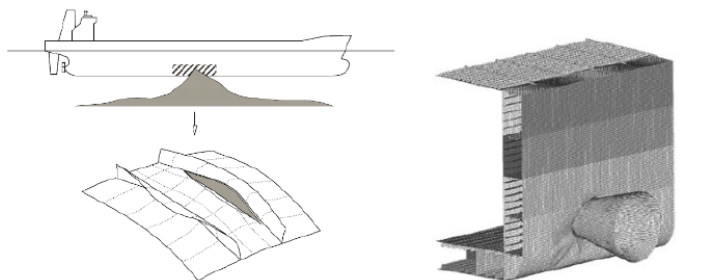
a) Rijid koni ve levhadan oluşan deneysel düzenek



b) Karaya oturma ve çarpışmanın temsili gösterimi

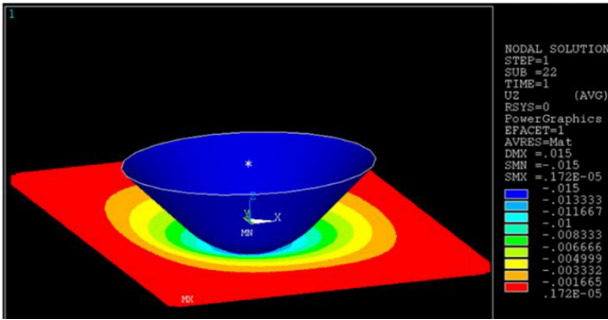
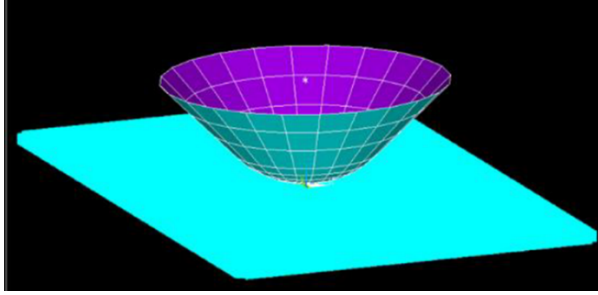


a) Experimental setup of indenter mechanism and a cone shape indenter acting on a plate



Şekil 9 [8] [9]

Şekil 9a' da gösterilen deneysel çalışma, Peridinamik teorisi ile nümerik olarak analiz edilmiştir (Şekil 10). Yapılan çarpma analizi sonucunda elde edilen yer değiştirmeler, sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır ve gayet makul sonuçlar elde edilmiştir. Peridinamik teorisinin, klasik sonlu elemanlar yöntemine göre avantajı yapıda hasar ve çatlakların ortaya çıkması ile birlikte başlamaktadır. Bu çalışma bu yönde halen devam etmektedir.



Şekil 10 – Rijid konik yapının gemi yüzeyini temsil eden ince plakaya darbesinin Peridinamik analizi ve bu etkinin sonucunda oluşan yer değiştirmelerin gösterimi [5]

### Akışkan ile Katı Yapının Etkileşimi

Akışkan ile katı yapıların etkileşimi birçok hava, uzay ve gemi yapılarının analizinde fazlaca kullanılmaktadır. Literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve bu bağlamda Peridinamik teorisi de gerçek sonuçları yakalamada oldukça yeteneklidir. Şekil 11'de ise bir beton yapının içinde bulunan patlayıcı malzemenin patlaması sonucu oluşan gaz halindeki şok dalgalarının beton yapıya etkisi gösterilmektedir.

### b) Ship grounding and collision of rigid bulbous bow

Fig. 9 [8] [9]

The experimental impact work shown in Fig. 9a, is studied with Peridynamic theory numerically (Fig. 10). The evaluated displacement results are compared with FE method and they are found as in agreement with each other. On the other hand, the superiority of Peridynamic theory, as compared to classical FE method, takes place whenever cracks and damage emerge in a material. This work is still in progress.

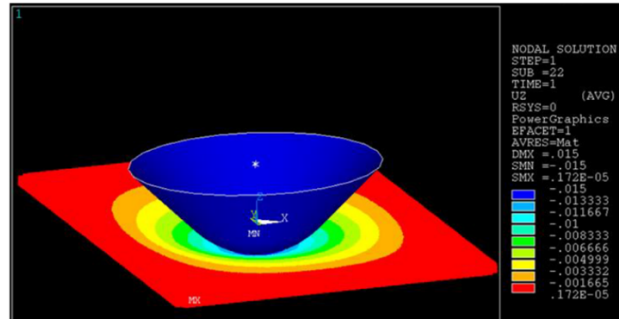
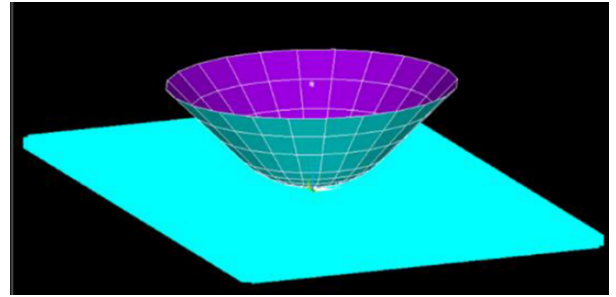


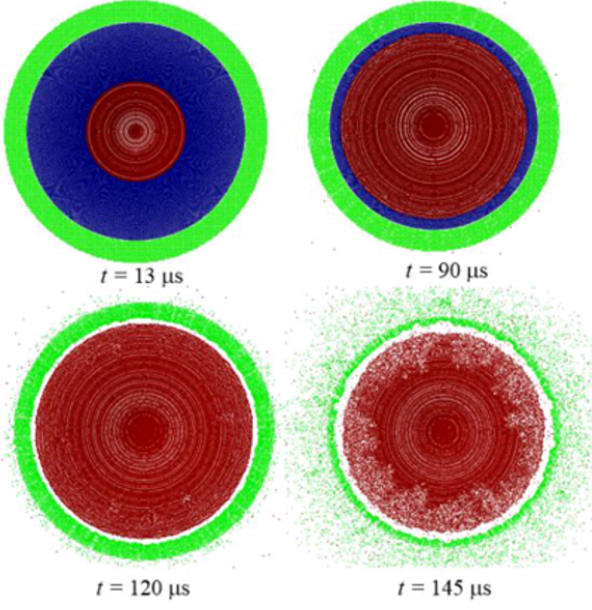
Fig. 10 – The impact of a conical shaped rigid target to a thin plate and their Peridynamic results in the form of displacements [5]

### Fluid Structure Interaction

The Fluid-structure interactions (FSI) exist especially in aerospace and marine related phenomena and so on. There have been many studies already done in the literature and PD theory is quite capable of capturing actual phenomena in this regard. In Fig. 11, the impact and interaction of gas shock waves to a



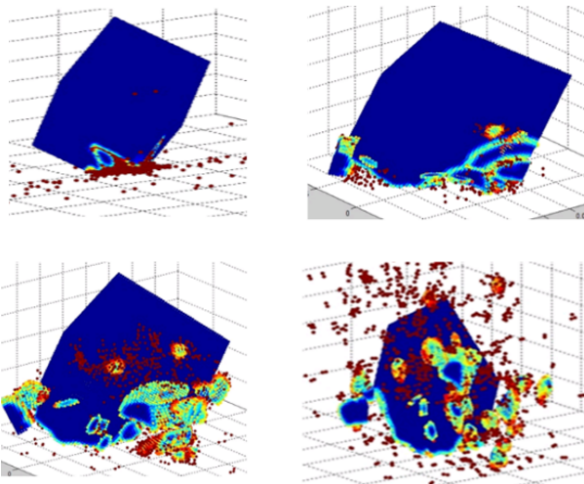
Bu analiz sonlu elemanlar ağı kullanılmadan (meshless) Peridinamik yöntemi ile gayet kolay ve etkin bir şekilde yapılmıştır.



Sekil 11 – Akışkan – katı etkileşiminin Peridinamik yöntemi ile analizi [10]

#### Buz Parçasının Herhangi bir Katı Yüzeyle Darbesi

Gemi yapılarının buz dağı gibi yapılarla etkileşiminin analizi oldukça önemli ve ilgi çekicidir. Bu bağlamda Peridinamik teorisi etkin bir şekilde kullanılabilir. Şekil 12’de Peridinamik analizi sonucu herhangi bir kübik buz kütesinin rijid yüzeyle etkileşimi ve dağılması gösterilmektedir.



Sekil 12 – Buz kütesinin rijid bir yüzeyle etkileşiminin Peridinamik analizi

concrete structure after detonation of an explosive material are shown. This work was carried out rather simply with the help of meshless approach in Peridynamic theory.

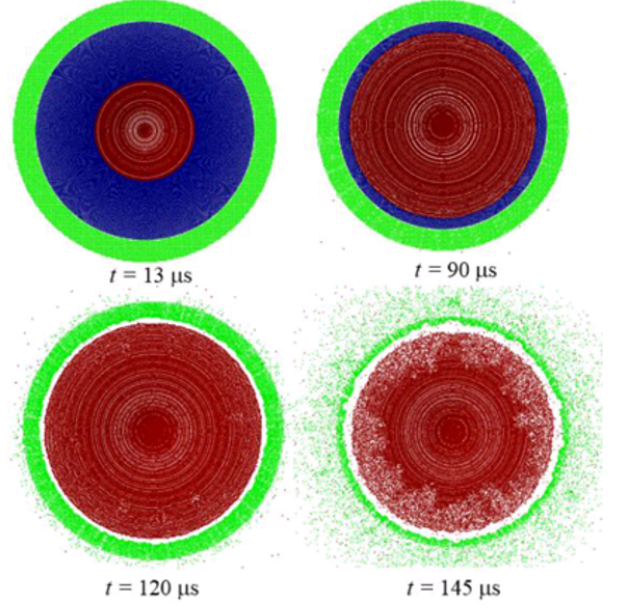
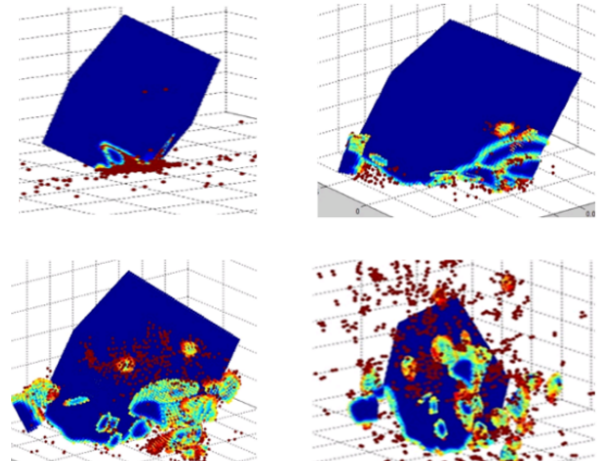


Fig. 11 – Peridynamic work on FSI [10]

#### Impact modeling of an Ice Structure on the Rigid Surface

The computer simulation of ice impact phenomena acting on a marine structures, such as the interaction between iceberg and a ship structure, has critical importance as well as it is very challenging. Hence, one may take advantage of a Peridynamic theory. As a preliminary work, the PD model of an ice cube was generated and its impact to a rigid target was studied as shown in Fig. 12, in which the ice cube was modelled in a brittle sense.



## Kaynaklar - References

- [1] S. A. Silling, "Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 48, no. 1, pp. 175–209, Jan. 2000.
- [2] E. Madenci and E. Oterkus, *Peridynamic Theory and Its Applications*. New York, NY: Springer New York, 2014.
- [3] J. Konrad, "Ship Disasters At Sea – Photos of Maritime Destruction," 2008. [Online]. Available: <http://gcaptain.com/disaster-at-sea-photos-of-maritime-destruction/>. [Accessed: 23-Oct-2017].
- [4] P. Hancock, "Recurring Nightmare: 1999 Collision of Norwegian Dream," *Shipwreck Log*, 2015. [Online]. Available: <https://www.shipwrecklog.com/log/2015/10/recurring-nightmare-1999-collision-of-norwegian-dream/>. [Accessed: 23-Oct-2017].
- [5] C. Diyaroglu, "Peridynamics and Its Applications in Marine Structures," University of Strathclyde, 2016.
- [6] C. Diyaroglu, E. Oterkus, D. De Meo, and E. Madenci, "Peridynamic Modelling of Underwater Shock Response of Marine Composite Structures," in *USNCCM Conference*, 2015.
- [7] C. Diyaroglu, E. Oterkus, E. Madenci, T. Rabczuk, and A. Siddiq, "Peridynamic modeling of composite laminates under explosive loading," *Compos. Struct.*, vol. 144, 2016.
- [8] H. S. Alsos and J. Amdahl, "On the resistance to penetration of stiffened plates, Part I – Experiments," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no.

Fig. 12 – Peridynamic simulation of an ice cube impact to a rigid target

- [9] A. Klanac, T. Duletic, S. Ehlers, F. Goerlandt, and D. Frank, "Environmental Risk of Collision for Enclosed Seas: Gulf of Finland, Adriatic, and Implications for Tanker Design," in *5th International Conference on Collision and Grounding of Ships, Espoo*, 2010.
- [10] C. Diyaroglu, D. De Meo, and E. Oterkus, "A Computational Framework for Underwater Shock Response of Marine Structures," in *5th International Conference on Marine Structures MARSTRUCT*, 2015.