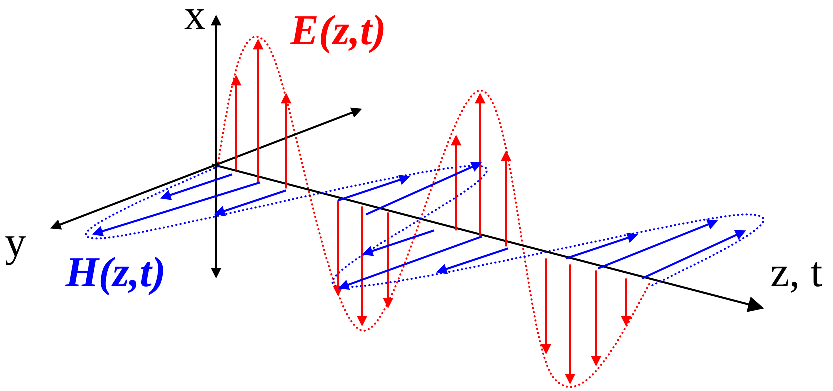
Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü

FZM210 Dalgalar ve Optik

Prof. Dr. Hüseyin Sarı

İlerleyen Dalgalar (1/2)



Bu bölümü bitirdiğinizde,

- İlerleyen dalga denklemi,
- Dalga denkleminin çözümü,
- Enine ve boyuna dalgalar
- Faz ve grup hızları
- Yansıma ve geçiş
- Empedans
- Dalganın taşıdığı enerji ve güç

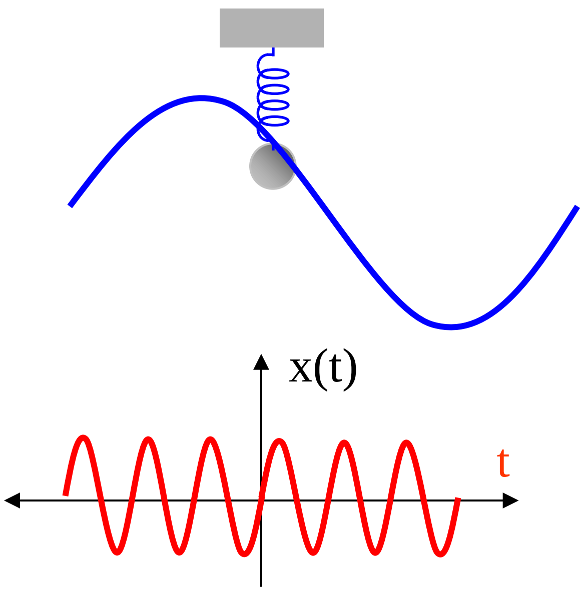
konularında bilgi sahibi olacaksınız.

İçerik

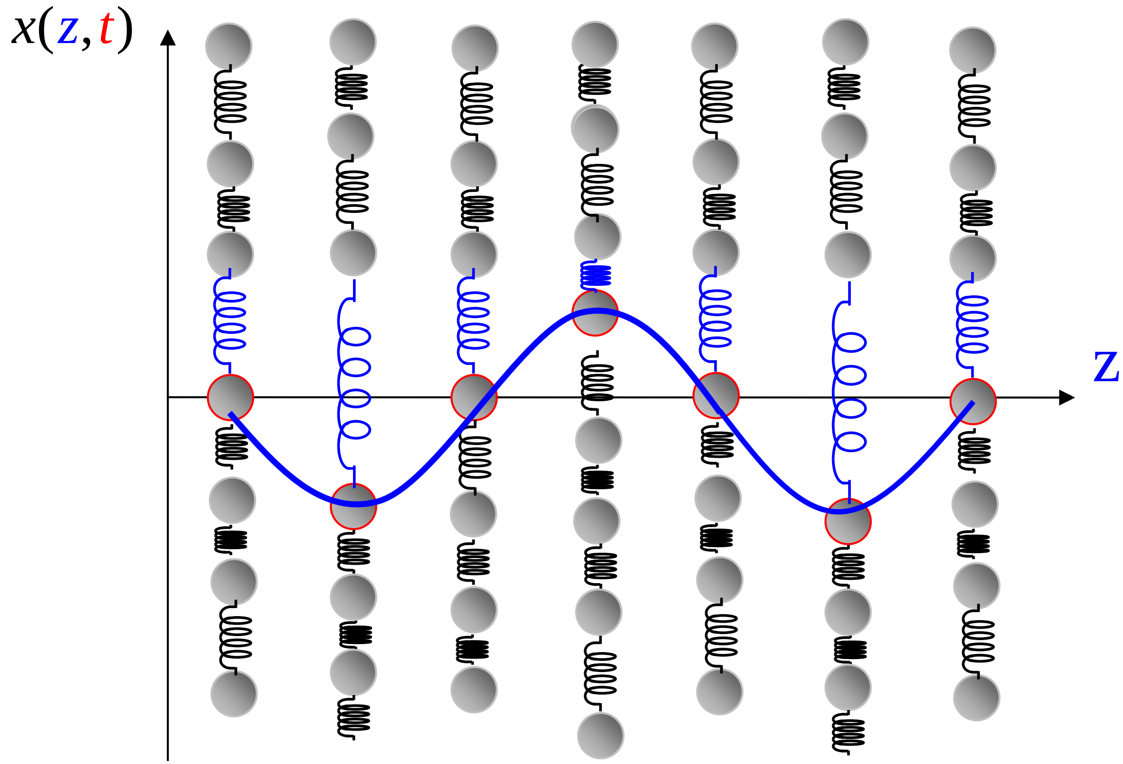
- Dalga Hareketi
- Dalgaların Sınıflandırılması
- İlerleyen Dalga Denklemi
- Faz ve Grup Hızları
- Enerji ve Güç

Bu Derste Neler Yapacağız?

- **Salınım (Oscillation):** Bir cismin denge noktası etrafındaki hareketi
- **Dalga (Wave):** Etkileşimde olan salınım hareketinin kollektif hareketi (Toplu salınımların uyumlu hareketi)

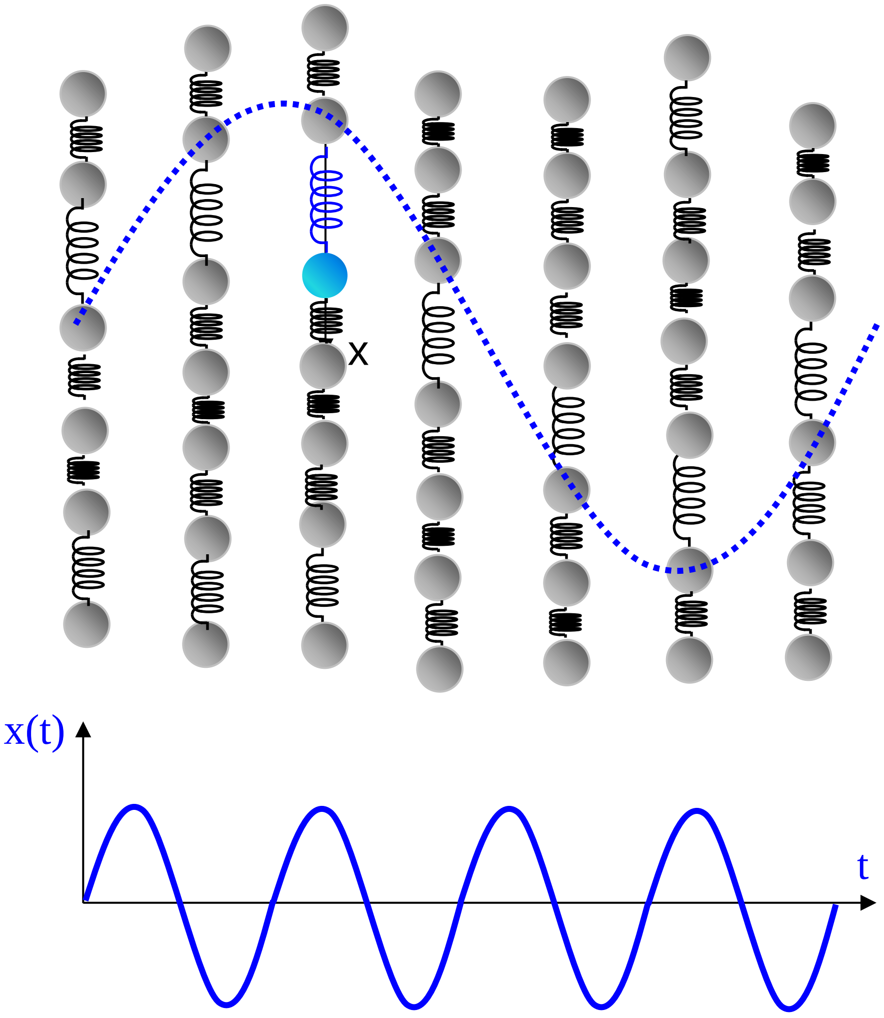


Salınım

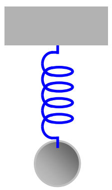


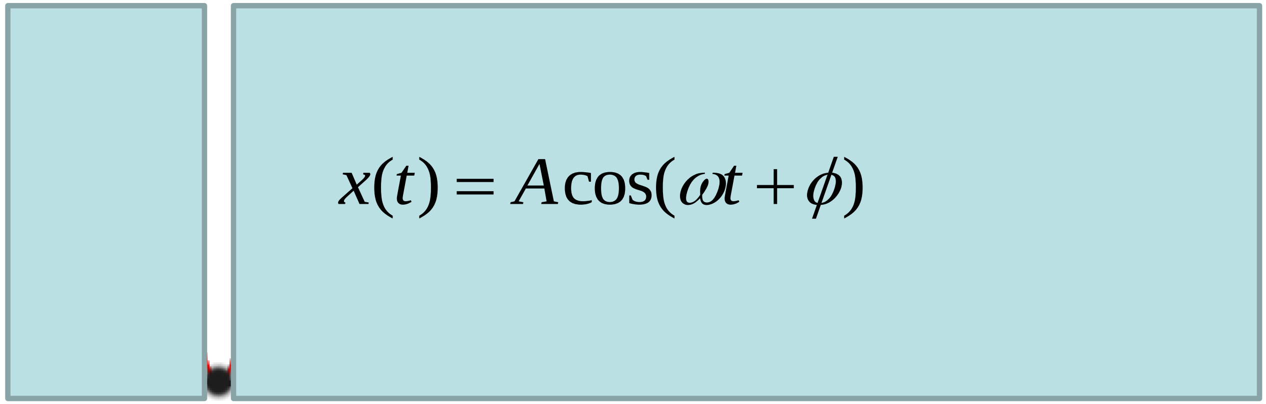
Dalga

Örgü Titreşimi-Enine Dalga



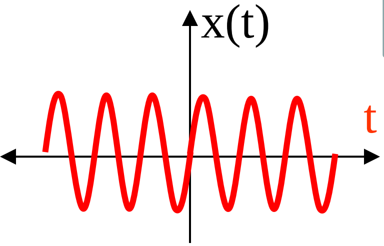
İlerleyen Dalga-Konum sabit, zamana göre değişim

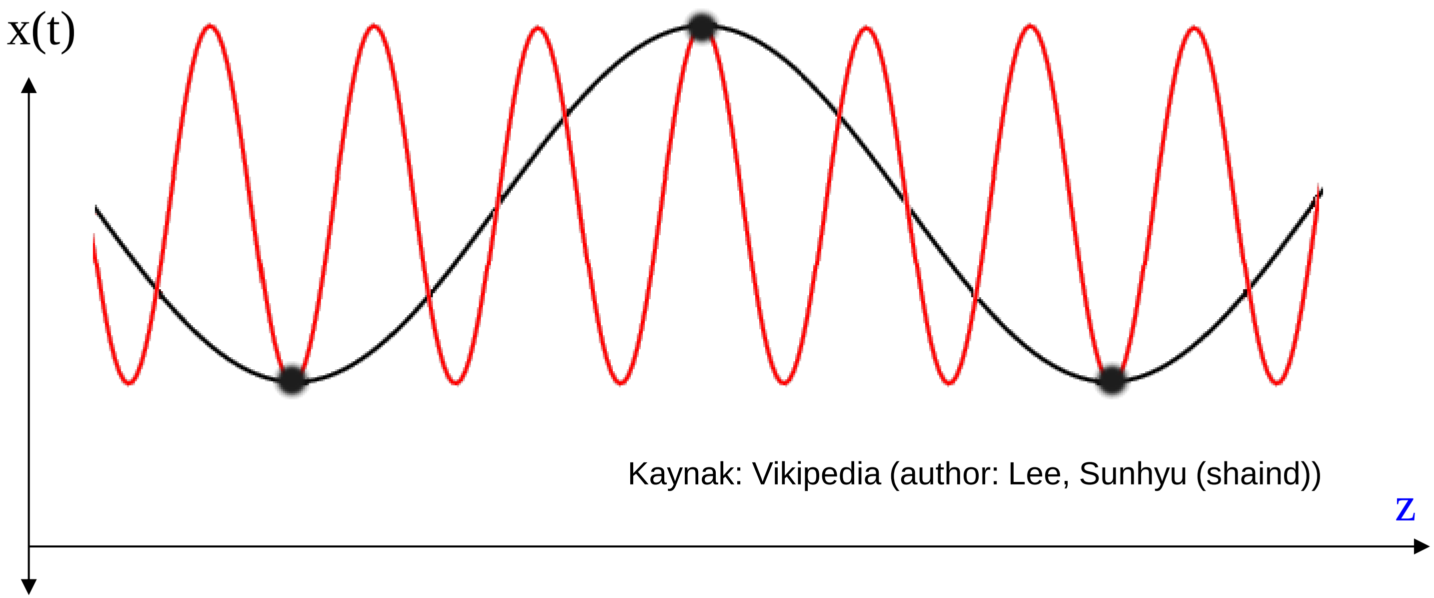




$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

Kaynak: Vikipedia (author: Lee, Sunhyu (shaind))

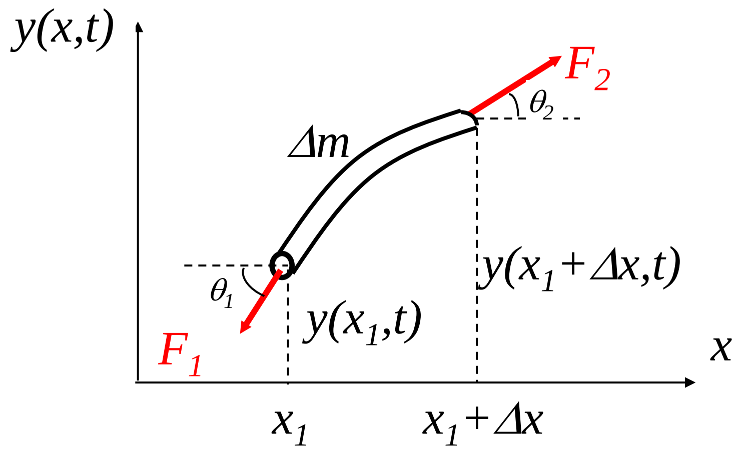


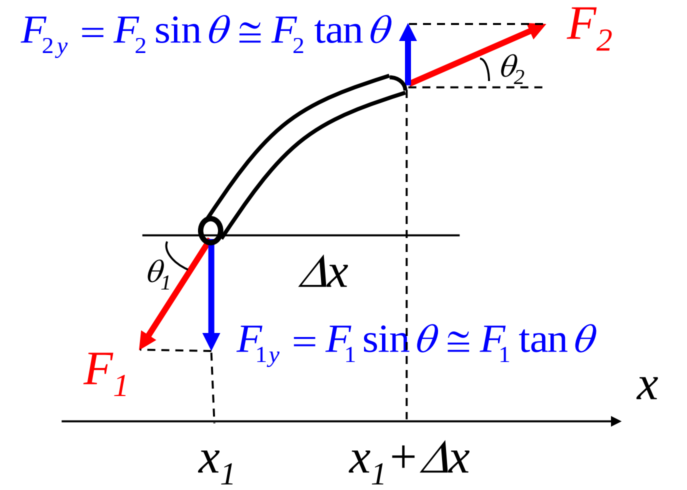


Kaynak: Vikipedia (author: Lee, Sunhyu (shaind))

Dalga Denklemi-1

Kütlesi Δm ve yoğunluğu μ olan aşağıdaki ipi ele alalım. İpte oluşturulmuş ilerleyen enine dalgayı düşünelim.





İpte sadece enine dalga olduğu varsayıldığı için x yönünde net kuvvet sıfırdır.

$$\sum F_x^{net} = 0$$

$$\sin\theta \cong \tan\theta \qquad \tan\theta = \frac{dy}{dx}$$

$$F_y = F\sin\theta \cong F\tan\theta \cong F\left.\frac{dy}{dx}\right|_x$$

İpi y yönünde hareket ettiren net kuvvet:

$$F_y^{net} = (\Delta m)a = (\Delta m)\frac{d^2y}{dt^2} = F_{2y} - F_{1y} \cong F\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - F\left.\frac{dy}{dx}\right|_x$$

Her tarafı Δx'e bölersek:

$$\frac{1}{\Delta x}\Delta m\frac{d^2y}{dt^2} \cong \frac{1}{\Delta x}\left(F\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - F\left.\frac{dy}{dx}\right|_x\right) = F\left(\frac{\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - \left.\frac{dy}{dx}\right|_x}{\Delta x}\right)$$

Dalga Denklemi-2

$$\frac{1}{\Delta x}\Delta m\frac{d^2y}{dt^2} \cong \frac{1}{\Delta x}\left(F\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - F\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x}\right) = F\left(\frac{\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x}}{\Delta x}\right)$$

İpin yoğunluğu:

$$\mu \equiv \frac{\Delta m}{\Delta x}$$

$$\lim_{\Delta x\to 0}\left(\frac{\Delta m}{\Delta x}\right)\frac{d^2y}{dt^2} = F\left(\frac{\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x}}{\Delta x}\right)$$

$$\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x}}{\Delta x} \cong \frac{d^2y}{dx^2}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{F}{\mu}\left(\frac{\left.\frac{dy}{dx}\right|_{x+\Delta x} - \left.\frac{dy}{dx}\right|_{x}}{\Delta x}\right) = \frac{F}{\mu}\frac{d^2y}{dx^2}$$

Ödev-1:

F/μ'nün hızın karesi boyutunda olduğunu gösteriniz.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{F}{\mu}\frac{d^2y}{dx^2}$$

$$\left[\frac{F}{\mu}\right] = \frac{\left[MLT^{-2}\right]}{\left[ML^{-1}\right]} = \frac{\left[L^2\right]}{\left[T^2\right]} = \left[\frac{L^2}{T^2}\right] = \left[v^2\right]$$

(1Boyutta) Dalga Denklemi: $\boxed{\frac{d^2y}{dt^2} = v^2\frac{d^2y}{dx^2}}$

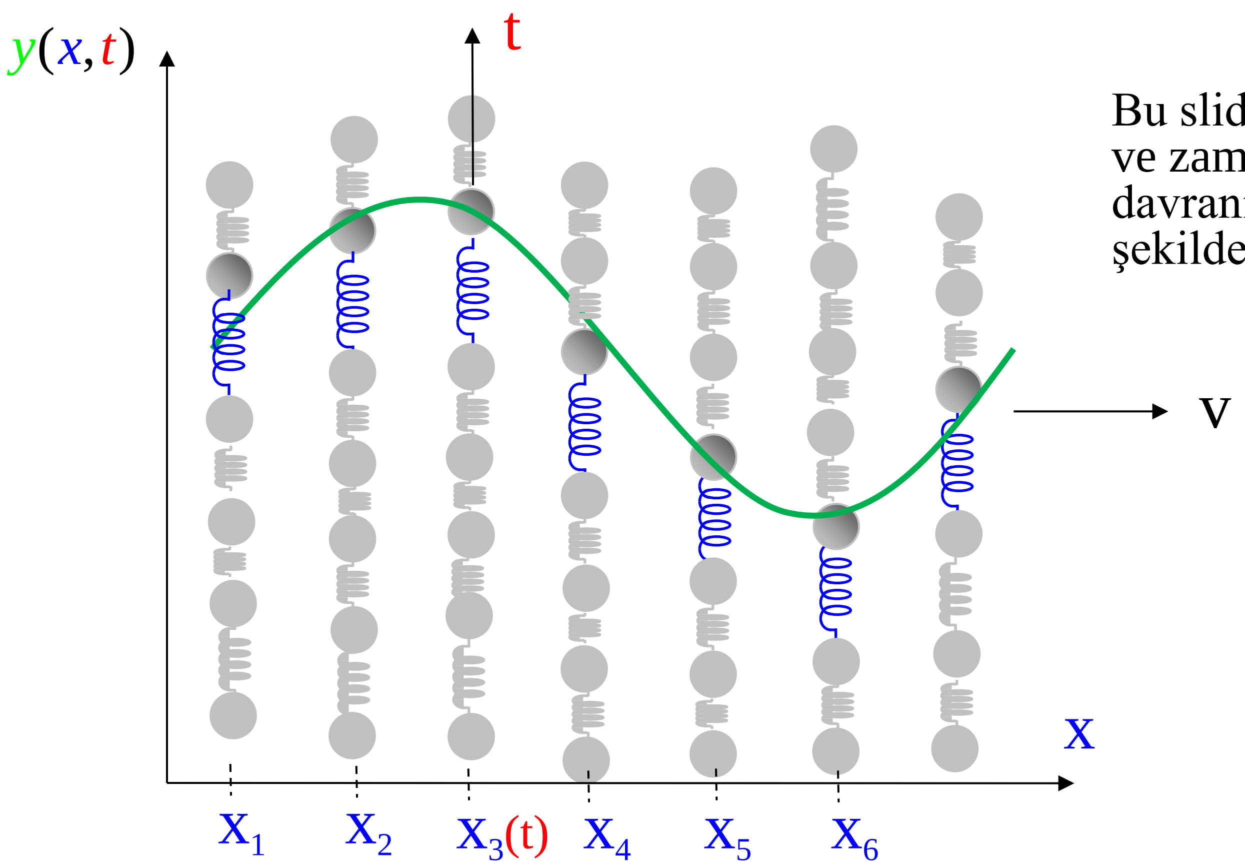
Dalga Denklemi

Bu tek boyutta (x) dalga denklemidir.

$$\frac{d^2 y(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2 y(x,t)}{dt^2}$$

v: Dalganın ilerleme (faz) hızı

y(x,t): Salınım yapan cismin zamanın fonksiyonu olarak konumu (yer değiştirme)



Bu slide ı y nin uzay ve zamandaki davranışını gösterecek şekilde düzenle…

Dalga Denklemi

Bu tek boyutta (x) dalga denklemidir.

$$\boxed{\frac{d^2 y(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2 y(x,t)}{dt^2}}$$

v: Dalganın ilerleme (faz) hızı

y(x,t): Salınım yapan cismin zamanın fonksiyonu olarak konumu (yer değiştirme)

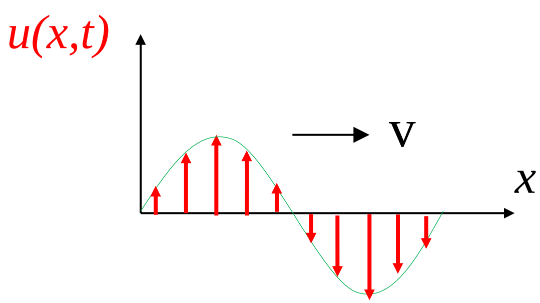
Dalga hareketinin kaynağı her zaman yerdeğiştirme (y) olmayabilir, elektrik (E) ve manyetik alan (H) gibi başka nicelikler de olabilir..

En genel durumda (1B) dalga denklemi:

$$\boxed{\frac{d^2 u(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2 u(x,t)}{dt^2}}$$

v: Dalganın ilerleme (faz) hızı

u(x,t): Salınım yapan nicelik (yerdeğiştirme, alan (E ve H gibi), kuvvet, basınç)



Dalga Denklemi

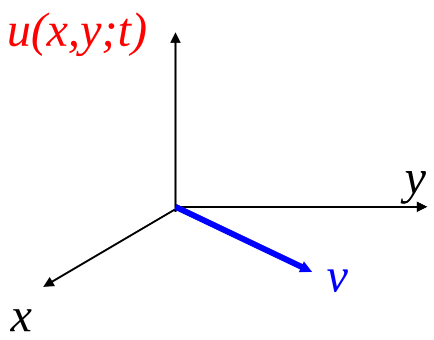
(1B) dalga denklemi:

$$\boxed{\frac{d^2u(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2u(x,t)}{dt^2}}$$

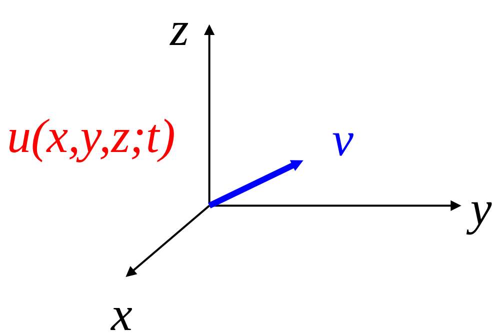
v: Dalganın ilerleme (faz) hızı

u(x,t): Salınım yapan nicelik (yerdeğiştirme, alan (E ve H gibi), kuvvet, basınç)

Dalga en genel durumda tek boyutta değil 3 boyutta ilerleyebilir.



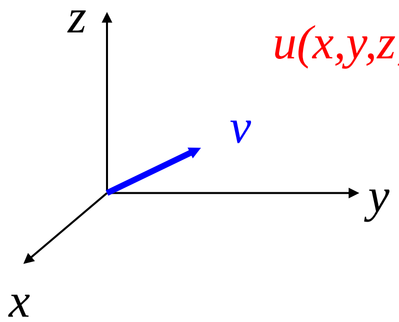
$$\frac{d^2u(x,y;t)}{dx^2} + \frac{d^2u(x,y;t)}{dy^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2u(x,y;t)}{dt^2}$$



$$\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dx^2} + \frac{d^2u(x,y,z;t)}{dy^2} + \frac{d^2u(x,y,z;t)}{dz^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dt^2}$$

3 Boyutta Dalga Denklemi

$$\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dx^2}+\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dy^2}+\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dz^2}=\frac{1}{v^2}\frac{d^2u(x,y,z;t)}{dt^2}$$



$u(x,y,z;t)= u(r,t)$

$$\underbrace{\frac{d^2u(r,t)}{dx^2}+\frac{d^2u(r,t)}{dy^2}+\frac{d^2u(r,t)}{dz^2}}=\frac{1}{v^2}\frac{d^2u(r,t)}{dt^2}$$

Del operatörü:

$$\vec{\nabla}\equiv\hat{i}\frac{d}{dx}+\hat{j}\frac{d}{dy}+\hat{k}\frac{d}{dz}$$

$$\vec{\nabla}.\vec{\nabla}=\nabla^2=\frac{d^2}{dx^2}+\frac{d^2}{dy^2}+\frac{d^2}{dz^2}$$

$$\frac{d^2u(r,t)}{dx^2}+\frac{d^2u(r,t)}{dy^2}+\frac{d^2u(r,t)}{dz^2}\equiv\nabla^2u(r,t)$$

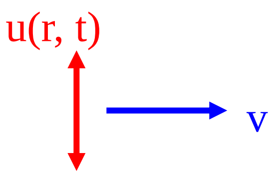
3 Boyutta Dalga Denklemi:

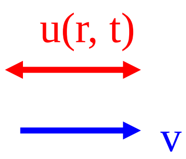
$$\boxed{\nabla^2u(r,t)=\frac{1}{v^2}\frac{d^2u(r,t)}{dt^2}}$$

Dalgaların Sınıflandırılması

$$\boxed{\nabla^2 u(r,t) = \frac{1}{v^2}\frac{d^2 u(r,t)}{dt^2}}$$

Dalga hareketinde dalgayı oluşturan niceliğin değişim yönü ve dalganın ilerleme yönüne göre dalgaları sınıflandırabilirz.



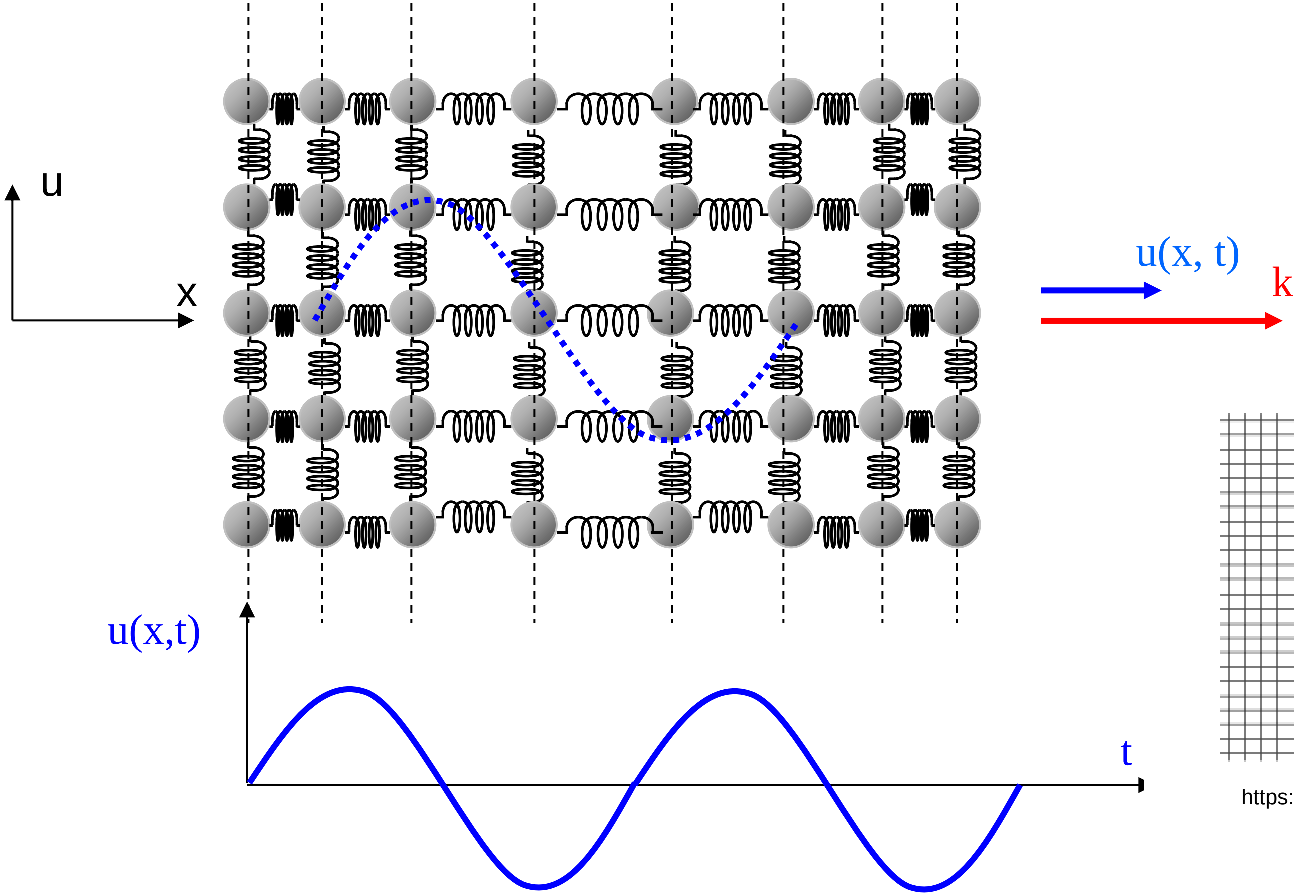


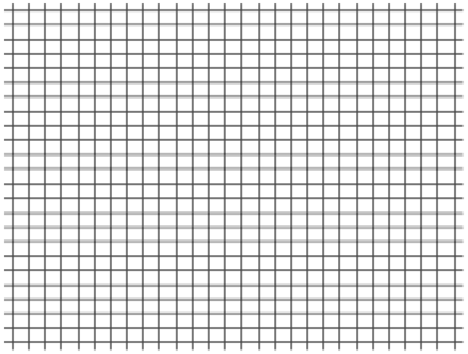
Dalganın salınım doğrultusu (**u**) ile ilerleme yönü (**v**) birbirlerine göre **dik** ise **Enine Dalga**
(Işık, Meksika Dalgası)

Dalganın salınım doğrultusu (**u**) ile ilerleme yönü (**v**) birbirlerine göre **paralel** ise **Boyuna Dalga**
(Ses Dalgası)

Boyuna Dalga (Longitudinal Wave)

Boyuna Dalgalar: Salınım hareketi x-doğrultusunda olurken dalga da x-doğrultusunda ilerler.

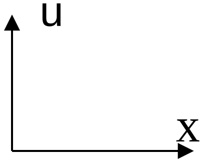


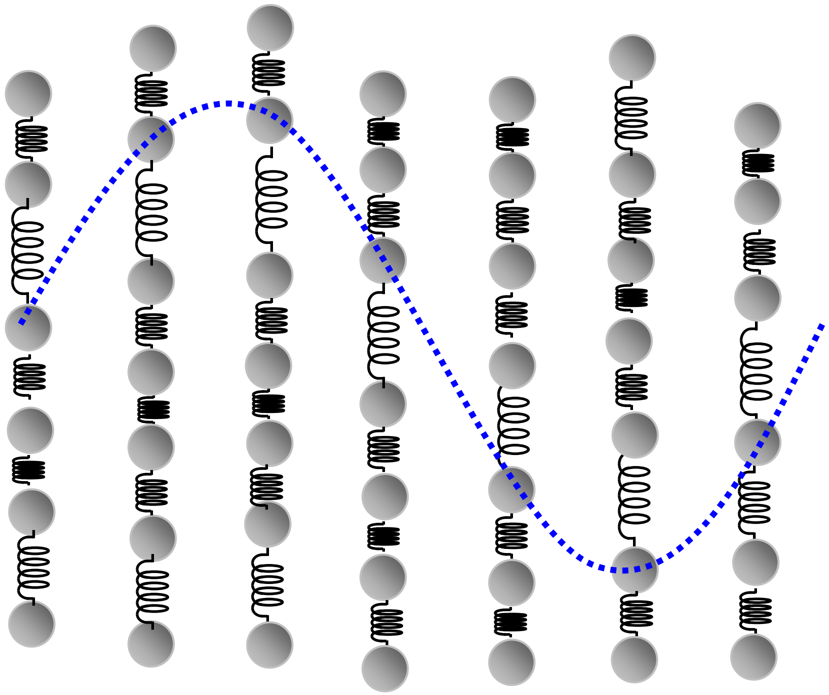


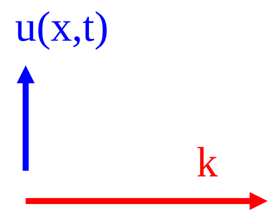
https://en.wikipedia.org/wiki/Longitudinal_wave

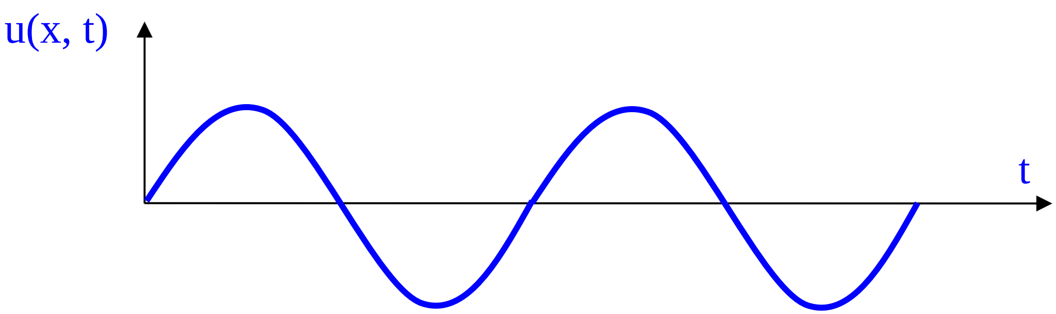
Enine Dalga (Transverse Wave)

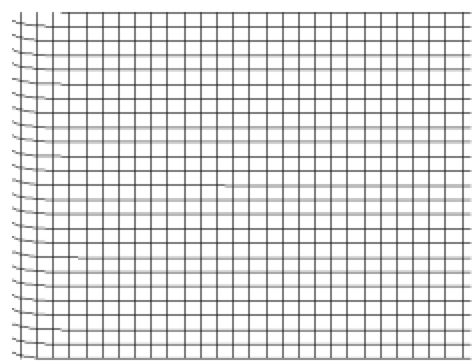
Enine Dalgalar: Salınım hareketi y-doğrultusunda olurken dalga da x-doğrultusunda ilerler.











https://en.wikipedia.org/wiki/Transverse_wave

İlerleyen Dalgalar-Çözüm

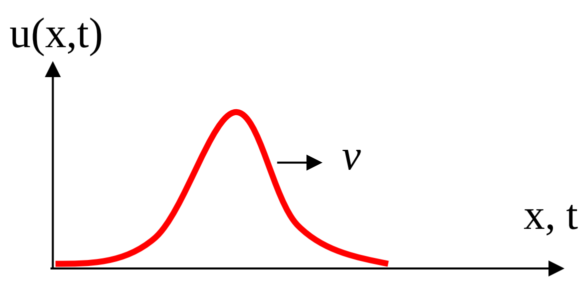
Dalga Denklemi (1B): $$\boxed{\nabla^2 u(r,t) = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(r,t)}{\partial t^2}}$$

Bu (dalga) denklemlerinin çözümü(leri) nedir?

Basitlik olması açısından üç boyutta yazılan yukarıdaki dalga denklemini bir boyut (x-doğrultusunda ilerleyen dalga) için yazıp, çözmeye çalışalım.

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \xrightarrow{u(x,y,z;t) \Rightarrow u(x;t)} \quad \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

3 boyutta dalga denklemi (dalga, herhangi bir ***r*** doğrultusunda ilerliyor)



1 boyutta dalga denklemi (dalga, x doğrultusunda ilerliyor)

Burada, x dalganın ilerleyiş doğrultusunu, t zamanı, *v* ise dalganın yayılma hızını (faz hızını) göstermektedir.

İlerleyen Dalgalar

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

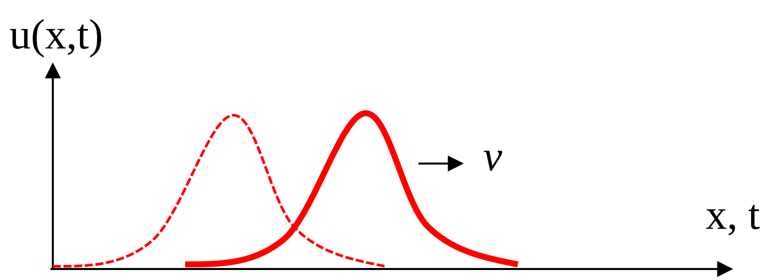
Çözüm önerisi $u(x,t) = f(x - vt)$

Ödev-2: f(x-vt) fonksiyonunun dalga denkleminin çözümü olduğunu gösteriniz.

Eğer uzay (x) ve zaman (t) değişkeni arasındaki ilişki ***f***(x-vt) şeklinde ise f fonksiyonun (dalganın şeklinin) nasıl olduğu çok önemli değildir.

Dikkat! ***f***(x - vt)

Negatif işaret (+x) yönünde olduğunu gösterir.

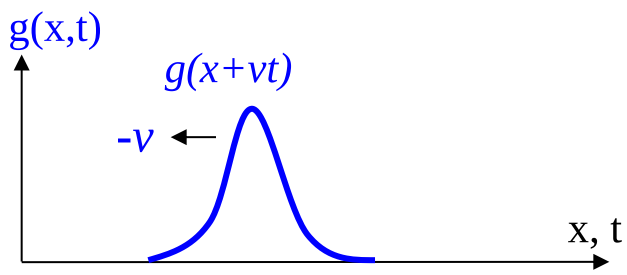


Fiziksel olarak *f(x-vt)* sağa (+x) yönünde ilerleyen dalgayı göstermektedir.

Dalga denkleminin Diğer Çözümü

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

Diğer Çözüm: $u(x,t) = g(x+vt)$



Fiziksel olarak *g(x+vt)* sola (-x) yönünde ilerleyen dalgayı göstermektedir.

Dalga Denkleminin Diğer Çözümü

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

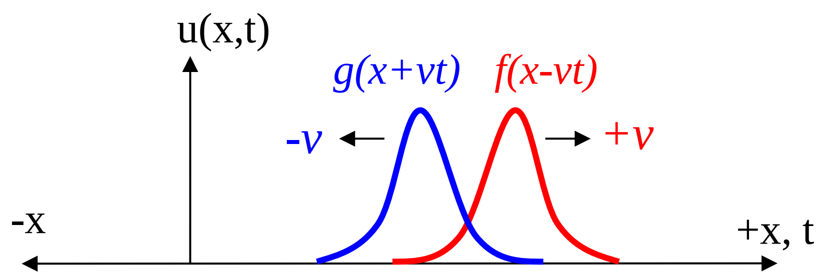
Bu diferansiyel (dalga) denklemin en genel çözümü:

$$u(x,t) = f(x - vt) + g(x + vt)$$

şeklinde verilir ve dalga denkleminin çözümünü sağlar.

f(x-vt) ve *g(x+vt)* şeklinde verilen çözümlerde *f* ve *g* fonksiyonlarının sadece argümanının (uzay(x) ve zaman(t) değişkenleri) özel şekilde olması (x±vt şeklinde) yeterlidir; dalganın şeklini belirleyen *f* ve *g*'nin **nasıl olduğu önemli değildir!** (Argümanı x±vt olan herhangi bir *f* veya *g* fonksiyonu dalga denklemini sağlayacaktır).

Çözümler, bu durumda **ilerleyen dalga** şeklinde olacaktır.



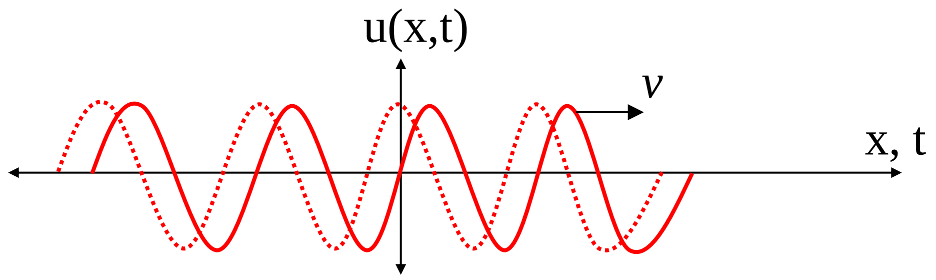
Fiziksel olarak *f(x-vt)* sağa (+x), *g(x+vt)* ise sola (-x) doğru giden dalgayı göstermektedir.

Neden İlerleyen Dalga?

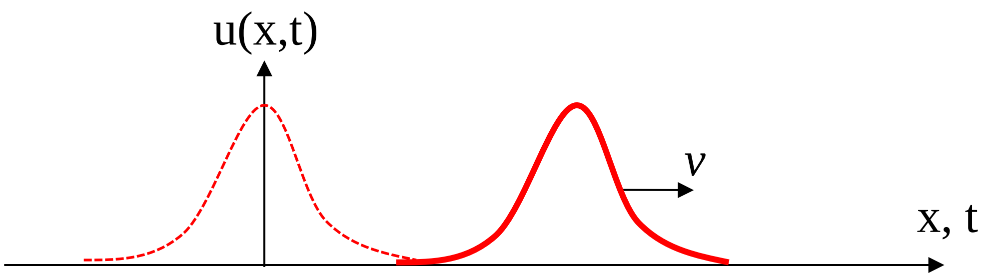
Dalga Denklemi
$$\boxed{\frac{d^2u(x,t)}{dx^2} = \frac{1}{v^2}\frac{d^2u(x,t)}{dt^2}}$$

Dalga Denkleminin Çözümü: $u(x,t) = f(x - vt) + g(x + vt)$

Sürekli Dalga



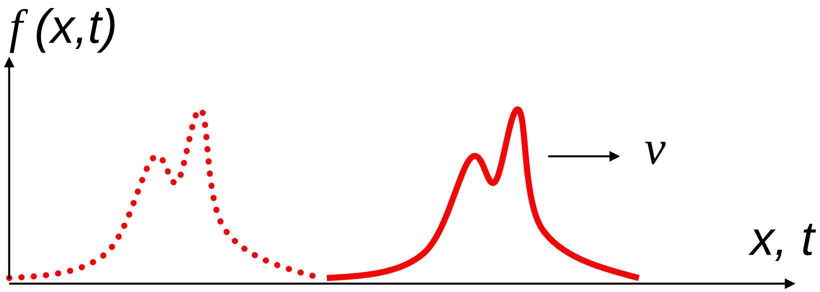
Atma (Pulse)



Dalga şeklini koruyarak uzayda v hızı ile ilerler…

İlerleyen Dalgalar

Aşağıdaki x-ekseni boyunca v hızı ile ilerleyen atma şeklindeki dalga, atmanın şekli ne olursa olsun, argümanı (x-vt) şeklinde olduğu sürece dalga denklemini sağlayacaktır ve +x doğrultusunda ilerleyen bir dalgayı temsil edecektir.



$$f(x,t) = 3e^{-(x-vt)^2}$$

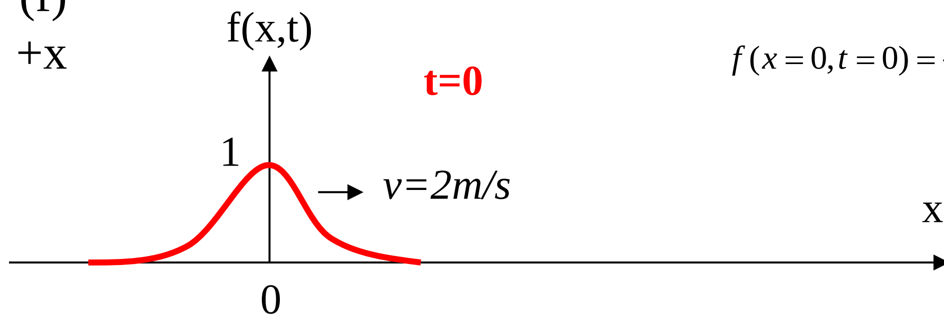
Ancak yandaki *f* fonksiyonu, $f(x,t) = 3\ln(x)e^{-vt}$

Bu fonksiyonun değişkenleri (x-vt) şeklinde olmadığı için ***f*** fonksiyonu dalga denklemini sağlamaz, ilerleyen dalgayı temsil **etmez!** çünkü fonksiyonun uzay (x) ve zamana (t) bağlılığı tam olarak (x-vt) şeklinde **değildir!**

Neden İlerleyen Dalga?

t=0 anında dalganın formu (f) aşağıdaki şekilde olsun. Dalga +x yönünde 2m/s hızla ilerlesin

$$f(x,t=0)=\frac{1}{x^2+1}$$



$$f(x=0,t=0)=\frac{1}{(0)^2+1}=1$$

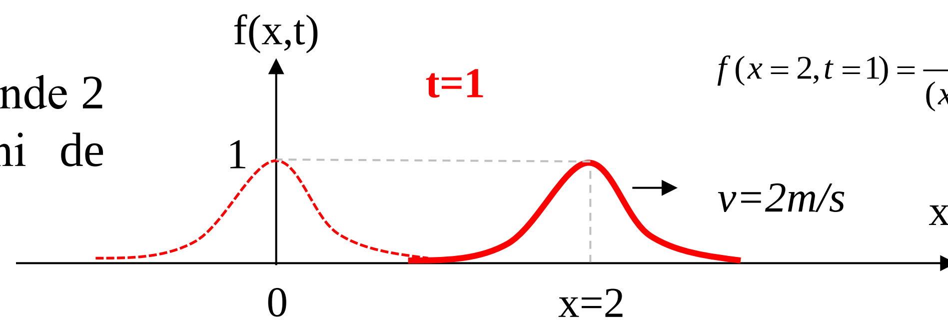
Bu ilerleyen dalga olduğundan uzay ve zaman değişkenleri arasındaki ilişkinin:

$$u(x,t)=f(x-vt)$$

$$f(x,t)=\frac{1}{(x-vt)^2+1}=\frac{1}{(x-2t)^2+1}$$

t=1s zaman sonra dalga +x yönünde 2 birim ilerlemiş olur ve şeklini de korumuştur. Dalganın şekli

$$f(x,t=1)=\frac{1}{(x-2)^2+1}$$



$$f(x=2,t=1)=\frac{1}{(x-2)^2+1}=1$$

Bu fonksiyon t=0 anındaki fonksiyon gibidir tek farkı +x yönünde 2 birim kaymıştır.

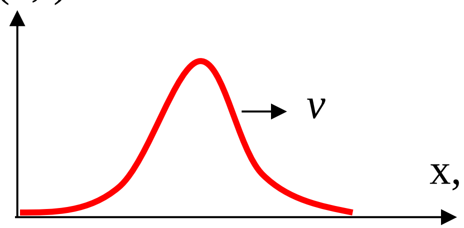
Ödev-3:

a) Dalga (–x) yönünde aynı hızla ilerlerse?

b) Bu örnekte dalganın (atmanın) konuma bağlılığı grafiğe geçirildi. Zamana göre değişimini x=0 ve x=2m çiziniz.

İlerleyen Dalga-Çözüm

Sadece sağa giden (+x) yönünde) giden dalgayı düşünelim.



$$u(x,t) = f(x - vt) + g(x + vt)$$

f fonksiyonunun periyodik bir formda olduğunu düşünebiliriz.

$$u(z,t) = A\cos(x - vt)$$

Bu çözüm ***Düzlem Dalga*** formundadır...

Burada A genlik, x ilerleme doğrultusu, t zaman, v ise dalganın hızıdır.

Çözüm olarak düzlem dalgaları seçmemiz gerçek çözümü etkilemez çünkü matematik bilgilerimizden herhangi bir dalga şeklini her zaman düzlem dalgalar cinsinden ifade edebiliriz (Fourier dönüşümü ile).

İlerleyen Dalga-Çözüm

Maxwell denklemlerini sağlayan elektrik alanın (dalga denkleminin) çözümünün

$$\boldsymbol{u}(x,t) = A\cos(x - vt)$$

şeklinde periyodik çözümleri içeren bir düzlem dalga olduğunu düşünebiliriz.

Burada A genlik, x ilerleme doğrultusu, t zaman, v ise dalganın hızıdır.

Çözüm olarak düzlem dalgaları seçmemiz gerçek çözümü etkilemez çünkü matematik bilgilerimizden herhangi bir dalga şeklini her zaman düzlem dalgalar cinsinden ifade edebiliriz (Fourier dönüşümü ile).

Düzlem dalga çözümleri, dalga denklemini ve aynı zamanda Maxwell denklemlerini sağlayacaktır.

Yukarıdaki çözümde t=0, x=0 da (orjinde) dalganın değeri A(x,t)=Acos(x-vt)=0 ki bu özel durumu gösterdiğinden argümandaki (x-vt) terimine ϕ gibi terim ekleyerek t=0 ve x=0 da dalganın sıfırdan farklı bir değer almasını sağlayabiliriz.

Ayrıca argümanı, k gibi bir sayı ile çarparsak çözümü daha da genelleştirmiş oluruz. k, katsayısının fiziksel olarak ne anlama geldiği ileride ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

İlerleyen Dalga-Çözüm

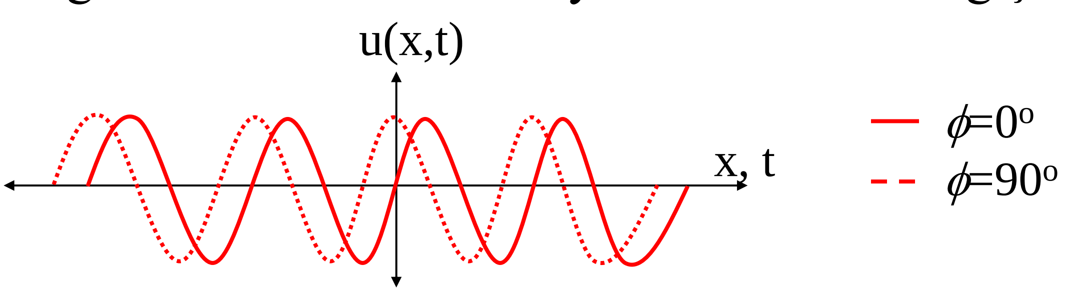
Dalga denkleminin çözümünde t=0, x=0 da (orjinde) alanın değeri u(x,t)=Acos(x-vt)=0 ki bu özel durumu gösterdiğinden argümandaki (x-vt) terimine ϕ gibi terim ekleyerek t=0 ve x=0 da dalganın sıfırdan farklı bir değer almasını sağlayabiliriz.

Ayrıca argümanı, k gibi bir sayı ile çarparsak çözümü daha da genelleştirmiş oluruz. k, katsayısının fiziksel olarak ne anlama geldiği ileride ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Bu durumda yukarıdaki çözüm daha genel bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$$

Faz açısına göre elektrik alanın uzay ve zamandaki değişimi



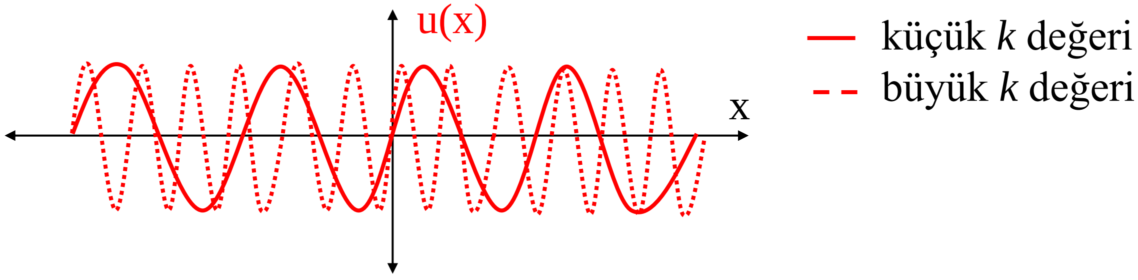
Dolayısı ile faz farkının değerine bağlı olarak dalga denklemi sinüs veya kosinüs fonksiyonları (periyodik fonksiyonlar) ile ifade edilebilir.

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + 90^o\right] = A\sin\left[k(x - vt)\right]$$

Açısal Nicelikler-1

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$$

k çarpanı fiziksel olarak neye karşı gelir?



k, bir boyutta dalga sayısı, 3B ise Dalga Vektörü olarak adlandırılır ve 3B ilerleyen bir dalga için vektörel bir niceliktir. Büyüklüğü dalga sayısını (xx), yönü ise dalganın ilerleme yönüdür.

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\hat{k}$$

büyüklüğü => $\bar{k} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ (dalga sayısı)

yönü ise dalganın ilerleme $\hat{k}$ (faz hızının) yönündedir.

Açısal Nicelikler-1

Dalganın uzay ve zaman içinde sıklıkları (frekansları) tanımlandı. Bu tanımlar:

- *Dalga sayısı* ($\bar{k}$), dalganın <u>birim uzunluk içinde</u> kendini kaç kez tekrar ettiğinin,
- *Frekans* (ν) ise dalganın <u>birim zamanda</u> kendini kaç kez tekrar ettiğinin ölçüsüdür.

Bu frekansları *açısal frekanslar* cinsinden ifade etmek daha kullanışlı olur.

Uzaysal Açısal Frekans

$$k = 2\pi\bar{k}$$

k=dalga vektörü (rad/m) $\bar{k}$=dalga sayısı (1/m)

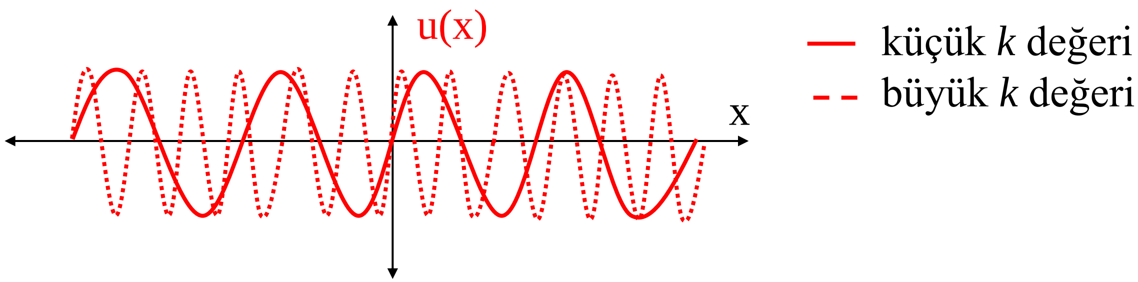
Zamansal Açısal Frekans

$$\omega = 2\pi\nu$$

ω=açısal frekans (rad/s) ν=frekans(1/s)

Görüldüğü gibi, daha önce dalga çözümünü genelleştirmek için yazılan k katsayısı fiziksel olarak dalgaboyunun tersine eşit olup açısal dalga sayısını gösterir. Dalga sayısı, üç boyutta vektörel bir niceliktir ve ***dalga vektörü*** olarak adlandırılır.

Dalga vektörü k'nın değerine bağlı olarak salınımdaki değişme



Dalga vektörü

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\hat{k}$$

büyüklüğü => $\bar{k} = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ (dalga sayısı)

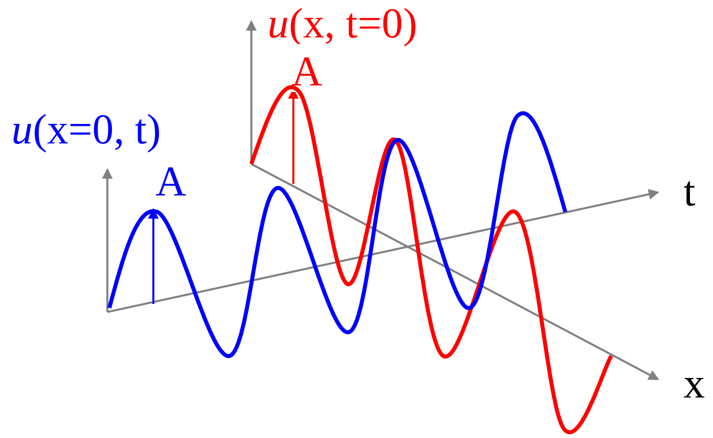
yönü ise dalganın ilerleme $\hat{k}$ (faz hızının) yönündedir.

İlerleyen Dalga-Çözüm

İlerleyen dalgayı gözümüzde canlandırabilecek durumdayız.

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$$

Dalga (u) hem zamanda hem de uzayda periyodik salınım yapmaktadır. Alanın uzaydaki (zamandaki) değişimini incelemek için zaman (uzay) değişkeni sabit tutularak dalganın konuma (zamana) göre değişimi incelenebilir.



Dalgaboyu-Dalgasayısı

Dalga denkleminin çözümü olan elektrik alanın uzaysal değişimine bakalım (t=0).

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$$

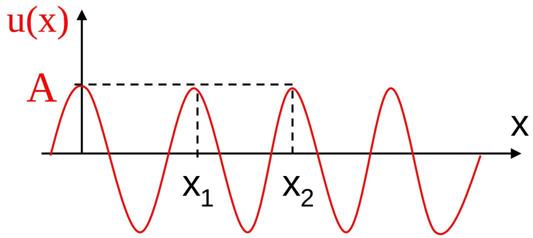
Bu, dalganın anlık olarak fotoğrafını çekmeye benzer.

$$u(x,t=0) = A\cos\left[kx + \phi\right]$$

Alanın, konuma göre değişimi periyodik olduğundan ardışıl iki maksimum noktaya karşı gelen konumlar (x_1 ve x_2);

$$kx_1 + \phi = 0 \Rightarrow u(x_1,0) = A$$

$$kx_2 + \phi = 2\pi \Rightarrow u(x_2,0) = A$$



Ardışık iki nokta arasındaki fark, dalganın uzayda kendini tekrar ettiği uzunluğa, uzaysal periyot'a karşı gelir.

$$k(x_2 - x_1) = 2\pi - 0 = 2\pi$$

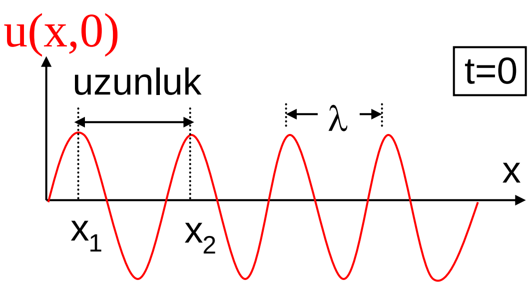
Buradan ***uzaysal periyot*** (x_2-x_1) tanımlanabilir ve bu niceliğe ***dalgaboyu*** denir.

Dalgaboyu (λ), dalganın uzayda kendisini tekrar ettiği mesafedir; birimi metredir.

Dalgaboyu $\lambda \equiv x_2 - x_1 = \dfrac{2\pi}{k}$

Dalgaboyunun tersi ($\bar{k} \equiv 1/\lambda$), uzaysal frekans veya ***dalga sayısı*** olarak bilinir; birimi m^{-1} dir.

Dalga sayısı $\bar{k} \equiv \dfrac{1}{\lambda}$



Periyot-Frekans

Elektrik alanın $u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$ zamansal değişimine bakalım (z=0).

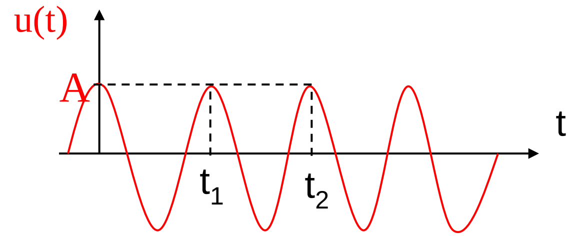
Bu, bir noktada dalganın video çekimini yapmaya benzer.

$$u(x=0,t) = A\cos\left[kvt + \phi\right]$$

Dalganın, zamana göre değişimi periyodik olduğundan ardışıl iki maksimum noktaya karşı gelen zamanlar (t_1 ve t_2);

$$kvt_1 + \phi = 0 \Rightarrow u(0,t_1) = A$$

$$kvt_2 + \phi = 2\pi \Rightarrow u(0,t_2) = A$$



Ardışık iki zaman arasındaki fark, dalganın zamanda kendini tekrar ettiği süreye, zamansal periyot'a karşı gelir.

$$kv(t_2 - t_1) = 2\pi - 0 = 2\pi$$

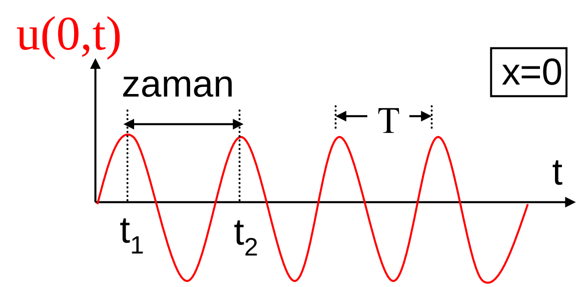
Buradan ***zamansal periyot*** (t_2-t_1) tanımlanabilir ve bu niceliğe kısaca ***periyot*** denir.

Periyot (T), dalganın bir tam salınım yapması için geçen süredir; birimi saniyedir.

Periyot $T \equiv t_2 - t_1 = \dfrac{2\pi}{vk}$

Periyotun tersi frekans (ν) dır ve birim zamanda salınım sayısıdır; birimi 1/s veya yaygın şekli ile Hertz (Hz) dir.

Frekans $\nu \equiv \dfrac{1}{T}$

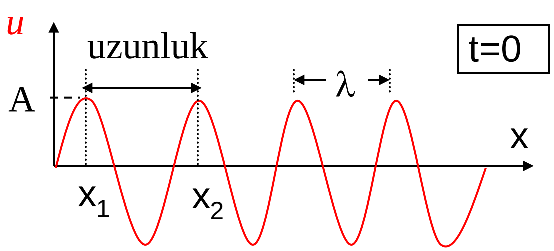


Açısal Nicelikler-2

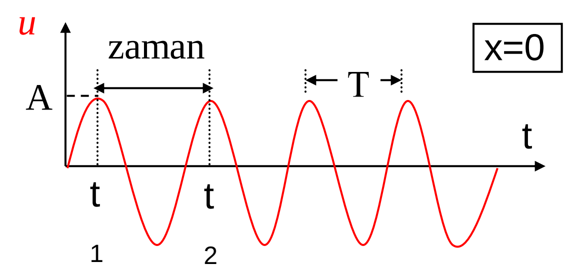
Tanımlanan bu yeni nicelikler cinsinden elektrik alan yeniden yazılabilir:

$$u(x,t) = A\cos\left[k(x - vt) + \phi\right]$$

Uzaysal Değişim



Zamansal Değişim



$\frac{2\pi}{k} \equiv \lambda$	Dalgaboyu	→	$\lambda = vT$ ←	$\frac{2\pi}{vk} \equiv T$	Periyot
$\frac{1}{\lambda} \equiv \bar{k}$	Dalga sayısı	→	$\bar{k} = f / v$ ←	$\frac{1}{T} \equiv f$	Frekans
$2\pi\bar{k} \equiv k$	Dalga vektörü	→	$k = \frac{1}{v}\omega$ ←	$2\pi f \equiv \omega$	Açısal Frekans

$$v = \frac{\omega}{k}$$

$$u(x,t) = A\cos\left[kx - \omega t + \phi\right]$$

$$v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$